



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Henrique Simiano

**Verificação estrutural de uma torre de suspensão de uma linha de
transmissão de 230 kV**

Florianópolis

2024

Henrique Simiano

**Verificação estrutural de uma torre de suspensão de uma linha de
transmissão de 230 kV**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de engenharia civil do Campus Reitor João David Ferreira Lima da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Florianópolis

2024

Simiano, Henrique

Verificação estrutural de uma torre de suspensão de uma
linha de transmissão de 230 kV / Henrique Simiano ;
orientador, Leandro Fleck Fadel Miguel, 2024.

74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Torres de transmissão. 3.
Análise estrutural. I. Miguel, Leandro Fleck Fadel. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Henrique Simiano

**Verificação estrutural de uma torre de suspensão de uma linha de
transmissão de 230 kV**

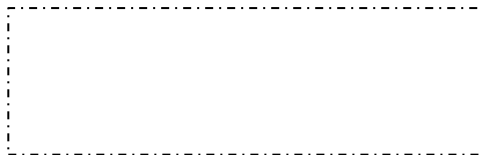
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de engenheiro civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Local Florianópolis, 12 de dezembro de 2024.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Orientador

Prof. Jano D'Araujo Coelho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Rafael Rodrigues de Souza, Dr.
Brametal

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Mazo e Jeane e à toda minha família, pelo amor e pela luta diária para me proporcionar condições de morar em outra cidade e estudar em uma universidade federal. Esse apoio incondicional foi essencial para que eu pudesse realizar meus sonhos.

À minha namorada, Laura, pelo amor, apoio e companheirismo constantes durante toda a minha trajetória na faculdade e fora dela, tornando os momentos difíceis mais leves e os bons ainda melhores.

Aos meus amigos da turma 19.2, Alisson, Braian, Isabela e Pedro, e da turma 19.1, Anthony, Chicão, Steffen, Juliarde, Julio, Zani e Bala por estarem comigo desde o início desta caminhada, compartilhando momentos de diversão e estudo.

Aos meus amigos Rick, Pitu e Tio, pelo apoio nos momentos em que eu precisava desconectar das responsabilidades da faculdade. Sem vocês, esses cinco anos certamente teriam sido mais difíceis e com muito menos risadas.

Ao professor Leandro, por sua orientação, paciência e as valiosas trocas de conhecimento. E, por fim, aos demais professores da UFSC, pela contribuição para minha formação acadêmica e pessoal.

A todos vocês, minha mais sincera gratidão.

RESUMO

O sistema elétrico brasileiro, um dos mais extensos e complexos do mundo, conecta usinas geradoras a centros consumidores situados em regiões distantes, exigindo uma infraestrutura de transmissão robusta e confiável. O crescimento econômico e a urbanização têm impulsionado a alta demanda por eletricidade, resultando em investimentos significativos na modernização das linhas de transmissão, com o objetivo de aprimorar a confiabilidade e mitigar vulnerabilidades causadas por eventos climáticos extremos. Nesse cenário, as torres treliçadas de aço galvanizado desempenham um papel fundamental devido à sua durabilidade, resistência e facilidade de montagem, sendo amplamente adotadas no país. Este trabalho apresenta a análise estrutural de uma torre de suspensão de linha de transmissão de 230 kV, utilizando o *software* TOWER (POWER LINE SYSTEMS, 2023) para comparar dois modelos estruturais. O primeiro modelo, tradicionalmente utilizado na prática brasileira, considera apenas os membros principais da estrutura, enquanto o segundo inclui também todos os membros redundantes. Foram realizadas análises lineares e não lineares geométricas para a obtenção dos esforços internos na estrutura e, posteriormente, verificações dos membros principais conforme os critérios estabelecidos pela norma internacional ASCE 10-15 (ASCE, 2015) e verificações dos membros redundantes, considerando tanto os critérios da prática nacional usual quanto os esforços efetivamente atuantes, calculados pelo programa. Os resultados demonstraram que a inclusão dos membros redundantes no segundo modelo promoveu uma redistribuição dos esforços estruturais, com redução média de 2,6% nas solicitações dos montantes e reduções pontuais de até 5,9% nesses membros. Embora demande maior capacidade computacional e mais tempo de modelagem, o segundo modelo demonstrou-se indispensável para a verificação de projetos de maior complexidade estrutural. A análise das forças efetivamente atuantes identificou pontos críticos em interseções de múltiplas barras redundantes, onde os esforços superaram em até três vezes a resistência nominal, situações que não foram detectadas no primeiro modelo. Além disso, o segundo modelo eliminou a necessidade de ajustes artificiais de área e peso, frequentemente aplicados no primeiro modelo para compensar a ausência de membros redundantes, proporcionando maior precisão nas análises estruturais. Conclui-se que o primeiro modelo continua sendo uma solução eficiente para aplicações que priorizam agilidade e economia de recursos. No entanto, a inclusão de todos os membros reais da estrutura, no segundo modelo, mostrou-se fundamental para projetos que demandam maior precisão na análise e estabilidade estrutural, sendo recomendada em cenários de estruturas com alta complexidade. Este estudo reforça a importância de ferramentas especializadas, como o TOWER, para atender às crescentes exigências do setor de transmissão de energia, garantindo eficiência e confiabilidade.

Palavras-chave: torre de transmissão, análise estrutural, PLS TOWER.

ABSTRACT

The Brazilian electrical system, one of the most extensive and complex in the world, connects generating plants to consumer centers located in distant regions, requiring robust and reliable transmission infrastructure. Economic growth and urbanization have driven high electricity demand, resulting in significant investments in the modernization of transmission lines to enhance reliability and mitigate vulnerabilities caused by extreme weather events. In this context, galvanized steel lattice towers play a fundamental role due to their durability, strength, and ease of assembly, making them widely adopted across the country. This study presents the structural analysis of a 230 kV transmission suspension tower using the TOWER software (POWER LINE SYSTEMS, 2023) to compare two structural models. The first model, traditionally used in Brazilian practice, considers only the main members of the structure, while the second also includes all redundant members. Linear and nonlinear geometric analyses were performed to obtain internal forces in the structure, followed by the verification of the main members according to the criteria established by the international ASCE 10-15 standard (ASCE, 2015) and the verification of redundant members, considering both national practice criteria and the effective forces calculated by the software. The results showed that including redundant members in the second model promoted a redistribution of structural forces, with an average reduction of 2.6% in the loads on main members and point reductions of up to 5.9% in these components. Although it requires greater computational capacity and more modeling time, the second model proved indispensable for verifying structurally complex designs. The analysis of effective forces identified critical points at intersections of multiple redundant bars, where forces exceeded up to three times the nominal resistance, situations undetected in the first model. Furthermore, the second model eliminated the need for artificial adjustments to area and weight often applied in the first model to compensate for the absence of redundant members, providing greater precision in structural analyses. It is concluded that the first model remains an efficient solution for applications prioritizing agility and resource optimization. However, including all actual members in the structure, as in the second model, proved essential for projects requiring greater analytical precision and structural stability, being recommended for highly complex structures. This study underscores the importance of specialized tools, such as the TOWER software, in meeting the growing demands of the energy transmission sector, ensuring efficiency and reliability.

Keywords: transmission tower, structural analysis, PLS TOWER.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede brasileira de transmissão de energia.....	16
Figura 2 - Tipos de barras em uma torre de linha de transmissão	18
Figura 3 - Principais elementos das linhas de transmissão.....	21
Figura 4 - Tipos de torres quanto à disposição dos condutores.....	23
Figura 5 - Estrutura de suspensão	24
Figura 6 - Estrutura em ângulo.....	25
Figura 7 - Formatos de torres estaiadas e seus nomes populares.....	26
Figura 8 - Formatos de torres autoportantes e seus nomes populares	27
Figura 9 - Vão de peso	28
Figura 10 - Coeficientes de arrasto para suportes treliçados compostos por membros de faces planas	31
Figura 11 - Fator combinado de vento aplicável a suportes e cadeias de isoladores.....	32
Figura 12 - Definição do ângulo de incidência do vento	32
Figura 13 - Fator combinado de vento para condutores para diversas categorias de terrenos e alturas acima do solo	33
Figura 14 - Fator de vão	34
Figura 15 - Vão de vento	34
Figura 16 - Dimensões de cantoneiras.....	36
Figura 17 - Silhueta (torre básica)	41
Figura 18 - Silhueta (extensão e pés)	42
Figura 19 - Árvores de carregamentos.....	46
Figura 20 - Modelo simples de torre	48
Figura 21 - <i>Crossing diagonals</i>	49
Figura 22 - Primeiro modelo	51
Figura 23 - Segundo modelo	52
Figura 24 - Configuração da verificação de escalada	55
Figura 25 - Configuração da verificação da força nas barras redundantes	55
Figura 26 - Seção 3.....	56
Figura 27 - Seção 9.....	57
Figura 28 - Redundantes da face transversal da seção 8	61
Figura 29 - Redundantes da face transversal da seção 10	62
Figura 30 - Seção 11 (primeiro modelo).....	64

Figura 31 - Seção 11 (segundo modelo)	66
Figura 32 - Corte GG.....	67
Figura 33 - Região crítica da seção 7	70
Figura 34 - Região crítica das seções 8, 9, 10 e 11	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das categorias de terreno.....	30
Tabela 2 - Fator de correção τ da pressão dinâmica de vento de referência q_0 devido à altitude e temperaturas.....	30
Tabela 3 - Esbeltez efetiva de barras com $L/r \leq 120$	37
Tabela 4 - Esbeltez efetiva de barras com $L/r > 120$	37
Tabela 5 - Parâmetros básicos da torre	40
Tabela 6 - Propriedades dos tipos aço	43
Tabela 7 - Propriedades dos perfis	43
Tabela 8 - Propriedades dos parafusos	44
Tabela 9 - Fatores de ajuste de área	53
Tabela 10 - Fatores de ajuste de carga permanente.....	54
Tabela 11 - Peso próprio por painel	58
Tabela 12 - Análise não linear dos montantes do primeiro modelo.....	59
Tabela 13 - Análise não linear dos montantes do segundo modelo	59
Tabela 14 - Comparação das solicitações de cálculo dos montantes	60
Tabela 15 - Verificação de esbeltez efetiva.....	62
Tabela 16 - Verificação de escalada	63
Tabela 17 - Verificação de porcentagem de carga para o primeiro modelo	65
Tabela 18 - Verificação de porcentagem de carga para o segundo modelo	66
Tabela 19 - Verificação de porcentagem de carga para o primeiro modelo	68
Tabela 20 - Verificação de porcentagem de carga para o segundo modelo	68
Tabela 21 - Análise não linear das redundantes do segundo modelo.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Largura da aba da cantoneira;
A_c	Esforço atuante no cabo;
A_g	Área bruta da seção transversal do perfil;
A_n	Área líquida da seção transversal do perfil;
A_t	Esforço devido ao vento;
C_{xt1}	Coeficientes de arrasto correspondente à face longitudinal;
C_{xt2}	Coeficientes de arrasto correspondentes à face transversal;
C_{xc}	Coeficiente de arrasto do cabo;
d	Diâmetro do condutor;
d_f	Diâmetro do furo do parafuso;
d_p	Diâmetro nominal do parafuso;
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço;
F_c	Tensão limite de compressão;
F_V	Força vertical aplicada no ponto de fixação do cabo;
F_v	Tensão admissível ao corte do parafuso;
F_y	Tensão limite de escoamento do aço;
F_u	Tensão limite de ruptura do aço;
g_a	Aceleração da gravidade;
g	Distâncias entre furos na direção perpendicular ao esforço;
G_t	Fator combinado de vento para suportes e isoladores;
G_c	Fator combinado de vento para condutores e para-raios;
G_L	Fator de vão;
K_R	Fator de rugosidade do terreno;
kL/r	Esbeltez efetiva;
L	Vão horizontal da torre analisada;
L_{gr}	Vão gravante ou vão de peso da estrutura;
l	Comprimento de cada barra;
l_{hor}	Comprimento da projeção horizontal da barra;
M_{rd}	Momento resistente de cálculo;
$M_{máx}$	Momento máximo;
n_{cf}	Número de cabos por fase;

n	Quantidade de furos;
P_c	Peso do condutor ou para-raios por unidade de comprimento;
P_{cf}	Peso das cadeias de isoladores e das ferragens;
P_t	Peso total da torre;
q_0	Pressão dinâmica de referência;
R	Raio de laminação;
R_{dc}	Esforço resistente de cálculo a compressão;
R_{dt}	Esforço resistente de cálculo a tração;
R_x	Raio de giração em relação ao eixo x;
R_y	Raio de giração em relação ao eixo y;
R_z	Raio de giração em relação ao eixo z;
s	Distâncias entre furos na direção paralela ao esforço;
S_{dc}	Esforço solicitante de cálculo a compressão;
S_{dt}	Esforço solicitante de cálculo a tração;
S_{t1}	Área total projetada na face longitudinal;
S_{t2}	Área total projetada na face transversal;
t	Espessura da cantoneira;
q_0	Pressão dinâmica do vento de referência;
V_{RB}	Velocidade básica do vento de referência;
W	Módulo de resistência elástico;
ρ	Massa específica do material;
τ	Fator de correção da densidade;
μ	Densidade do ar;
θ	Ângulo de incidência do vento;
χ	Taxa de solidez do painel;
Ω	Ângulo entre a direção da linha e a direção do vento.
Φ_R	Fator de minoração da resistência limite.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2	TORRES DE TRANSMISSÃO	17
1.3	OBJETIVO GERAL	19
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.5	METODOLOGIA	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	ELEMENTOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	21
2.1.1	Cabos condutores e para-raios	21
2.1.2	Isoladores	21
2.1.3	Estruturas suportes	22
2.1.4	Fundações	22
2.1.5	Aterramento.....	22
2.2	TIPOS DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	22
2.2.1	Quanto à disposição dos condutores	22
2.2.2	Quanto ao número de circuitos	23
2.2.3	Quanto à função na linha	23
2.2.3.1	<i>Estrutura de Suspensão</i>	23
2.2.3.2	<i>Estrutura de Ancoragem</i>	24
2.2.3.3	<i>Estrutura em Ângulo.....</i>	24
2.2.3.4	<i>Estrutura de Transposição</i>	25
2.2.3.5	<i>Estrutura de Derivação.....</i>	25
2.2.4	Quanto à forma de resistência das estruturas	25
2.2.5	Quanto à voltagem da linha	26
2.2.6	Quanto ao formato	26
2.3	AÇÕES EM ESTRUTURAS DE LINHA DE TRANSMISSÃO	27
2.3.1	Ações devido ao peso próprio.....	27
2.3.2	Ações devido ao vento	29
2.3.2.1	<i>Pressão dinâmica de referência</i>	29
2.3.2.2	<i>Ação do vento na estrutura</i>	30
2.3.2.3	<i>Ação do vento nos cabos</i>	33
2.4	VERIFICAÇÕES DE PROJETO.....	34

2.4.1	Barras comprimidas	35
2.4.1.1	Verificação à compressão	35
2.4.1.2	Tensão limite de compressão.....	35
2.4.1.3	Esbeltez efetiva	36
2.4.2	Barras tracionadas.....	37
2.4.2.1	Verificação à tração.....	37
2.4.2.2	Área líquida	38
2.4.3	Barras redundantes	38
3	ESTUDO DE CASO.....	40
3.1	PARAMETROS BÁSICOS	40
3.2	SILHUETA	40
3.3	MATERIAIS EMPREGADOS	43
3.4	AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA	44
3.5	HIPOTETES DE CARREGAMENTO	44
4	MODALAGEM NO SOFTWARE TOWER	47
4.1	TIPOS DE ELEMENTOS	47
4.2	TIPOS DE GRUPO	48
4.3	MODELOS	50
4.3.1	Fator de área.....	53
4.3.2	Fator de peso.....	53
4.3.3	Configurações da análise no segundo modelo.....	54
4.3.3.1	Verificação de escalada	54
4.3.3.2	Verificação de porcentagem da carga.....	55
5	RESULTADOS	58
5.2	BARRAS PRINCIPAIS	58
5.3	BARRAS REDUNDANTES	61
5.3.1	Verificação de esbeltez efetiva	61
5.3.2	Verificação de escalada.....	62
5.3.3	Verificação de porcentagem de carga.....	63
5.3.3.1	Seção 11	64
5.3.3.1.1	Primeiro modelo	64
5.3.3.1.2	Segundo modelo	65
5.3.3.2	Corte GG.....	67
5.3.3.2.1	Primeiro modelo	67

5.3.3.2.2	<i>Segundo modelo</i>	68
5.3.4	Verificação da força efetivamente atuante no membro	69
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	71
6.1	CONCLUSÃO	71
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72

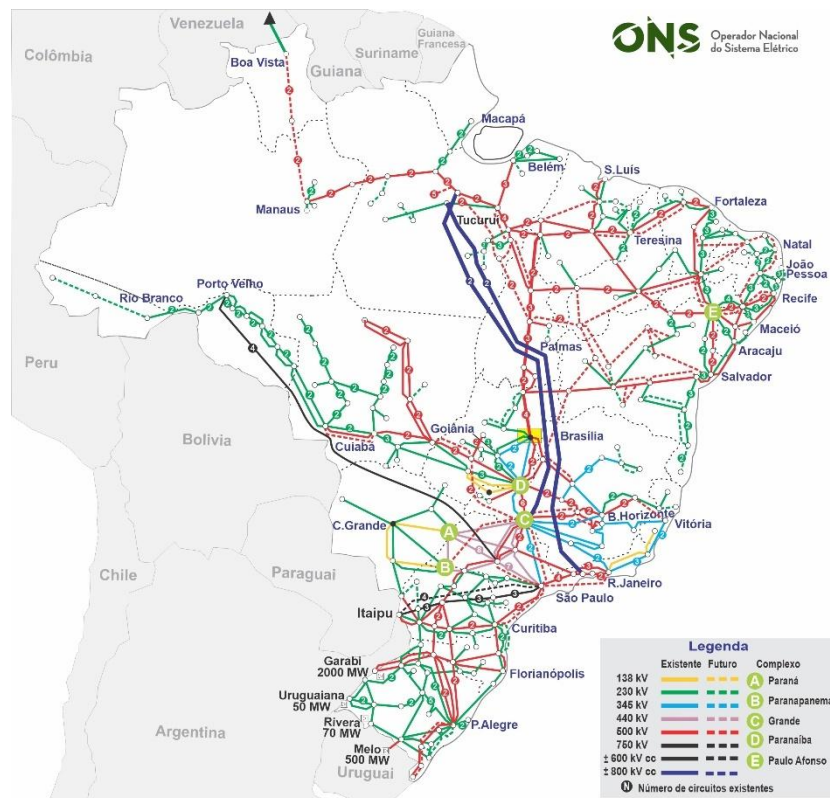
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A rede de transmissão de energia elétrica no Brasil é uma das maiores do mundo, desempenhando um papel importante na interligação de usinas geradoras com centros consumidores em um território extenso e diversificado. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui uma matriz energética predominantemente renovável, com cerca de 60% da eletricidade produzida a partir de hidrelétricas localizadas em áreas distantes dos principais centros de consumo. Essa realidade exige uma rede de transmissão ampla, capaz de atender a demandas crescentes e a desafios logísticos significativos.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2023, a rede brasileira de transmissão de energia elétrica, ilustrada na Figura 1, conta com mais de 170 mil quilômetros de linhas instaladas.

Figura 1 - Rede brasileira de transmissão de energia



Fonte: ONS (acesso em: 14 nov. 2024)

A demanda por eletricidade acompanha o crescimento econômico e a urbanização do Brasil. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em conjunto com o Ministério de Minas e Energia (MME), o país deverá incorporar cerca de 40 mil quilômetros de novas linhas até o final da década, totalizando mais de 200 mil quilômetros de extensão de linhas de transmissão em operação. Esses investimentos visam não apenas ampliar a capacidade do sistema, mas também substituir e modernizar equipamentos antigos para melhorar a confiabilidade e reduzir a vulnerabilidade da rede a eventos climáticos extremos.

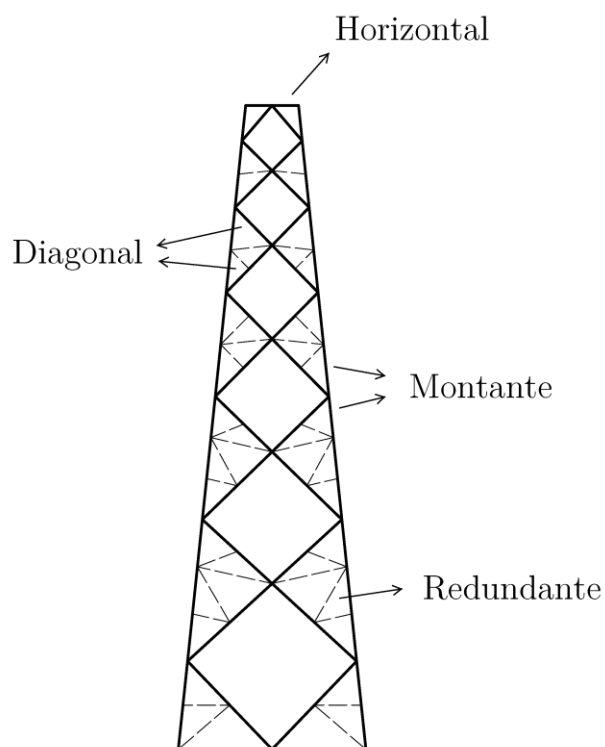
1.2 TORRES DE TRANSMISSÃO

O sistema de transmissão brasileiro é formado predominantemente por linhas aéreas, sustentadas por estruturas metálicas conhecidas como torres de transmissão. Dentre essas, as torres treliçadas compostas por perfis de cantoneiras em aço galvanizado são as mais utilizadas, devido à durabilidade e resistência desse material. Também, elas oferecem vantagens em termos de facilidade de montagem e mobilização, especialmente em áreas de difícil acesso, tornando-as ideais para atender à extensão e às condições geográficas do país.

Os elementos que compõem as torres de transmissão podem ser classificados em principais e redundantes. De acordo com Deichmann (2019), os membros principais são responsáveis por suportar os esforços atuantes na estrutura, sendo subdivididos conforme sua posição em montantes, diagonais e horizontais. Dentre esses, os montantes destacam-se como os mais críticos, uma vez que absorvem os maiores esforços.

Por outro lado, as barras redundantes têm a função de fornecer pontos de contraventamento intermediários às barras principais, reduzindo seus comprimentos não escorados. Em outras palavras, elas atuam diminuindo os comprimentos de flambagem das barras principais, aumentando a capacidade resistente da estrutura aos esforços de compressão, contribuindo para sua estabilidade global.

Figura 2 - Tipos de barras em uma torre de linha de transmissão



Fonte: Deichmann (2019)

Na prática industrial, os projetos estruturais de torres de transmissão são comumente realizados por meio de *software* de elementos finitos, que permite a obtenção dos esforços internos das estruturas e sua posterior comparação com os valores de resistência à tração e compressão determinados por normas técnicas. Diversos programas, como SAP2000 (CSI, 2024) e ANSYS (ANSYS INC., 2024), podem ser utilizados para essa finalidade. Contudo, devido à geometria tridimensional e ao formato tronco-piramidal das torres, a determinação das coordenadas estruturais pode ser complexa. Por esse motivo, programas especializados no projeto de torres, como o TOWER (POWER LINE SYSTEMS, 2023), são frequentemente preferidos, já que aproveitam a simetria dessas estruturas para facilitar o pré-processamento e a modelagem.

Na prática brasileira, é comum que os membros redundantes não sejam incluídos nos modelos estruturais de torres. Isso ocorre porque, em análises lineares, os esforços internos nesses elementos costumam ser muito baixos. No entanto, o TOWER possibilita a inclusão dos membros redundantes no modelo, o que viabiliza a verificação automatizada e o dimensionamento com base nos esforços reais de compressão atuantes nesses elementos. Além disso, a inclusão

de todos os elementos estruturais permite ao *software* calcular com precisão o peso próprio total da torre e a área total exposta ao vento. Em contrapartida, a inclusão dessas barras resulta em um modelo significativamente mais complexo, com um número maior de nós, o que requer um maior tempo de modelagem e uma maior capacidade computacional para realizar as análises de forma eficiente.

Diante disso, torna-se interessante verificar uma estrutura analisando as diferenças desses métodos e como a inclusão dessas barras no modelo influencia as características estruturais das torres, especialmente em relação à distribuição de esforços e à verificação dos membros principais e redundantes.

1.3 OBJETIVO GERAL

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar a verificação estrutural de uma torre de suspensão de uma linha de transmissão de 230 kV utilizando o *software* comercial TOWER, por meio de dois modelos estruturais, o primeiro considerando apenas os membros principais e o segundo incluindo também os membros redundantes.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Realizar análises linear e não linear geométrica para ambos os modelos.
- ii. Verificar as barras principais pelos critérios de projeto estabelecidos pela norma ASCE 10-15 - *Design of Latticed Steel Transmission Structures* (ASCE, 2015) para ambos os modelos.
- iii. Verificar as barras redundantes tanto pelo procedimento convencional adotado na prática brasileira quanto com base nos esforços reais atuantes nos membros obtidos pelo *software*.
- iv. Comparar a distribuição dos esforços nas barras principais entre os dois modelos.
- v. Avaliar a viabilidade da utilização de barras redundantes considerando o tempo necessário para sua modelagem e o impacto efetivo dessas barras na estabilidade global da torre.

1.5 METODOLOGIA

Inicialmente, definiu-se a silhueta da torre e a árvore de carregamentos com base em dados de torres de linhas de transmissão construídas no estado de Santa Catarina. Posteriormente, os dois modelos estruturais foram desenvolvidos no TOWER. Após a modelagem, realizaram-se análises linear e não linear geométrica, seguidas da verificação das barras principais de acordo com os critérios de projeto estabelecidos pela norma ASCE 10-15, enquanto as barras redundantes foram avaliadas tanto pelo procedimento convencional da prática brasileira quanto pelos esforços reais atuantes nesses membros obtidos pelo *software*.

Para o primeiro modelo, em que as barras redundantes não foram inseridas no programa, suas verificações foram realizadas manualmente com o auxílio de planilhas eletrônicas. Já no segundo modelo, todas as verificações foram executadas diretamente no *software*, possibilitando uma análise automatizada e integrada.

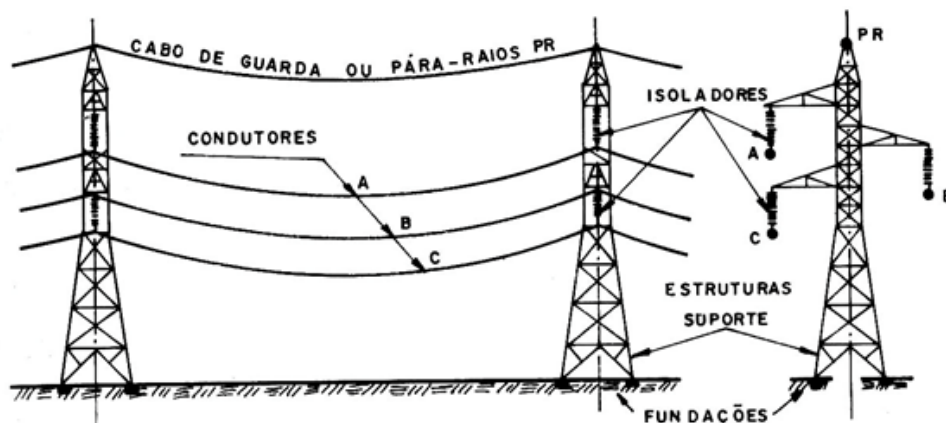
Com base nos resultados obtidos, foi verificado se os critérios de projeto foram devidamente atendidos e realizada uma comparação dos esforços atuantes nas barras principais entre os dois modelos. Por fim, avaliou-se a justificativa para a inclusão das barras redundantes, considerando o tempo adicional demandado para sua modelagem em relação ao impacto observado nos esforços estruturais e na segurança global da torre.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ELEMENTOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

O desempenho elétrico das linhas de transmissão está diretamente ligado às suas características físicas e à topologia do sistema interligado. De acordo com Labegolini et al. (1992), uma linha de transmissão é composta por cabos condutores, isoladores, estruturas de suporte, cabos para-raios, fundações e sistemas de aterramento, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Principais elementos das linhas de transmissão



Fonte: Labegolini et al. (1992)

2.1.1 Cabos condutores e para-raios

Os condutores têm a função de conduzir a energia elétrica das usinas geradoras até os centros de distribuição. Já os cabos para-raios, também chamados de cabos de guarda, protegem contra descargas atmosféricas, minimizando interferências eletromagnéticas e garantindo a estabilidade do sistema de transmissão.

2.1.2 Isoladores

Os isoladores têm função de conectar os cabos condutores aos suportes, garantindo o isolamento elétrico entre a estrutura e os condutores.

2.1.3 Estruturas suportes

As estruturas de suporte das linhas de transmissão são responsáveis por sustentar os cabos condutores e demais componentes do sistema, respeitando as distâncias de segurança entre si e em relação ao solo, o desempenho e o custo (VELOZO, 2010). Podem ser construídas de madeira, concreto, metal ou combinações desses materiais, com as estruturas em aço sendo as mais versáteis devido à sua capacidade de adaptação em diferentes geometrias.

2.1.4 Fundações

As fundações garantem a estabilidade e a segurança das torres, absorvendo e transmitindo ao solo as tensões geradas por todo o sistema, tanto as provenientes de ações externas, como vento, quanto as do peso próprio dos elementos.

2.1.5 Aterramento

O sistema de aterramento de uma linha de transmissão é composto pela interligação com a malha de terra das subestações, para-raios das linhas, cabos para-raios e pelo aterramento das fundações, que podem ser formados por hastes e/ou cabos enterrados no solo, conhecidos como contrapesos (BERARDO, 2012).

2.2 TIPOS DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

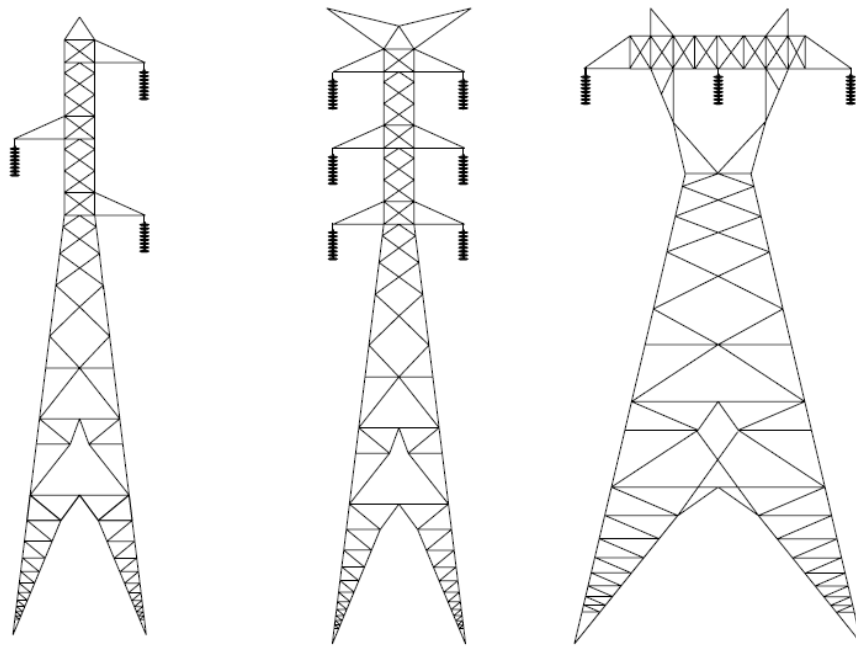
Neste trabalho, será dada ênfase às torres metálicas treliçadas. Conforme Gontijo (1994), as estruturas metálicas para linhas de transmissão podem ser classificadas da seguinte forma:

2.2.1 Quanto à disposição dos condutores

Conforme ilustrado na Figura 4, os condutores podem ser dispostos das seguintes maneiras:

- a) triangular: os condutores são dispostos nos vértices de um triângulo, utilizado em diferentes níveis de tensão e em circuitos simples ou duplos.
- b) vertical: os condutores estão alinhados em um plano vertical, normalmente utilizados em circuitos duplos de ambos os lados da torre.
- c) horizontal: os condutores de um mesmo circuito estão alinhados em um plano horizontal. Comum em circuitos simples que acomodam até três condutores.

Figura 4 - Tipos de torres quanto à disposição dos condutores



Fonte: Brametal (2020)

2.2.2 Quanto ao número de circuitos

As torres podem ser de circuito simples, ou seja, acomodam um único circuito de transmissão, ou de circuito duplo, acomodando dois circuitos.

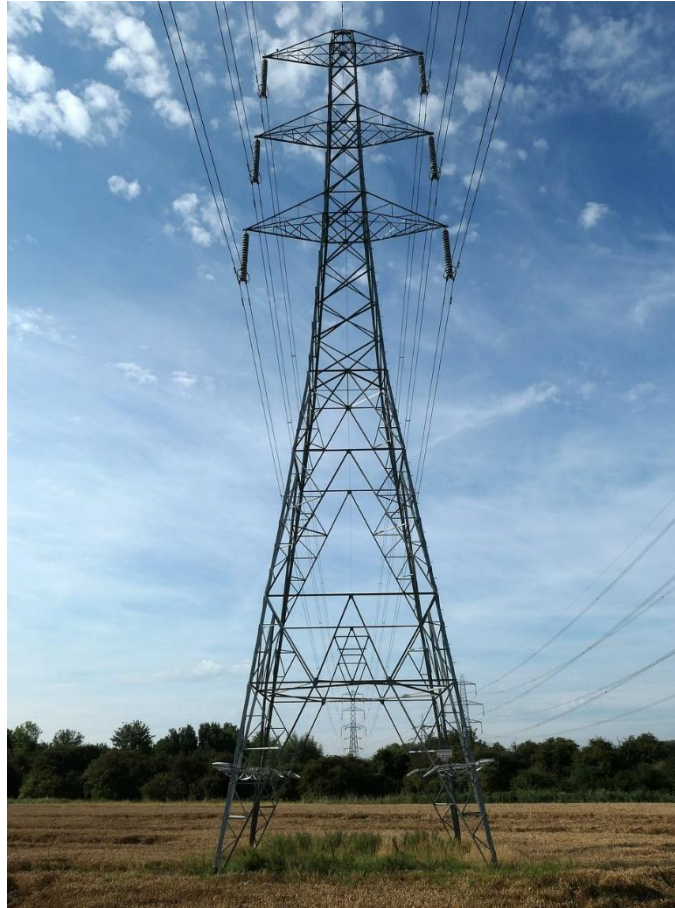
2.2.3 Quanto à função na linha

2.2.3.1 Estrutura de Suspensão

São torres utilizadas em alinhamento ou com pequenos ângulos, geralmente constituindo a maioria dos suportes em uma linha de transmissão. Elas são projetadas

para suportar o peso dos cabos, isoladores, ferragens, acessórios, o próprio peso e as cargas de vento sobre a estrutura e os elementos suspensos.

Figura 5 - Estrutura de suspensão



Fonte: Pixabay (acesso em: 29 nov. 2024)

2.2.3.2 *Estrutura de Ancoragem*

Pode ser classificada como terminal, quando localizada no início e no fim das linhas, ou como intermediária quando utilizada ao longo da linha de transmissão. Devido ao carregamento unilateral dos elementos suspensos e as cargas de vento, essas estruturas são mais solicitadas e, portanto, mais reforçadas.

2.2.3.3 *Estrutura em Ângulo*

É instalada em pontos de mudança de direção das linhas de transmissão, e lida com as forças resultantes das trações nos condutores que atuam unilateralmente.

Figura 6 - Estrutura em ângulo



Fonte: Pixabay (acesso em: 29 nov. 2024)

2.2.3.4 *Estrutura de Transposição*

Utilizada para realizar a transposição das fases, garantindo o equilíbrio eletromagnético das linhas.

2.2.3.5 *Estrutura de Derivação*

Aplicada onde há necessidade de ramificar a linha principal para alimentar um ramal específico.

2.2.4 **Quanto à forma de resistência das estruturas**

As torres autoportantes são aquelas que transmitem todos os esforços diretamente ao solo por meio de suas fundações. Em contraste, as torres estaiadas utilizam tirantes conectados à estrutura superior e ao solo, com o mastro central suportado por uma fundação. Esse modelo, ao empregar tirantes para absorver parte das cargas, possibilita uma construção mais leve e econômica.

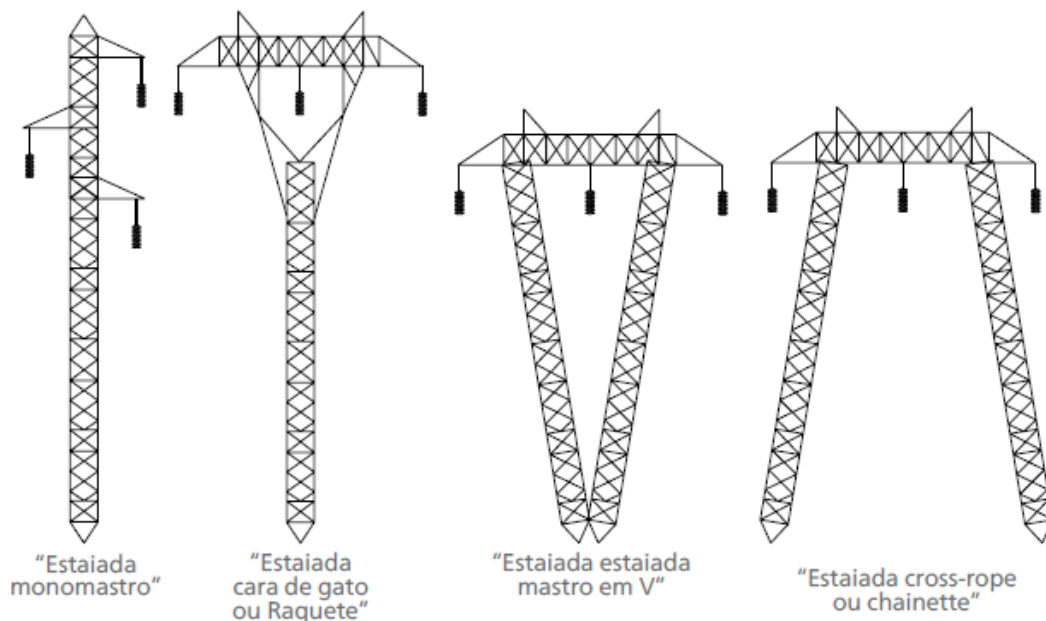
2.2.5 Quanto à voltagem da linha

No Brasil, as tensões mais comuns em linhas de transmissão incluem 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 460 kV, 500 kV e 765 kV. A escolha da tensão depende da distância de transmissão e da quantidade de energia a ser transportada, influenciando diretamente o design das torres e a seleção dos componentes estruturais.

2.2.6 Quanto ao formato

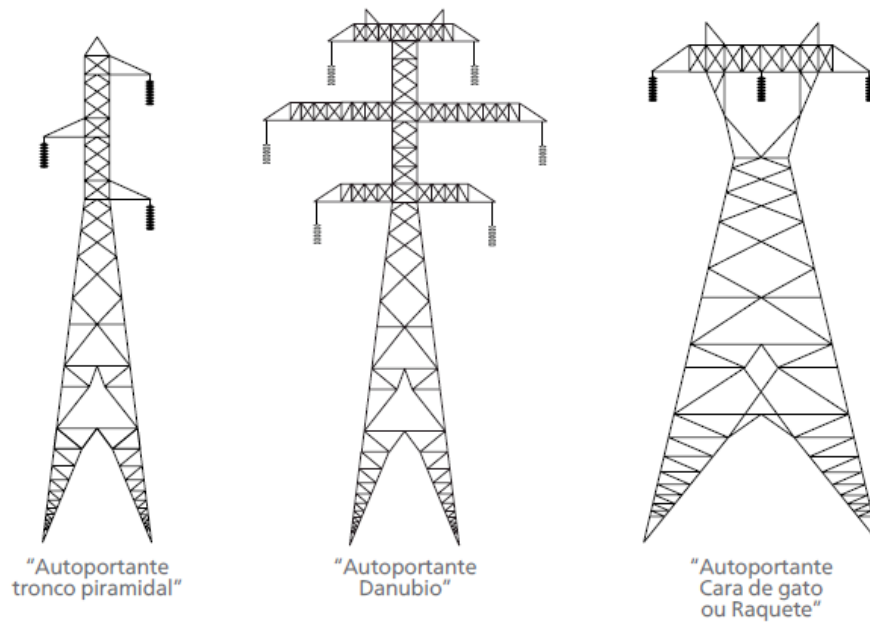
As torres treliçadas metálicas apresentam grande versatilidade em termos de geometria, adaptando-se às necessidades específicas de cada projeto. Os formatos mais comuns incluem formas triangulares, quadradas e outras geometrias personalizadas que atendem às exigências estruturais e estéticas. Algumas das geometrias mais empregadas são ilustradas na Figura 6 e 7.

Figura 7 - Formatos de torres estaiadas e seus nomes populares



Fonte: Brametal (2020)

Figura 8 - Formatos de torres autoportantes e seus nomes populares



Fonte: Brametal (2020)

2.3 AÇÕES EM ESTRUTURAS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

2.3.1 Ações devido ao peso próprio

As ações permanentes são aquelas que atuam constantemente na torre durante toda sua vida útil e praticamente não variam. Essas ações incluem o peso próprio da torre e dos componentes que ela suporta, como os cabos condutores, cabos para-raios, isoladores, ferragens e outros acessórios.

Para a determinação peso do cabo que atua sobre uma torre pode ser utilizado a seguinte expressão, conforme sugerida por Gontijo (1994):

$$F_V = (P_c n_{cf} L_{gr} + P_{cf}) \quad (2.1)$$

Onde:

F_V é a força vertical aplicada no ponto de fixação do cabo;

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

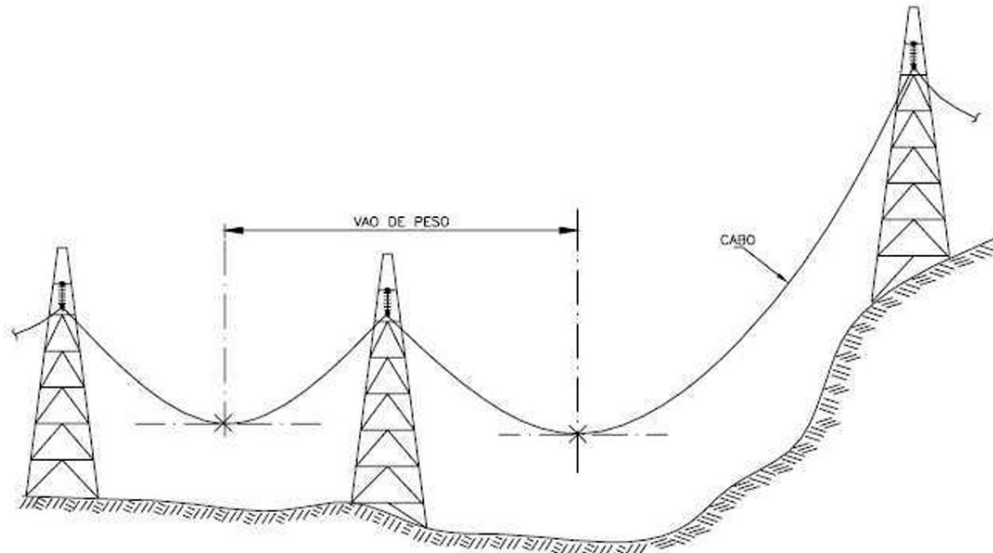
n_{cf} é o número de cabos por fase;

L_{gr} é o vão gravante ou vão de peso da estrutura;

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

Segundo Chaves (2004), o peso do cabo que atua sobre uma torre é definido pelo vão gravante, ou vão de peso. Esse vão é a distância horizontal entre os pontos onde a tangente da curva catenária dos cabos nos vãos adjacentes à torre é horizontal, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Vão de peso



Fonte: Chaves (2004)

O peso próprio da torre pode ser determinado através da soma do peso de cada barra que a compõe. O peso de cada elemento é determinado pela multiplicação de seu comprimento, área da seção transversal, massa específica do material e aceleração da gravidade. Essa relação pode ser expressa pela fórmula:

$$P_t = \left(\sum_{j=1}^m \rho_j l_j a_j \right) \cdot g \quad (2.2)$$

Onde:

P_t é o peso total da torre;

m é o número de barras;

ρ_j é a massa específica do material;

l_j é o comprimento de cada barra;

g_a é a aceleração da gravidade.

2.3.2 Ações devido ao vento

A ação do vento é uma das principais influências sobre as torres de transmissão, representando aproximadamente 80% dos esforços em torres de suspensão (KAMINSKI, 2007). O vento atua tanto sobre a estrutura metálica quanto sobre os cabos condutores e as cadeias de isoladores. A intensidade dessa ação depende de fatores, como a velocidade e a direção do vento na região onde a linha está instalada.

As diretrizes para o cálculo das forças devido ao vento podem ser encontradas na norma internacional IEC 60826 (2017) - *Design criteria of overhead transmission lines*. Esta norma especifica os requisitos de carregamento e resistência para linhas aéreas baseados em princípios de projeto fundamentados na confiabilidade.

2.3.2.1 Pressão dinâmica de referência

Segundo a IEC 60826 (2017), a pressão dinâmica de referência pode ser determinada com base na velocidade básica do vento e no fator de rugosidade do terreno. A equação utilizada é:

$$q_0 = \frac{1}{2} \tau \mu \cdot (K_R V_{RB})^2 \quad (2.3)$$

Onde:

q_0 é a pressão dinâmica de referência, em N/m²;

τ é o fator de correção da densidade, considerando variações de temperatura e pressão em relação às condições padrão (15°C e 101,3 kPa);

μ é a densidade do ar (1,225 kg/m³ nas condições padrão);

K_R é o fator de rugosidade do terreno;

V_{RB} é a velocidade básica do vento de referência, em m/s.

Tabela 1 - Classificação das categorias de terreno

Categoria de terreno	Características de rugosidade	KR
A	Grandes extensões de água na direção do vento, áreas costeiras planas	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos, como aeroportos ou campos cultivados com poucas árvores ou construções	1,00
C	Terreno com numerosos pequenos obstáculos de baixa altura (cercas, árvores e construções)	0,85
D	Áreas suburbanas ou terrenos com muitas árvores altas	0,67

Fonte: IEC 60826 (2017)

Tabela 2 - Fator de correção τ da pressão dinâmica de vento de referência q_0 devido à altitude e temperaturas

Temperatura	Altitude			
	0	1000	2000	3000
30	0,95	0,84	0,75	0,66
15	1	0,89	0,79	0,69
0	1,04	0,94	0,83	0,73
-15	1,12	0,99	0,88	0,77
-30	1,19	1,05	0,93	0,82

*O valor de referência corresponde a 0 m de altitude e 15 °C de temperatura.

Fonte: IEC 60826 (2017)

A velocidade de referência V_{RB} é definida como a velocidade do vento (m/s) correspondente a um período de retorno T . Ela pode ser determinada a partir de uma análise estatística dos dados relevantes de velocidade do vento a 10 m acima do solo e com um período de integração de 10 minutos, geralmente considerando terrenos classificados como categoria B.

2.3.2.2 Ação do vento na estrutura

Para calcular o esforço devido ao vento atuante em uma torre de transmissão, a norma IEC 60826 (2017) estabelece uma metodologia detalhada, levando em consideração fatores, como a direção de incidência do vento, o carregamento aplicado e a geometria da torre. O cálculo da força gerada pelo vento deve ser feito considerando o carregamento aplicado no centro de gravidade dos painéis de vento,

que são definidos nas faces longitudinal e transversal da torre. A força resultante é expressa pela fórmula:

$$A_t = q_0 \cdot (1 + 0,2 \operatorname{sen}^2 2\theta) \cdot (S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \theta) + (S_{t2} C_{xt2} \operatorname{sen}^2 \theta) \cdot G_t \quad (2.4)$$

Nesta equação:

A_t é o esforço devido ao vento, em N;

q_0 é a pressão dinâmica do vento de referência, em N/m²;

θ é o ângulo da direção de incidência do vento em relação à face transversal da torre;

S_{t1} e S_{t2} são as áreas totais projetadas nas faces longitudinal e transversal, respectivamente, em m²;

C_{xt1} e C_{xt2} são os coeficientes de arrasto correspondentes às faces;

χ é a taxa de solidez do painel;

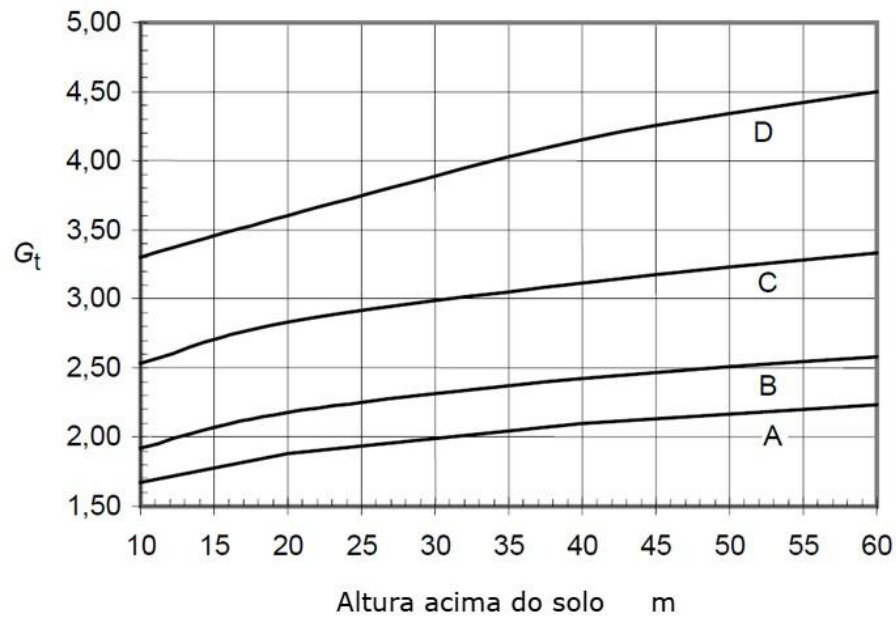
G_t é o fator combinado de vento.

Figura 10 - Coeficientes de arrasto para suportes treliçados compostos por membros de faces planas



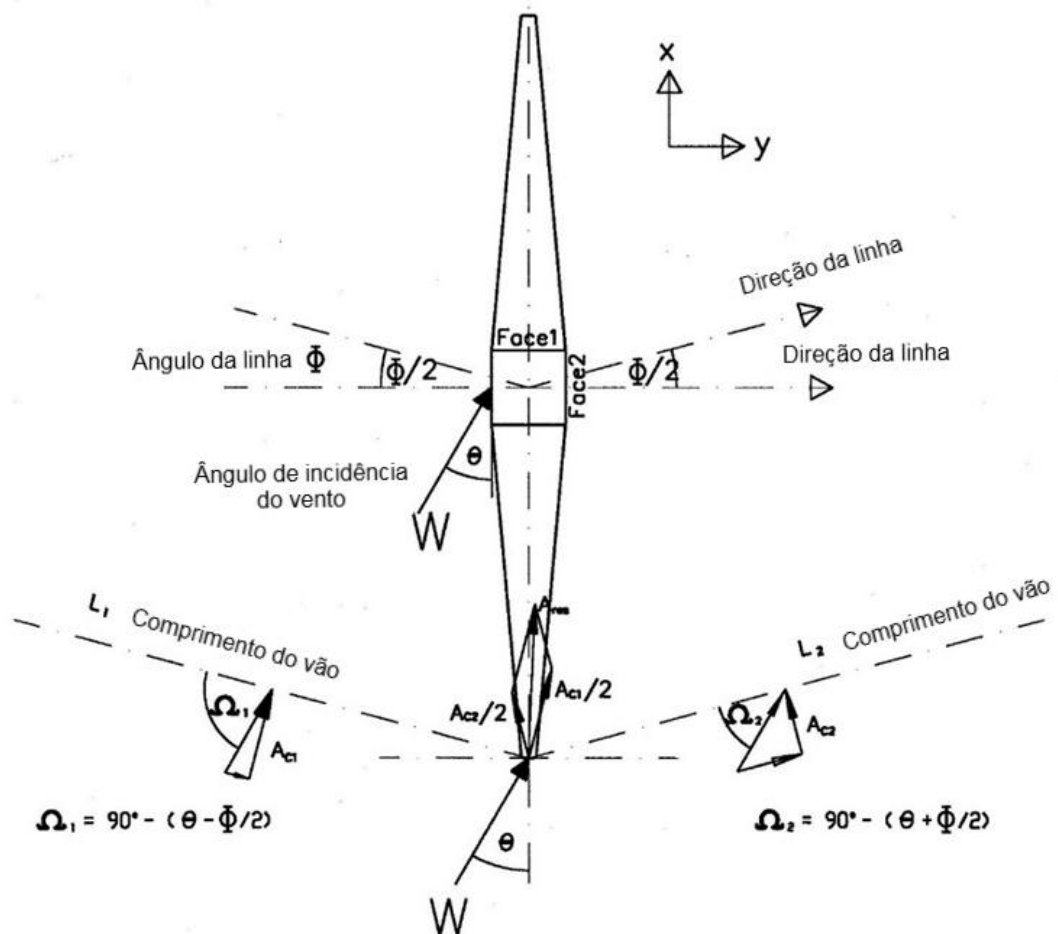
Fonte: IEC 60826 (2017)

Figura 11 - Fator combinado de vento aplicável a suportes e cadeias de isoladores



Fonte: IEC 60826 (2017)

Figura 12 - Definição do ângulo de incidência do vento



Fonte: IEC 60826 (2017)

2.3.2.3 Ação do vento nos cabos

Quanto ao esforço do vento nos cabos, a norma IEC 60826 (2017) estabelece que a intensidade desse carregamento está diretamente associada aos vãos horizontais adjacentes à torre e ao ângulo de incidência do vento sobre o cabo. Esse valor pode ser calculado da seguinte forma:

$$A_c = q_0 C_{xc} G_c G_L d L \sin^2 \Omega \quad (2.5)$$

Onde:

A_c é o esforço atuante no cabo, em N;

C_{xc} é o coeficiente de arrasto do cabo;

G_c é o fator combinado de vento;

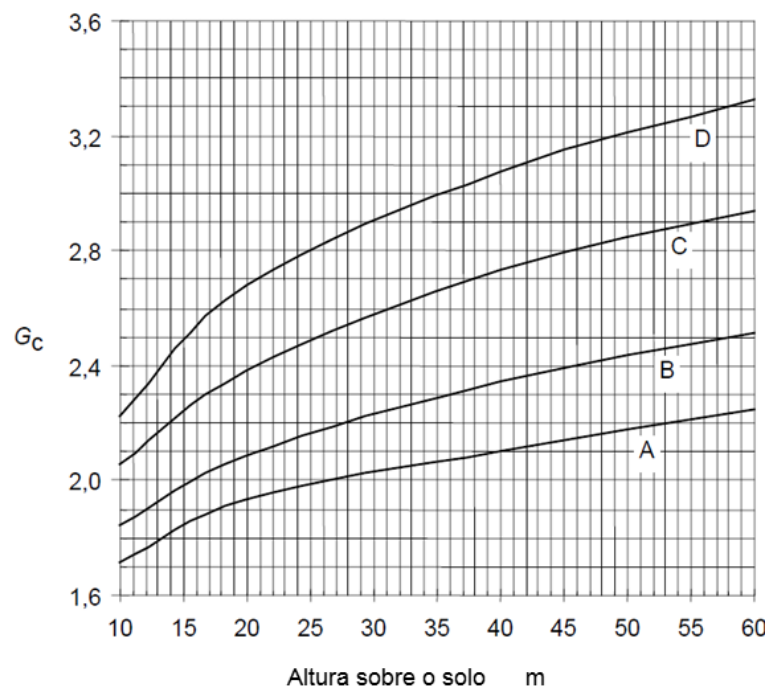
G_L é o fator de vão;

d é o diâmetro do condutor, em m;

L é vão horizontal da torre analisada;

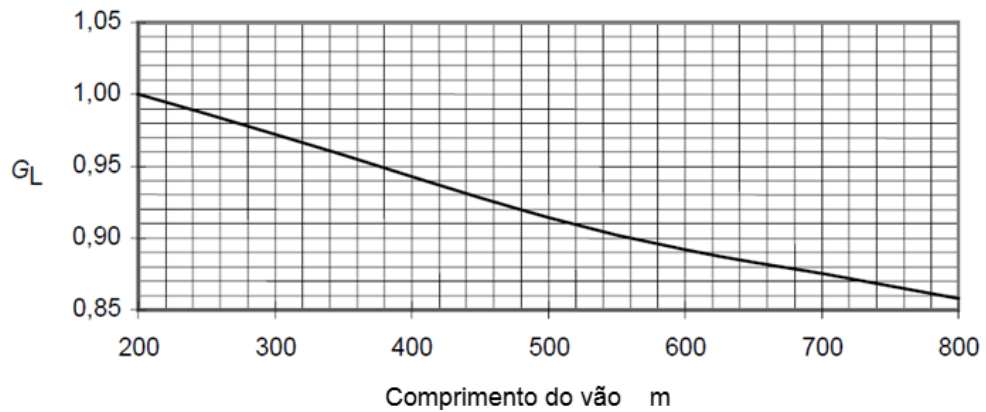
Ω é o ângulo entre a direção da linha e a direção do vento.

Figura 13 - Fator combinado de vento para condutores para diversas categorias de terrenos e alturas acima do solo



Fonte: IEC 60826 (2017)

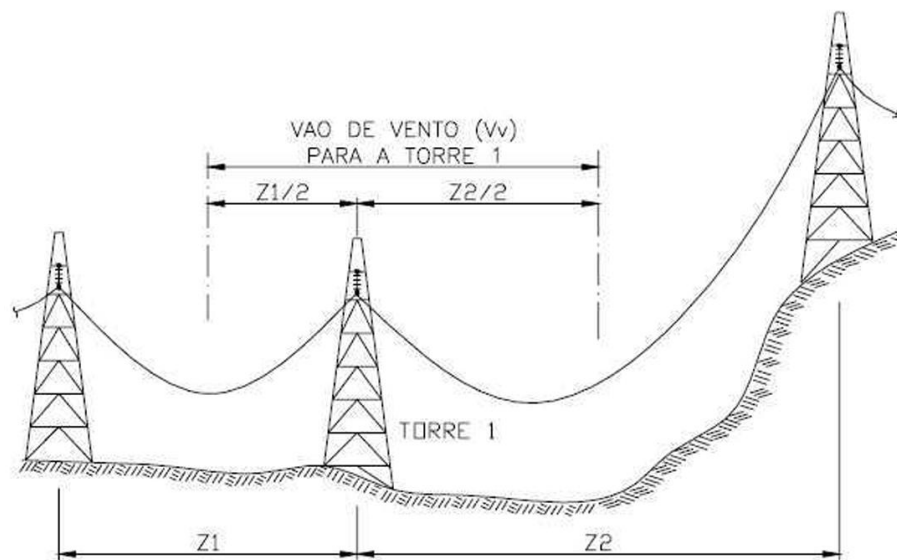
Figura 14 - Fator de vão



Fonte: IEC 60826 (2017)

Segundo Chaves (2004), para a ação do vento sobre os cabos que atuam em uma torre, o vão de vento é definido como a média aritmética dos vãos adjacentes à torre em questão, como ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Vão de vento



Fonte: Chaves (2004)

2.4 VERIFICAÇÕES DE PROJETO

As verificações de projeto das barras principais seguiram os critérios estabelecidos pela norma internacional ASCE 10-15 *Design of Latticed Steel*

Transmission Structures. Para as barras redundantes, as verificações seguem os critérios usualmente adotados na prática brasileira.

2.4.1 Barras comprimidas

2.4.1.1 Verificação à compressão

O esforço solicitante de cálculo S_{dc} em uma barra deve ser menor ou igual à resistência de cálculo R_{dc} da mesma. Isso pode ser expresso pela relação:

$$S_{dc} \leq R_{dc} = \Phi_R \cdot F_c \cdot A_g \quad (2.6)$$

Onde:

Φ_R é o fator de minoração da resistência limite, igual a 0,9;

F_c é a tensão limite de compressão;

A_g é a área bruta da seção transversal do perfil;

2.4.1.2 Tensão limite de compressão

A tensão limite de compressão F_c , que atua em barras submetidas a um carregamento axial de compressão, é calculada utilizando as seguintes equações:

$$F_c = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{kL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_{cr} \quad \text{Se } kL/r \leq C_c \quad (2.7)$$

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad \text{Se } kL/r > C_c \quad (2.8)$$

Onde:

$$C_c = \pi \sqrt{(2E/F_y)}$$

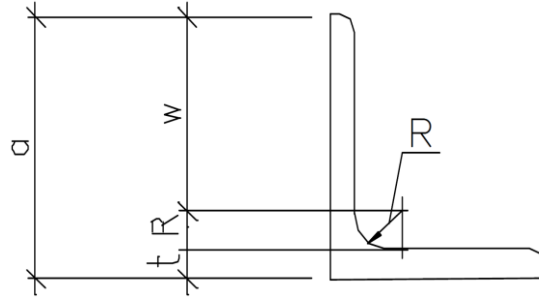
F_y é a tensão limite de escoamento do aço;

E é o módulo de elasticidade longitudinal do aço;

kL/r é a esbeltez efetiva.

A tensão F_{cr} depende da compactidade w/t das cantoneiras, que é um indicador de flambagem local, observar Figura 16.

Figura 16 - Dimensões de cantoneiras



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Onde:

a é largura da aba;

t é a espessura da cantoneira;

R é o raio de laminação;

$$w = (a - t - R)$$

A determinação de F_{cr} é realizada com base em três diferentes situações:

$$F_{cr} = F_y \quad \text{Se } w/t \leq w/t_{lim} \quad (2.9)$$

$$F_{cr} = \left(1,677 - 0,677 \frac{(w/t)}{(w/t)_{lim}}\right) F_y \quad \text{Se } w/t_{lim} < w/t \leq 0,846(E/F_y)^{1/2} \quad (2.10)$$

$$F_{cr} = 0,3276 \cdot \frac{E}{(w/t)^2} \quad \text{Se } w/t > 0,846(E/F_y)^{1/2} \quad (2.11)$$

Onde:

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

2.4.1.3 Esbeltez efetiva

A norma da ASCE apresenta seis diferentes curvas de flambagem para a verificação de barras submetidas à compressão. O cálculo da esbeltez efetiva deve levar em consideração tanto as condições de aplicação das cargas (seja excêntrica ou concêntrica) quanto as condições de ligação das extremidades da barra.

Tabela 3 - Esbeltez efetiva de barras com $L/r \leq 120$

Situação	kL/r	Curva
Cargas concêntricas em ambas as extremidades	$kL/r = L/r$	1
Carga concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra	$kL/r = 30 + 0,75 L/r$	2
Cargas excêntricas em ambas as extremidades	$kL/r = 60 + 0,5 L/r$	3

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 4 - Esbeltez efetiva de barras com $L/r > 120$

Situação	kL/r	Curva
Sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades	$kL/r = L/r$	4
Com restrição parcial à rotação em uma das extremidades	$kL/r = 28,6 + 0,762 L/r$	5
Com restrição parcial à rotação em ambas as extremidades	$kL/r = 46,2 + 0,615 L/r$	6

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

2.4.2 Barras tracionadas

2.4.2.1 Verificação à tração

O esforço solicitante de cálculo S_{dt} em uma barra deve ser menor ou igual à resistência de cálculo R_{dt} da mesma. Isso pode ser expresso pela relação:

$$S_{dt} \leq R_{dt} = \Phi_R \cdot F_y \cdot A_n \quad (2.12)$$

Onde:

Φ_R é o fator de minoração da resistência limite, igual a 0,9;

F_y é a tensão limite de escoamento do aço;

A_n é a área líquida da seção transversal do perfil;

2.4.2.2 Área líquida

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

$$A_n = A_g - n \cdot d_f \cdot t + [\Sigma(s^2/4g)]t \quad (2.13)$$

Onde:

A_g é a área bruta da seção transversal do perfil;

n é a quantidade de furos;

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

d_p é o diâmetro nominal do parafuso;

s são as distâncias entre furos na direção paralela ao esforço;

g são as distâncias entre furos na direção perpendicular ao esforço;

t é a espessura do perfil da barra tracionada.

2.4.3 Barras redundantes

O processo de verificação das barras redundantes é conduzido seguindo três etapas:

- Verificar se a esbeltez não excede o valor de $kL/r \leq 250$.
- Verificar a barra quanto ao esforço de escalada, aplicando uma carga vertical de 981 N, correspondente ao peso majorado de um operário, no centro da projeção horizontal.
- Verificar a barra para um esforço de compressão correspondente a 2,5% da força atuando na barra a ser contraventada.

Na segunda verificação, a carga vertical aplicada sobre a barra gera um momento fletor, cujo valor máximo, $M_{m\acute{a}x}$, ocorre no ponto médio do vão. Esse valor é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{1}{4} \cdot ql_{hor} \quad (2.14)$$

Onde:

q é a carga vertical de 981 N;

l_{hor} é o comprimento da projeção horizontal da barra.

Adicionalmente, a resistência de cálculo à flexão, M_{rd} , deve ser superior ao momento fletor máximo atuante. O valor de M_{rd} é determinado de acordo com a equação apresentada a seguir:

$$M_{rd} = \Phi_R \cdot W \cdot F_y \quad (2.15)$$

Onde:

Φ_R é o fator de minoração da resistência limite, igual a 0,9;

W é o modulo de resistência elástico mínimo da seção transversal da barra em relação ao eixo de flexão.

F_y é a resistência ao escoamento do aço.

3 ESTUDO DE CASO

O projeto de linhas de transmissão é um processo multidisciplinar, integrando áreas como engenharia estrutural, eletromecânica, fundações, entre outras. Na análise estrutural das torres de linhas de transmissão, o engenheiro recebe os dados essenciais, como parâmetros de vento, árvore de carregamento e a silhueta da estrutura, previamente elaborados por outras equipes. Para o desenvolvimento deste estudo, assumiu-se que essas informações foram previamente disponibilizadas. Com isso, foi possível simular um fluxo de trabalho típico, refletindo a prática usual adotadas para projetos desse tipo.

3.1 PARAMETROS BÁSICOS

Para aplicação dos objetivos propostos, foi adotada uma estrutura de suspensão em um trecho com vão básico de 500 metros, pertencente à uma linha de transmissão de 230 kV de circuito duplo localizada em Santa Catarina. A Tabela 5 apresenta os cabos condutores e para-raios selecionados, bem como outros parâmetros para o cálculo dos esforços atuantes na torre, como os vãos médios e gravantes e o ângulo de deflexão da estrutura.

Tabela 5 - Parâmetros básicos da torre

Ângulo de deflexão	0° e 3°
Vão médio (m)	575 (0°) / 475 (3°)
Vão gravante sem vento (m)	172 a 750 (condutor) / 172 a 800 (para-raios)
Vão gravante com vento (m)	52 a 900 (condutor) / 52 a 960 (para-raios)
Cabo para-raios	OPGW Ø15.5mm ou Ø12.4mm (Furukawa)
Cabo condutor	CAL 516.16 kcmil (AI 1120)

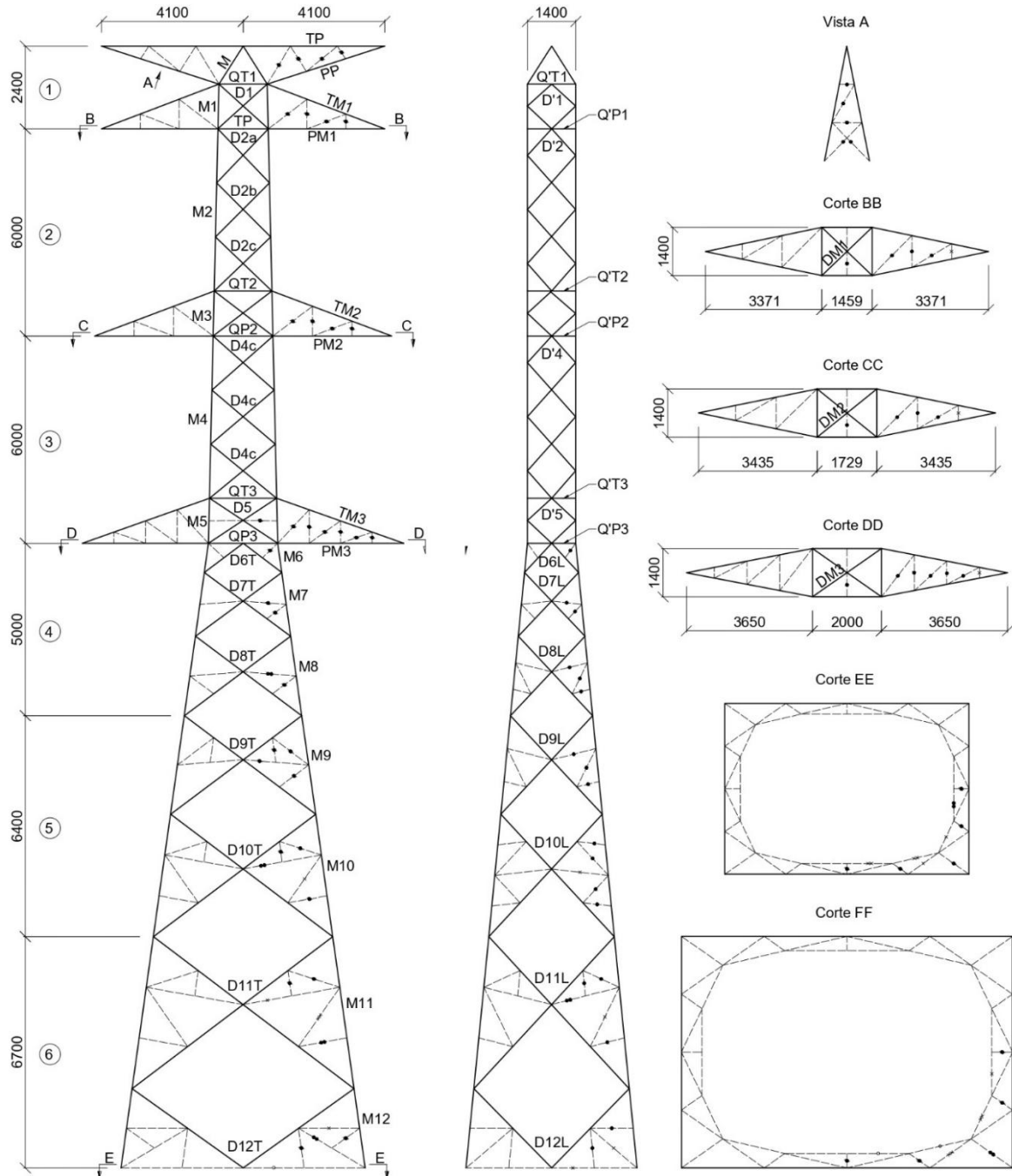
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

3.2 SILHUETA

As Figuras 17 e 18 apresentam a silhueta da torre, desenvolvida com base em estruturas típicas de torres de suspensão de formato tronco piramidal. Nessas representações, destacam-se as barras carregadas, identificadas por traços contínuos e suas respectivas nomenclaturas. Além disso, são indicadas as barras

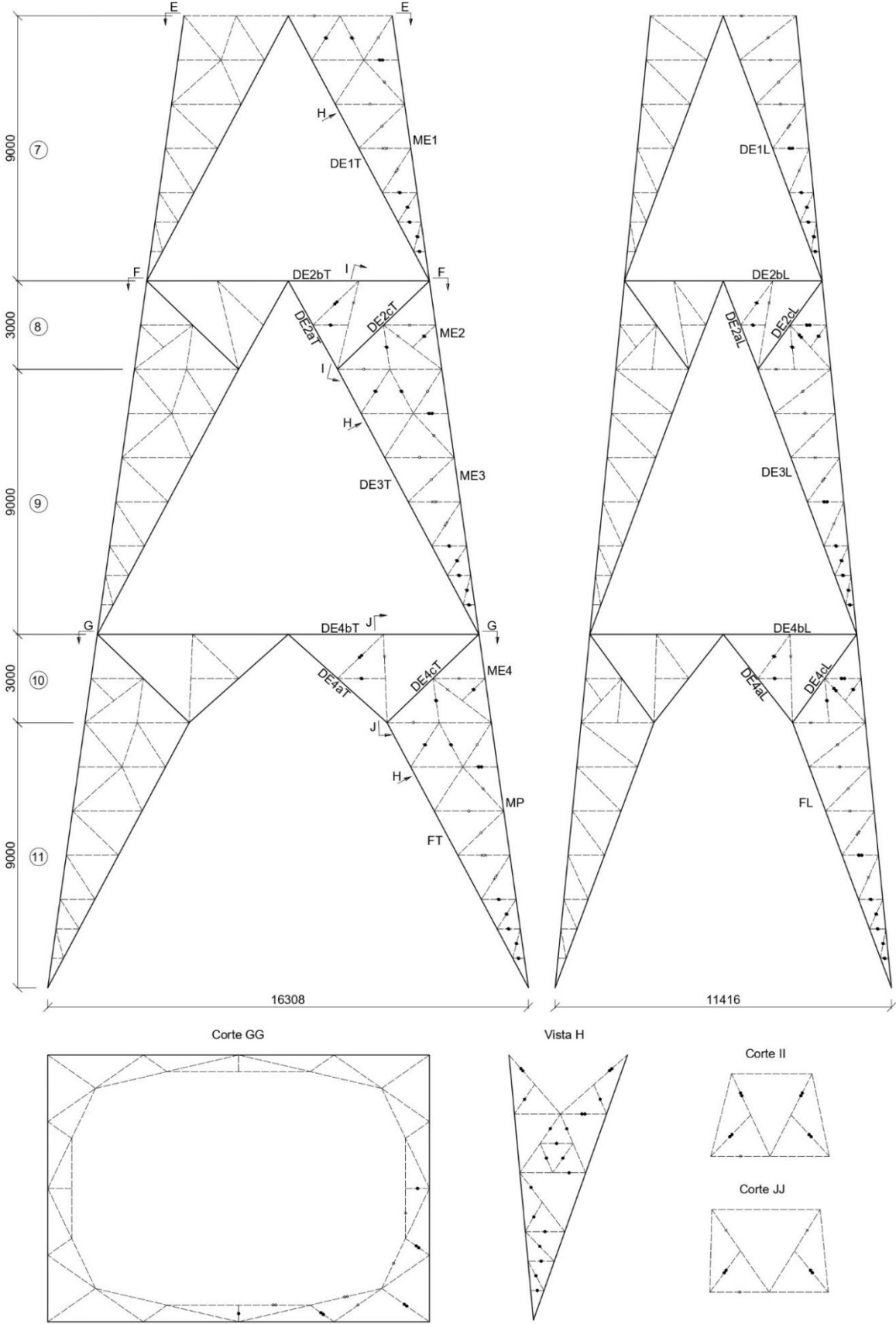
redundantes, representadas por traços interrompidos, bem como os painéis onde as cargas de vento, que atuam diretamente sobre a estrutura, são aplicadas.

Figura 17 - Silhueta (torre básica)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 18 - Silhueta (extensão e pés)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

3.3 MATERIAIS EMPREGADOS

A torre é composta por cantoneiras simples de abas simétricas (SAE) e cantoneiras duplas de abas simétricas (DAE) em aço ASTM A572, graus 50 e 60, além de parafusos ASTM A394 Tipo 0, com diâmetros de 1/2" e 5/8". As propriedades dos componentes e perfis utilizados estão detalhadas nas tabelas abaixo.

Tabela 6 - Propriedades dos tipos aço

Tipo de Aço	E (MPa)	Fy (MPa)	Fu (MPa)
A572-50	205	345	448
A572-60	205	415	520

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 7 - Propriedades dos perfis

Tipo	Dimensões (mm)	Peso (N/m)	Área bruta (cm ²)	w/t	Rx (cm)	Ry (cm)	Rz (cm)
SAE	40x40x3	18,50	2,35	10,33	1,21	1,21	0,78
SAE	45x45x4	26,88	3,49	8,50	1,36	1,36	0,87
SAE	45x45x3	20,50	2,66	11,67	1,36	1,36	0,88
SAE	50x50x4	30,19	3,89	9,75	1,52	1,52	0,98
SAE	50x50x3	22,86	2,96	13,33	1,52	1,52	0,99
SAE	60x60x4	36,30	4,71	12,00	1,83	1,83	1,18
SAE	65x65x5	48,56	6,31	10,20	1,98	1,98	1,28
SAE	65x65x4	39,44	5,13	13,00	1,98	1,98	1,28
SAE	75x75x7	77,89	10,10	8,29	2,28	2,28	1,46
SAE	75x75x6	67,39	8,75	9,83	2,28	2,28	1,47
SAE	75x75x5	56,70	7,36	12,00	2,29	2,29	1,48
SAE	90x90x7	93,98	12,20	10,28	2,75	2,75	1,77
SAE	100x100x10	147,15	19,20	7,80	3,04	3,04	1,95
SAE	100x100x8	119,68	15,50	10,00	3,06	3,06	1,96
SAE	100x100x7	104,97	13,70	11,57	3,06	3,06	1,97
SAE	100x100x6	90,56	11,70	13,67	3,07	3,07	1,97
SAE	127x127x9,5	179,52	23,29	11,00	3,96	3,96	2,51
DAE	40x40x3	37,01	4,70	10,33	1,21	1,62	1,21
DAE	60x60x5	89,66	11,64	9,40	1,82	2,45	1,82
DAE	60x60x4	72,59	9,42	12,00	1,83	2,43	1,83
DAE	65x65x5	97,12	12,62	10,20	1,98	2,65	1,98

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 8 - Propriedades dos parafusos

Parafuso	dp (cm)	df (cm)	Fv (kN)
1/2" ASTM A394 Tipo 0	1,27	1,57	33,02
5/8" ASTM A394 Tipo 0	1,59	1,89	51,60

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

3.4 AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA

A carga de vento máximo atuante em cada painel da estrutura foi determinada automaticamente pelo software, de acordo com o prescrito na norma IEC 60826, e distribuídas aos nós inferior e superior de cada seção.

A pressão dinâmica do vento para a região onde está localizada a linha de transmissão foi estabelecida em 62,6 kgf/m², considerando a velocidade de referência do vento de 33,33 m/s para um tempo de integração de 10 minutos, com período de retorno de 150 anos, e terreno classificado como categoria B.

É importante destacar que, a IEC 60826 apresenta uma abordagem distinta da norma brasileira NBR 6123:2023 no que diz respeito à caracterização das velocidades do vento. Enquanto a NBR 6123:2023 utiliza a velocidade básica do vento, definida como a velocidade máxima de rajada com duração de 3 segundos, a IEC 60826 adota a velocidade média com integração de 10 minutos. Além disso, a NBR 6123:2023 especifica períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, de acordo com a categoria da estrutura, enquanto a IEC 60826 sugere períodos de retorno mais elevados, como 150 ou 500 anos, alinhados com os requisitos de maior confiabilidade para as linhas de transmissão de energia.

Outro aspecto relevante na IEC 60826 é a utilização do fator combinado de vento G_t , que introduz uma correção nas cargas de vento atuantes na estrutura. Esse fator leva em consideração os efeitos dinâmicos da interação entre o vento e a torre, a variação da velocidade do vento com a altura e as condições de rugosidade do terreno.

3.5 HIPOTÉSES DE CARREGAMENTO

Neste estudo, as cargas foram definidas considerando o peso próprio dos elementos, a tração nos cabos, e o ângulo de incidência do vento sobre a estrutura, cabos e cadeias de isoladores.

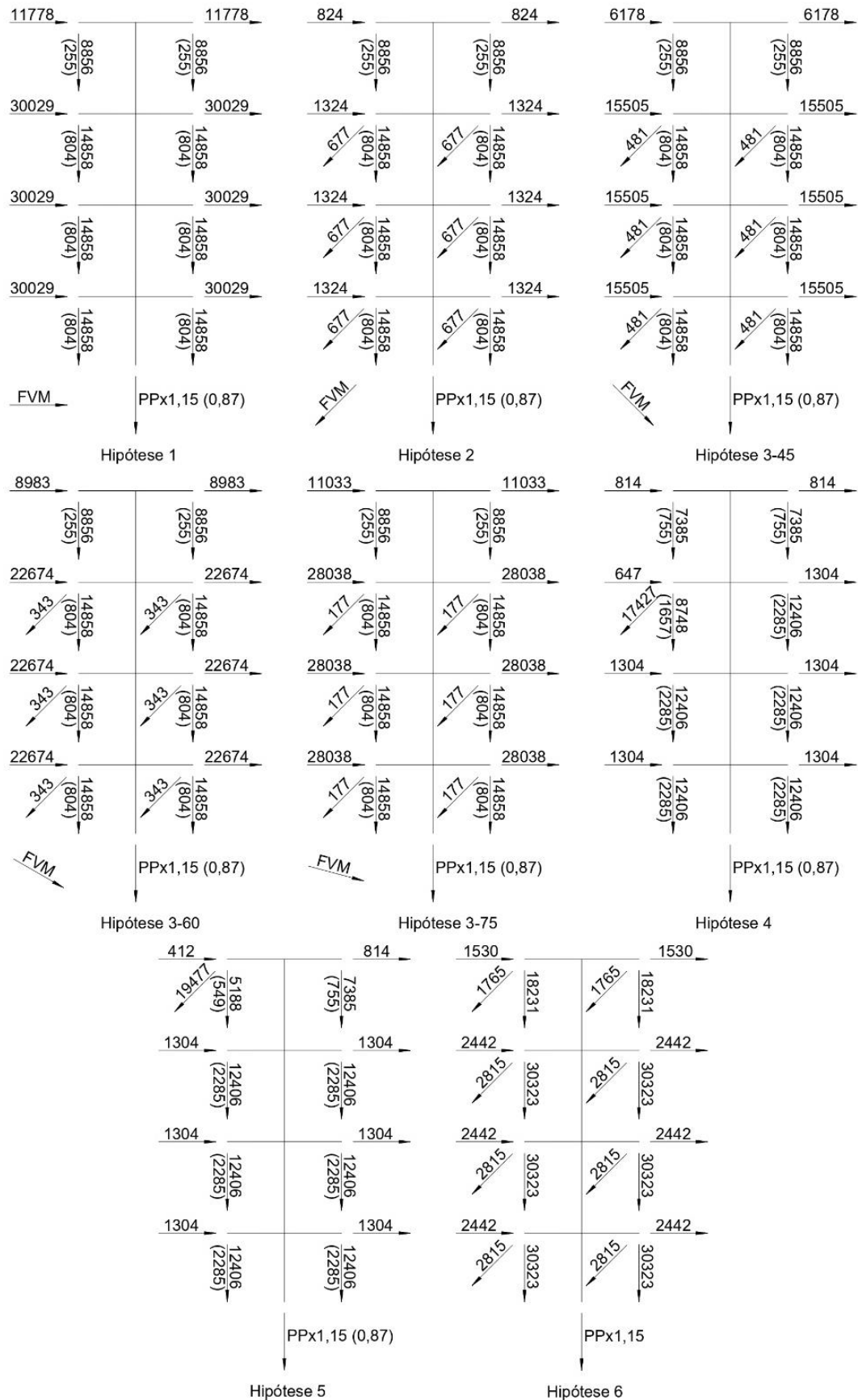
Na análise estrutural, foram consideradas oito hipóteses de carregamento, descritas a seguir:

- a) Hipótese 1 – Cabos intactos, com vento transversal máximo (90°);
- b) Hipótese 2 – Cabos intactos, com vento longitudinal máximo (0°);
- c) Hipótese 3-45 – Cabos intactos, com vento máximo a 45° ;
- d) Hipótese 3-60 – Cabos intactos, com vento máximo a 60° ;
- e) Hipótese 3-75 – Cabos intactos, com vento máximo a 75° ;
- f) Hipótese 4 – Ruptura de uma fase, sem vento;
- g) Hipótese 5 – Ruptura de um para-raios, sem vento;
- h) Hipótese 6 – Construção/manutenção, sem vento.

A Figura 19 apresenta os carregamentos utilizados, com os valores finais expressos em N, já incluindo os respectivos fatores de sobrecarga. A força FVM corresponde à carga do vento incidente sobre a estrutura, enquanto o termo PP refere-se ao peso próprio da torre. As árvores apresentadas representam as hipóteses de carregamento principais utilizadas nos cálculos. Essas hipóteses foram ainda desdobradas para uma análise estrutural mais detalhada, conforme exposto abaixo:

- a) Hipótese 4 (ruptura de uma fase): Nesta hipótese, foram avaliados separadamente os cenários de ruptura da fase superior, intermediária e inferior. Além disso, analisou-se a ruptura de fase individualmente em cada circuito (esquerdo e direito).
- b) Hipótese 5 (ruptura de um para-raios): Similar à hipótese 4, foram verificadas as rupturas no circuito esquerdo e no circuito direito de forma independente.
- c) Cenários com um ou dois circuitos montados: Todas as hipóteses de carregamento foram verificadas tanto para situações em que apenas um circuito está em operação quanto para condições de operação com dois circuitos instalados.
- d) Cargas verticais mínimas: Para todas as hipóteses, com exceção da hipótese de construção/manutenção, também foram consideradas cargas verticais mínimas (indicadas entre parênteses nas árvores de carga).

Figura 19 - Árvores de carregamentos



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4 MODALAGEM NO SOFTWARE TOWER

A modelagem estrutural no TOWER é realizada por meio da representação da estrutura como uma rede de nós interconectados, com elementos definidos em diferentes grupos, de acordo com as características e funções de cada componente. A versão do *software* utilizada foi a 19.01, cuja licença foi fornecida pela empresa Araxá Engenharia, possibilitando o desenvolvimento deste trabalho.

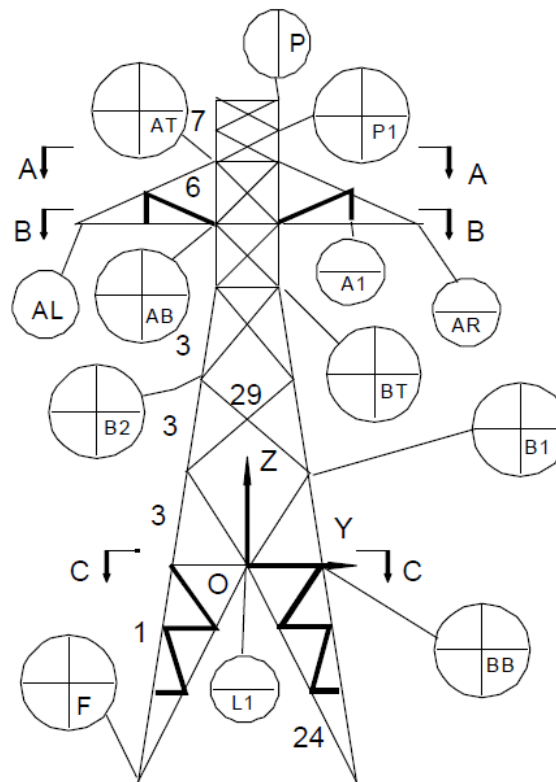
4.1 TIPOS DE ELEMENTOS

Inicialmente, estrutura foi modelada com elementos de treliça espacial (*truss*), onde cada membro possui seis graus de liberdade de translação, distribuídos em três direções em cada nó. Em uma treliça espacial, todas as juntas são tratadas como universais ideais, conectadas por pinos.

Um problema recorrente em torres modeladas apenas com elementos de treliça é lidar com juntas e mecanismos planos. Nos modelos, uma junta plana ocorre na intersecção de barras que se encontram em um único plano. Exemplos de tais juntas na Figura 20 incluem a junta A1 na corda inferior da mísula direita e a junta P1 próxima ao topo do para-raios.

O problema com as juntas planas em modelos de treliça espaciais é que matematicamente elas não têm rigidez na direção perpendicular ao plano, o que causa uma divisão por zero (ou seja, um erro matemático) durante o cálculo. Então, para estabilizar esses nós, alguns elementos da estrutura podem ser modelados como elementos de pórtico espacial (*beam*) ou podem ser introduzidas barras fictícias com rigidez suficientemente baixa para não interferir de forma significativa nos esforços e deslocamentos do modelo. Neste trabalho, ambas as abordagens foram utilizadas.

Figura 20 - Modelo simples de torre



Fonte: TOWER (2023)

É importante ressaltar que, ao utilizar elementos de pórtico espacial para estabilizar juntas e mecanismos planos, os momentos fletores nesses elementos não são verificados no *software*. Isso ocorre porque os momentos fletores significativos geralmente estão associados apenas às excentricidades de ligação, que são tratadas indiretamente por normas e verificações de projeto que especificam reduções nominais na capacidade de compressão dos membros conectados com excentricidades.

Ainda, o dimensionamento de algumas diagonais ou suspensões de braços foram baseados no pressuposto de que esses membros não suportam a compressão, ou seja, que se comportam como cabos. Quando eles são projetados com este pressuposto, são designados por elementos do tipo “Somente-tensão” (*T-only*).

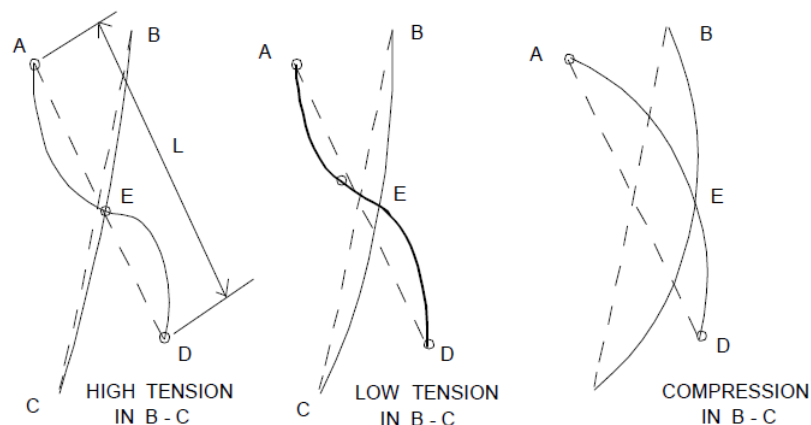
4.2 TIPOS DE GRUPO

Além dos membros serem definidos como elementos de viga (*beam*) ou treliça (*truss*), eles são classificados em diferentes tipos de grupo. Em geral, há restrições

sobre as maiores razões de esbeltez L/r que podem ser usadas para membros de um tipo específico. Existem cinco opções de grupo:

- Perna (*leg*): inclui os montantes principais, elementos estruturais localizados nos cantos da torre que suportam as principais cargas da estrutura.
- Fictício (*fictitious*): refere-se aos membros fictícios, utilizados para estabilizar juntas planas ou mecanismos instáveis.
- Redundante (*redundant*): são incluídos os membros redundantes que, embora não carreguem carga significativa, são essenciais para dar suporte adicional, aumentando a estabilidade dos membros principais ao diminuir seu comprimento de flambagem.
- Diagonal Cruzada (*crossing diagonal*): refere-se às diagonais cruzadas, onde são aplicadas considerações especiais para o comportamento de flambagem fora do plano. Na Figura 21, o esboço à esquerda mostra uma situação em que a diagonal B-C está sob uma força de tração significativa, fornecendo suporte ao ponto médio do membro comprimido A-D. Com uma tração baixa em B-C (esboço central), não há suporte fora do plano completo para o membro A-D, caso em que seu comprimento livre estaria entre $0,5L$ e L . Já no caso em que B-C está em compressão (esboço à direita), ambas as diagonais flambam fora do plano ao mesmo tempo, com o comprimento livre de A-D próximo de L .

Figura 21 - *Crossing diagonals*



Fonte: TOWER (2023)

- e) Outro (*other*): abrange membros que suportam carga, mas que não se enquadram em nenhum dos grupos mencionados anteriormente.

Para os membros do grupo Perna (*leg*), o limite é de $L/r \leq 150$. Outros membros comprimidos possuem limite de $L/r \leq 200$, enquanto os membros redundantes seguem um limite mais elevado de $L/r \leq 250$. Já os membros exclusivamente em tração possuem limites entre 300 e 500, refletindo suas funções específicas na estrutura.

4.3 MODELOS

No primeiro modelo, a maior parte dos membros redundantes não foram incluídos, sendo incorporados apenas aqueles necessários para assegurar a estabilidade global da estrutura. Além disso, elemento de viga e barras fictícias com rigidez mínima foram inseridas estrategicamente para estabilizar juntas planas e mitigar a ocorrência de mecanismos instáveis, garantindo a integridade do modelo.

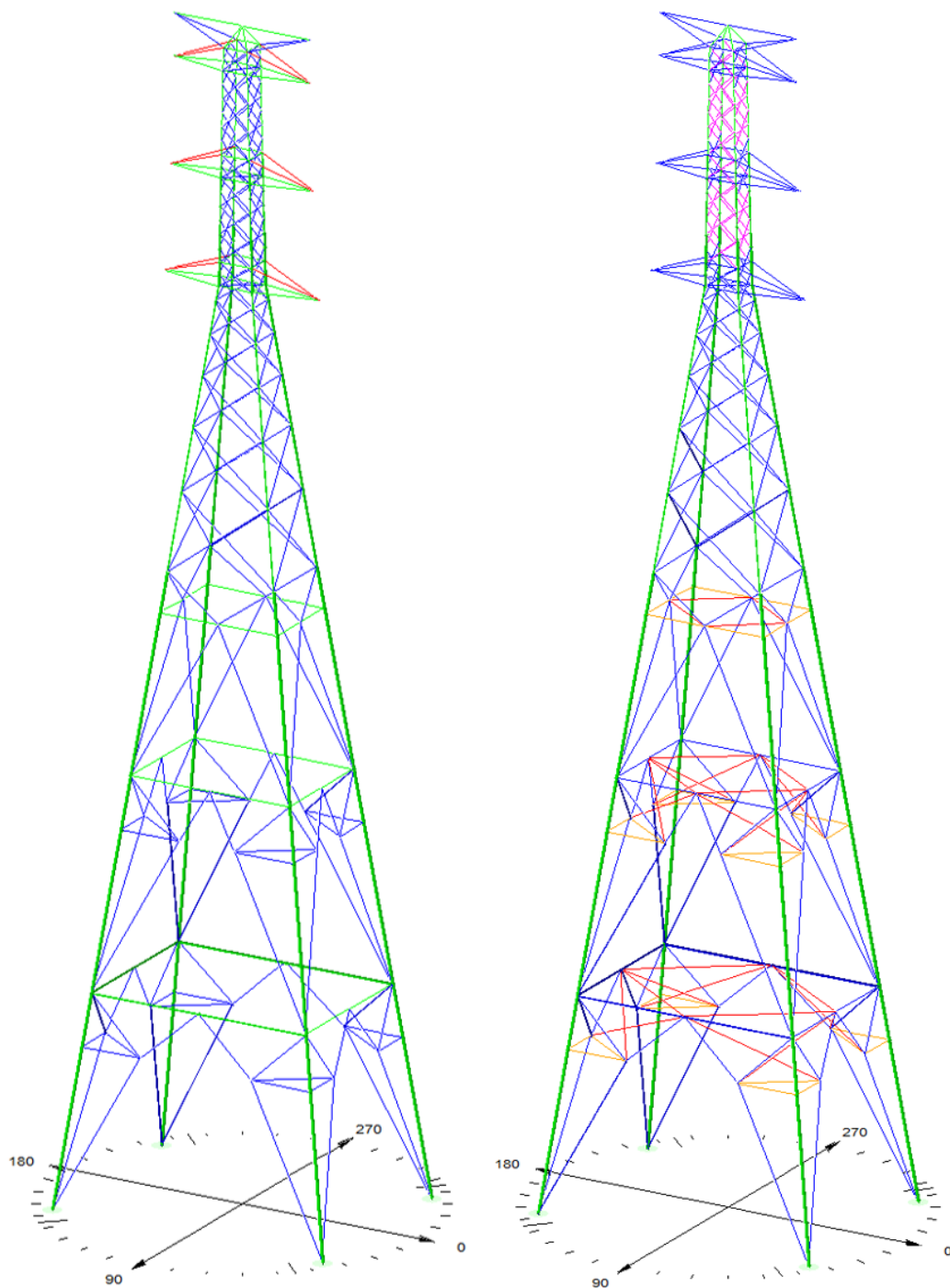
Essa abordagem é amplamente adotada na prática brasileira devido à sua simplicidade e eficiência, uma vez que reduz significativamente o número de elementos estruturais e de nós no modelo, facilitando o processamento computacional. No entanto, a exclusão das barras redundantes exige a aplicação de fatores de ajuste de área e peso para compensar a ausência desses membros, de modo a preservar a representatividade do comportamento estrutural real.

Por outro lado, o segundo modelo representa a estrutura de forma completa, incorporando todas as barras que compõem a torre. Essa configuração permite uma análise estrutural mais detalhada, além de possibilitar verificações automatizadas das redundantes diretamente no *software*. Contudo, a inclusão de todos os membros resulta em um modelo significativamente mais complexo, aumentando o número de nós e, conseqüentemente, a demanda por maior tempo de modelagem e maior capacidade computacional para a realização das análises de forma eficiente.

As Figuras 22 e 23 apresentam o primeiro e o segundo modelo, respectivamente, classificados tanto por tipo de elemento (torre à esquerda) quanto por tipo de grupo (torre à direita). Na classificação por elementos, as barras azuis representam os elementos de treliça, as verdes correspondem aos elementos de viga,

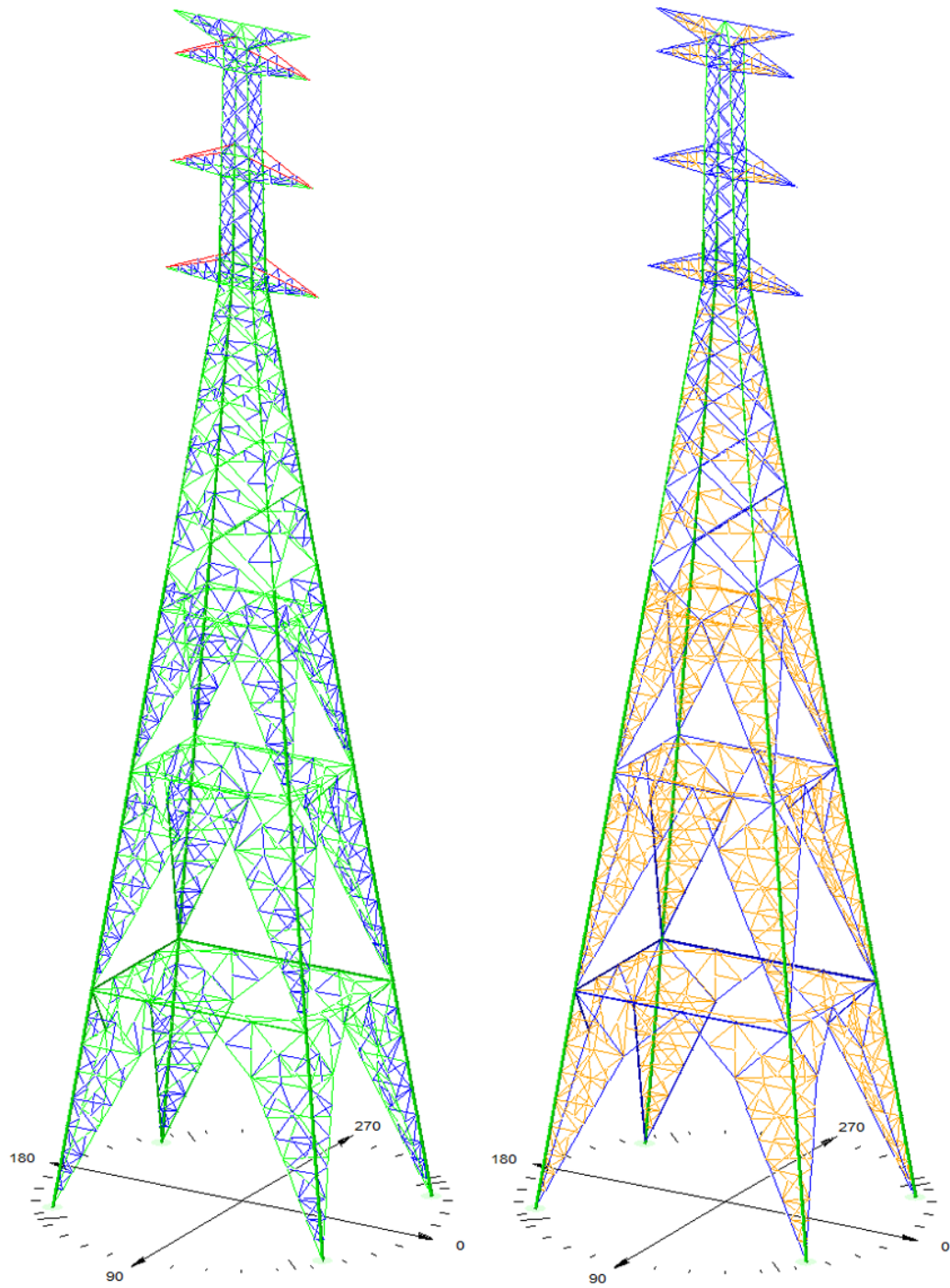
e as vermelhas são designadas como "somente tração". Na classificação por grupos, a cor verde representa o grupo Perna, a azul indica o grupo Outros, a roxa corresponde ao grupo Diagonal Cruzada, a vermelha ao grupo Fictícios, e a laranja identifica o grupo Redundante. Observa-se que, na imagem à esquerda, os membros fictícios foram omitidos.

Figura 22 - Primeiro modelo



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 23 - Segundo modelo



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.3.1 Fator de área

A Tabela 9 mostra os fatores de área aplicados para cada seção no primeiro modelo. Esses fatores, são utilizados para considerar a presença de membros redundantes, que não estão explicitamente incluídos no modelo estrutural, mas que influenciam na área exposta ao vento. Nessa tabela, a área fictícia corresponde à área da seção desconsiderando as barras redundantes, enquanto a área real inclui todas as barras da estrutura.

Tabela 9 - Fatores de ajuste de área

Seção	Área fictícia		Área real		Fator de área	
	Trans.	Long.	Trans.	Long.	Trans.	Long.
1	0,79	2,22	1,19	2,83	1,51	1,27
2	2,03	2,78	2,24	3,09	1,10	1,11
3	2,25	3,35	2,56	3,85	1,14	1,15
4	1,69	1,98	2,06	2,40	1,22	1,21
5	2,38	2,63	3,08	3,61	1,29	1,37
6	2,88	3,51	3,86	4,89	1,34	1,39
7	3,95	4,35	7,31	9,03	1,85	2,08
8	1,88	2,25	3,76	4,41	2,00	1,96
9	4,42	5,13	7,80	9,81	1,76	1,91
10	2,06	2,43	4,02	4,69	1,95	1,93
11	3,74	3,84	7,12	8,51	1,90	2,22

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Já no segundo modelo, não houve necessidade de ajustes nos fatores de área, pois todas as barras foram integradas diretamente ao modelo, resultando em um fator igual a 1.

4.3.2 Fator de peso

A Tabela 10 apresenta os fatores de peso adotados para cada seção no primeiro modelo. Esse fator é utilizado para ajustar o peso próprio de todos os membros de uma seção da estrutura, com o objetivo de estimar o peso real da seção. Nessa tabela, o peso fictício refere-se ao peso da seção sem as barras redundantes, enquanto o peso real considera todas as barras da estrutura.

Tabela 10 - Fatores de ajuste de carga permanente

Sessão	Peso fictício (kN)	Peso real (kN)	Fator de peso
1	2,927	3,946	1,348
2	4,337	4,823	1,112
3	5,969	6,689	1,121
4	4,239	4,960	1,170
5	6,280	7,821	1,245
6	8,963	12,392	1,383
7	11,276	20,230	1,794
8	7,431	10,106	1,360
9	14,835	24,597	1,658
10	8,975	12,037	1,341
11	11,896	19,036	1,600

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Esse ajuste é importante para garantir que o peso considerado nas análises seja o mais próximo possível do peso real da estrutura, levando em conta a contribuição de membros redundantes. Contudo, os cálculos desconsideraram os pesos adicionais provenientes da galvanização, chapas de ligação e parafusos, considerando exclusivamente o peso linear dos perfis de cantoneiras.

Para o segundo modelo, por sua vez, não foi necessário aplicar fatores de ajuste diferentes de 1, pois todas as barras foram incluídas diretamente no modelo.

4.3.3 Configurações da análise no segundo modelo

Para o segundo modelo estrutural, ao incluir as barras redundantes, foi possível ajustar parâmetros específicos para as verificações diretamente no *software*. Para manter a consistência com as verificações realizadas no primeiro modelo, foram definidos critérios personalizados, configurados como "User Defined", com o objetivo de replicar o procedimento convencional adotado na prática brasileira.

4.3.3.1 Verificação de escalada

Na verificação de escalada (*climbing*), foi adotado um carregamento de 981 N, representando o peso majorado de um operário. Ainda, o *software* oferece uma funcionalidade que permite configurar um ângulo específico em relação à horizontal para determinar quais membros podem ser considerados escaláveis. Essa

configuração é especialmente relevante, pois, na prática, membros orientados verticalmente geralmente não são utilizados para escalada em operações de manutenção ou montagem.

Embora a prática brasileira usualmente considere todas as barras na verificação, neste trabalho foi adotado um ângulo limite de 45 graus, de forma a classificar como escaláveis apenas os membros inclinados dentro dessa faixa. Essa abordagem foi utilizada para fins comparativos, avaliando a viabilidade de aplicá-la como alternativa às práticas convencionais.

Figura 24 - Configuração da verificação de escalada

Climbing Load Check

Climbing Load Check Method: User Defined

Angle from horizontal within which members are potential climbing members (deg): 45

Factored climbing (worker) load (N): 981

☒ Allow check to control member design and usage of first load case (for load case independent checks) or load cases with non-0 Climbing SF (if load case dependent)

☐ Treat violations as warnings only (will not effect model usage or be visible in PLS-CADD)

Fonte: retirado do TOWER (2024)

Vale ressaltar que o TOWER não se limita à verificação das barras redundantes, realizando também a análise de todos os membros principais em relação ao critério de escalada.

4.3.3.2 Verificação de porcentagem da carga

Nessa verificação, adotou-se o critério de considerar 2,5% do esforço de compressão do membro suportado, conforme a prática usual no Brasil.

Figura 25 - Configuração da verificação da força nas barras redundantes

Check and design redundant members with:

☐ Actual force in the member

☒ % of compression force in the supported leg as per the Check Method below

☐ % of the compression capacity of the supported leg as per the Check Method below

% of force or capacity of leg

Redundant members check method: User Defined

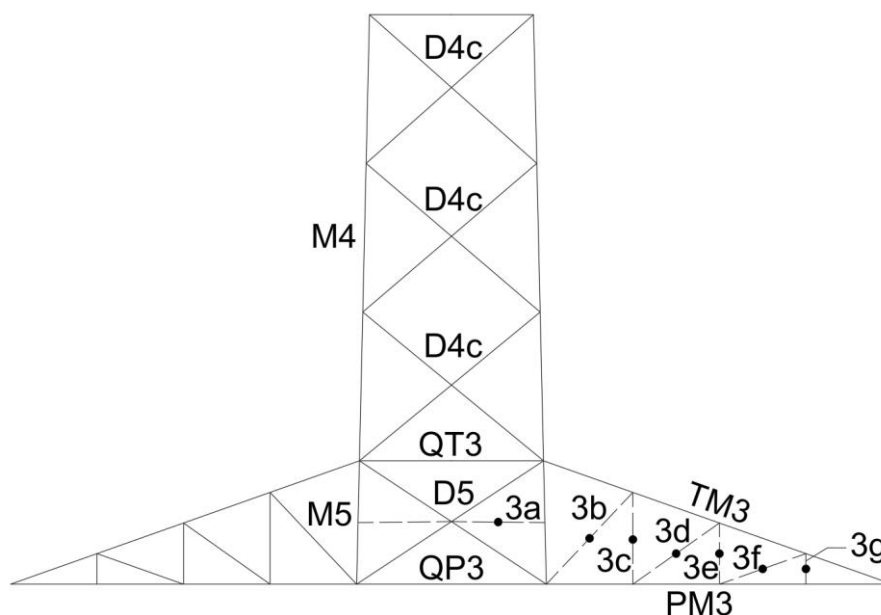
Percentage of leg load to apply (load applied in direction perpendicular to the supported member): 2.5

Fonte: retirado do TOWER (2024)

No entanto, o TOWER utiliza uma abordagem distinta: em vez de aplicar a força diretamente na direção longitudinal da barra redundante, como é feito na prática brasileira, o programa aplica a força de forma perpendicular ao membro principal travado e calcula automaticamente a componente resultante no membro redundante.

O cálculo é baseado na carga máxima dos membros conectados às extremidades de cada barra redundante. Por exemplo, no caso da barra redundante 3a, ilustrada na Figura 26, o programa analisa separadamente a força na extremidade esquerda, proveniente do membro D5, e a força na extremidade direita, proveniente do membro M5. Em seguida, aplica 2,5% da maior força de compressão registrada nesses membros como esforço atuante na barra redundante.

Figura 26 - Seção 3

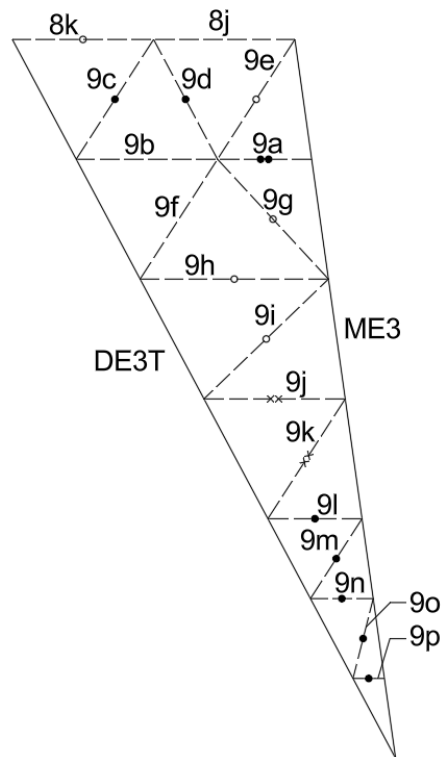


Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Entretanto, quando uma barra redundante está conectada a outras redundantes, o critério muda. Nesses casos, a força é determinada com base em 100% da maior carga proveniente dos membros redundantes conectados. Por exemplo, para a barra 9b na Figura 27, que está conectada a cinco barras redundantes na extremidade direita, o programa dimensiona a força considerando 100% da carga da barra com maior esforço entre elas, que, neste caso, é a barra 9a. Esse valor, por sua vez, equivale a 2,5% da força de compressão do montante ME3.

O *software* assume essa abordagem porque considera que as barras redundantes conectadas entre si não fornecem suporte adicional significativo ao longo de seus comprimentos, apenas compartilham articulações comuns, justificando o uso integral da maior carga para dimensionamento.

Figura 27 - Seção 9



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5 RESULTADOS

5.1 PESO PRÓPRIO POR PAINEL

A Tabela 11 apresenta os valores de peso próprio para cada seção da estrutura. Conforme definido nas hipóteses de carregamento, foi aplicado um coeficiente de majoração de 1,15 ao peso próprio da estrutura nos casos de vento máximo, e um coeficiente de 0,87 nos cenários com vento reduzido.

Tabela 11 - Peso próprio por painel

Seção	Peso (kN)	Peso x 1,15 (kN)	Peso x 0,87 (kN)
1	3,95	4,54	3,43
2	4,82	5,55	4,20
3	6,69	7,70	5,82
4	4,96	5,70	4,32
5	7,82	8,99	6,80
6	12,40	14,26	10,78
7	20,23	23,26	17,60
8	10,11	11,62	8,79
9	24,60	28,29	21,40
10	12,03	13,84	10,47
11	19,03	21,89	16,56

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5.2 BARRAS PRINCIPAIS

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os resultados dos montantes, onde foram observadas as maiores diferenças entre os dois modelos, e por isso foram escolhidos para a análise. Para esses membros, considerou-se que as cantoneiras estão conectadas em ambas as abas, sem restrição à rotação nas extremidades, sendo aplicadas, portanto, as curvas de flambagem 1 e 4 para a análise. As equações utilizadas para determinar as resistências dos membros submetidos à compressão e à tração estão detalhadas nas Seções 2.4.1 e 2.4.2, respectivamente.

A análise linear foi realizada para os dois modelos, mas, nos membros principais, não foram observadas diferenças significativas em relação à análise não linear. Por isso, este trabalho apresenta apenas os resultados da análise não linear, mais relevantes para a avaliação estrutural.

Tabela 12 - Análise não linear dos montantes do primeiro modelo

Membro	Perfil (mm)	Sdc (kN)	Rdc (kN)	Sdt (kN)	Rdt (kN)	Uso (%)
M	1L60x60x4	-30,9	54,5	30,5	126,7	56,7
M1	1L75x75x5*	-62,5	208,5	41,9	216,3	35,1
M2	1L75x75x5*	-149,0	192,2	122,7	216,3	83,6
M3	1L90x90x7*	-191,2	403,4	150,1	455,7	47,4
M4a	1L90x90x7*	-313,6	379,8	272,3	373,6	82,6
M4b	1L100x100x7*	-373,1	411,5	330,2	511,7	90,7
M5	1L100x100x7*	-424,4	445,4	370,1	412,9	95,3
M6	1L100x100x8*	-452,3	521,5	396,1	466,0	86,7
M7	1L100x100x8*	-479,8	510,9	413,0	578,9	93,9
M8	1L100x100x8*	-470,8	532,2	409,5	578,9	88,5
M9	1L100x100x8*	-493,5	507,2	424,1	466,0	97,3
M10	1L100x100x8*	-492,2	516,3	421,8	466,0	95,3
M11	1L100x100x10*	-513,7	503,1	446,2	575,9	102,1
M12	1L127x127x9,5*	-523,0	742,7	443,3	735,8	70,4
ME1	1L127x127x9,5*	-525,7	675,1	440,2	735,8	77,9
ME2	1L127x127x9,5*	-568,8	681,1	471,7	735,8	83,5
ME3	1L127x127x9,5*	-571,2	675,1	469,3	735,8	84,6
ME4	1L127x127x9,5*	-622,8	681,1	505,0	735,8	91,4
MP	1L127x127x9,5*	-625,3	675,1	502,5	735,8	92,6

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 13 - Análise não linear dos montantes do segundo modelo

Membro	Perfil (mm)	Sdc (kN)	Rdc (kN)	Sdt (kN)	Rdt (kN)	Uso (%)
M	1L60x60x4	-30,6	54,5	30,5	126,7	56,1
M1	1L75x75x5*	-62,9	208,5	41,8	216,3	30,2
M2	1L75x75x5*	-144,2	192,2	119,3	216,3	75,0
M3	1L90x90x7*	-185,5	403,4	149,0	455,7	46,0
M4a	1L90x90x7*	-305,7	379,8	263,8	373,6	80,5
M4e	1L100x100x7*	-363,0	411,5	320,1	511,7	88,2
M5	1L100x100x7*	-413,7	445,4	358,1	412,9	92,9
M6	1L100x100x8*	-440,8	521,5	381,9	466,0	84,5
M7	1L100x100x8*	-462,7	510,9	397,7	578,9	90,6
M8	1L100x100x8*	-462,1	532,2	400,5	578,9	86,8
M9	1L100x100x8*	-483,3	507,2	413,9	466,0	95,3
M10	1L100x100x8*	-480,0	516,3	412,3	466,0	93,0
M11	1L100x100x10*	-507,8	503,1	440,0	575,9	101,0
M12	1L127x127x9,5*	-502,9	742,7	433,5	735,8	67,7
ME1	1L127x127x9,5*	-509,2	675,1	428,0	735,8	75,4
ME2	1L127x127x9,5*	-540,7	681,1	460,1	735,8	79,4
ME3	1L127x127x9,5*	-551,0	675,1	455,1	735,8	81,6
ME4	1L127x127x9,5*	-586,2	681,1	480,6	735,8	86,1
MP	1L127x127x9,5*	-616,9	675,1	480,1	735,8	91,4

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Os perfis indicados com asterisco correspondem ao aço A572 Grau 60, enquanto a nomenclatura "1L" refere-se a cantoneiras simples.

Em ambos os modelos, observa-se que o membro M11 apresenta um índice de utilização superior a 100%. Essa discrepância pode ser atribuída à utilização de diferentes *software* para as verificações, já que a torre foi originalmente dimensionada em um programa privado que considera apenas elementos de treliça espacial, enquanto, neste trabalho, foram adotados elementos de pórtico espacial para os montantes. Essa abordagem, combinada com diferenças nos parâmetros e considerações de modelagem de cada *software*, pode explicar os desvios nos resultados, sendo tais variações comuns quando diferentes ferramentas são aplicadas na análise estrutural.

Além disso, é importante destacar que, os resultados obtidos nas tabelas acima foram validados com os valores apresentados no memorial de cálculo da estrutura, dimensionada por uma empresa renomada em cenário nacional.

Tabela 14 - Comparação das solicitações de cálculo dos montantes

Membro	Primeiro modelo		Segundo modelo		Comparação	
	Sdc (kN)	Sdt (kN)	Sdc (kN)	Sdt (kN)	Sdc (%)	Sdt (%)
M	-30,9	30,5	-30,6	30,5	-1,1	-0,2
M1	-62,5	41,9	-62,9	41,8	0,7	-0,4
M2	-149,0	122,7	-144,2	119,3	-3,2	-2,7
M3	-191,2	150,1	-185,5	149,0	-3,0	-0,7
M4a	-313,6	272,3	-305,7	263,8	-2,5	-3,1
M4b	-373,1	330,2	-363,0	320,1	-2,7	-3,0
M5	-424,4	370,1	-413,7	358,1	-2,5	-3,2
M6	-452,3	396,1	-440,8	381,9	-2,5	-3,6
M7	-479,8	413,0	-462,7	397,7	-3,6	-3,7
M8	-470,8	409,5	-462,1	400,5	-1,8	-2,2
M9	-493,5	424,1	-483,3	413,9	-2,1	-2,4
M10	-492,2	421,8	-480,0	412,3	-2,5	-2,3
M11	-513,7	446,2	-507,8	440,0	-1,1	-1,4
M12	-523,0	443,3	-502,9	433,5	-3,8	-2,2
ME1	-525,7	440,2	-509,2	428,0	-3,1	-2,8
ME2	-568,8	471,7	-540,7	460,1	-5,0	-2,5
ME3	-571,2	469,3	-551,0	455,1	-3,5	-3,0
ME4	-622,8	505,0	-586,2	480,6	-5,9	-4,8
MP	-625,3	502,5	-616,9	480,1	-1,3	-4,5

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 14 apresenta uma comparação das solicitações de cálculo entre o primeiro e o segundo modelo. Verifica-se que, em média, os esforços nos montantes foram reduzidos em 2,6% no segundo modelo, resultado da redistribuição de esforços proporcionada pela inclusão das barras redundantes.

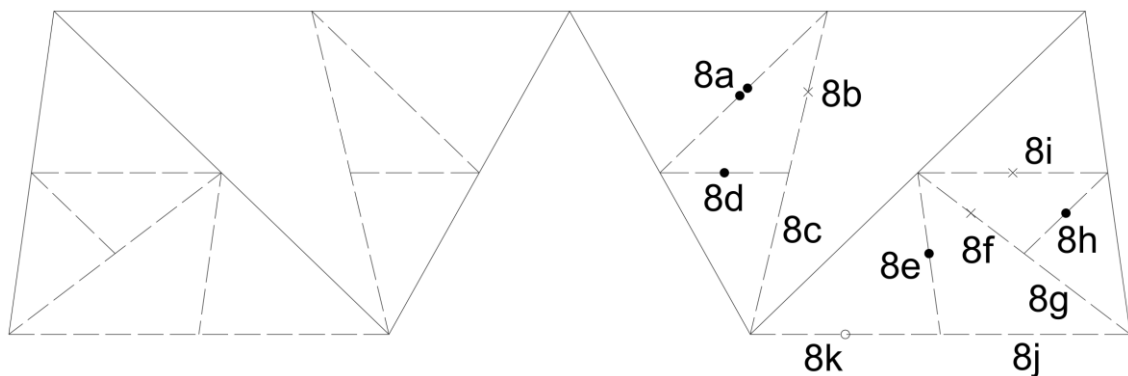
5.3 BARRAS REDUNDANTES

No segundo modelo, o uso do *software* possibilitou a análise de todas as barras redundantes da torre, considerando as três verificações detalhadas na Seção 2.5.3, além de permitir a avaliação da força efetivamente atuante em cada membro. Por outro lado, no primeiro modelo, essas verificações foram realizadas manualmente, fora do ambiente do programa. Diante da grande quantidade de elementos, este trabalho focou na discussão apenas dos casos críticos, que serão apresentados a seguir.

5.3.1 Verificação de esbeltez efetiva

Os resultados obtidos no segundo modelo, pelo TOWER, coincidiram com aqueles calculados manualmente no primeiro modelo, por meio de planilhas eletrônicas, e todas as barras atenderam ao critério estabelecido de $kL/r \leq 250$. Dessa forma, para fins de apresentação dos resultados, serão detalhados apenas os cálculos referentes às redundantes da face transversal da seção 8, selecionada por incluir a barra 8a, que possui a maior esbeltez efetiva entre todas.

Figura 28 - Redundantes da face transversal da seção 8



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 15 - Verificação de esbeltez efetiva

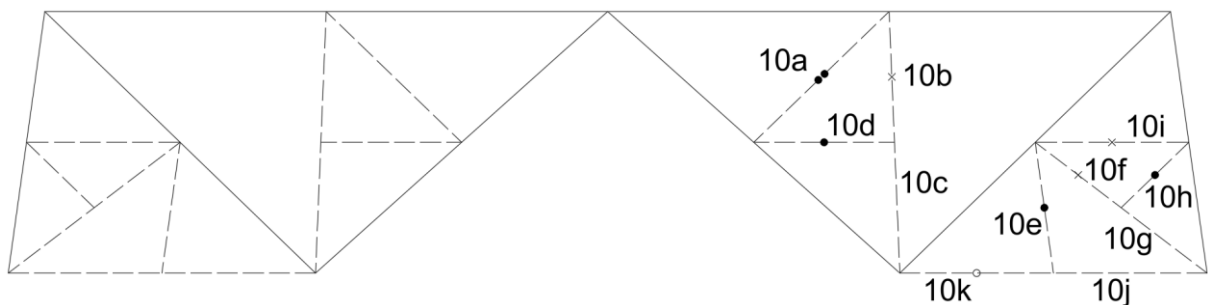
N	Dimensão (mm)	K	L (cm)	r (cm)	kL/r	kL/r ≤ 250
8a	45x45x3,0	1	216,7	0,88	246,3	Ok
8b	50x50x3,0	1	154,9	0,99	156,5	Ok
8c	50x50x3,0	1	154,9	0,99	156,5	Ok
8d	40x40x3,0	1	119,9	0,78	153,7	Ok
8e	40x40x3,0	1	152,2	0,78	195,1	Ok
8f	50x50x3,0	1	124,3	0,99	125,6	Ok
8g	50x50x3,0	1	124,3	0,99	125,6	Ok
8h	40x40x3,0	1	108,4	0,78	138,9	Ok
8i	50x50x3,0	1	176,7	0,99	178,5	Ok
8j	60x60x4,0	1	176,7	1,18	149,7	Ok
8k	60x60x4,0	1	176,7	1,18	149,7	Ok

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5.3.2 Verificação de escalada

Assim como na verificação anterior, os resultados obtidos no *software* coincidiram com os cálculos manuais realizados por meio de planilhas eletrônicas, e todas as barras atenderam ao critério $M_{m\acute{a}x} \leq M_{rd}$, incluindo os membros principais, que também são verificados pelo *software*, conforme descrito na Seção 4.3.3. Para fins de apresentação, serão detalhados apenas os resultados da face transversal da seção 10, escolhida por incluir a barra 10d, que apresentou a maior taxa de utilização nesta verificação.

Figura 29 - Redundantes da face transversal da seção 10



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 16 - Verificação de escalada

N	Dimensão (mm)	Projeção horiz. (m)	Peso (N)	Mrd (kNm)	Mmáx (kNm)	Uso (%)
10a	45x45x3,0	1,56	44,43	0,55	0,39	72,00
10b	50x50x3,0	0,16	34,48	0,68	0,04	5,90
10c	50x50x3,0	0,16	34,48	0,68	0,04	5,90
10d	40x40x3,0	1,62	29,95	0,43	0,40	94,20
10e	40x40x3,0	0,26	28,16	0,43	0,06	14,90
10f	50x50x3,0	0,99	28,41	0,68	0,25	36,50
10g	50x50x3,0	0,99	28,41	0,68	0,25	36,50
10h	40x40x3,0	0,78	20,05	0,43	0,19	45,30
10i	50x50x3,0	1,77	40,39	0,68	0,44	65,40
10j	60x60x4,0	1,77	64,14	1,29	0,45	34,60
10k	60x60x4,0	1,77	64,14	1,29	0,45	34,60

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Embora os resultados das análises sejam equivalentes, é importante destacar que, no TOWER, as barras 10b, 10c, 10e e 10h não foram avaliadas devido à sua angulação superior a 45°. Nessas barras, foi observado um baixo índice de utilização para essa verificação, o que evidencia a utilidade dessa funcionalidade do *software*. Conforme explicado na Seção 4.3.3, barras com inclinações superiores a 45° são pouco utilizadas para escaladas e, mesmo quando usadas, apresentam uma projeção horizontal reduzida, o que geralmente faz com esse não seja o seu critério de dimensionamento, justificando sua exclusão nessa análise específica.

5.3.3 Verificação de porcentagem de carga

Ao contrário das verificações anteriores, nesta etapa foram identificadas diferenças significativas entre os dois modelos. Por esse motivo, os resultados serão apresentados separadamente, permitindo uma comparação detalhada entre as duas abordagens.

Nesta análise, foram identificados dois casos críticos em que o programa indicou que o esforço solicitante excede a resistência. O primeiro caso envolve barras das seções 7, 9 e 11, enquanto o segundo está relacionado às barras do corte GG. Como as barras das seções 7, 9 e 11 apresentaram comportamentos equivalentes, será detalhada apenas a análise referente à seção 11.

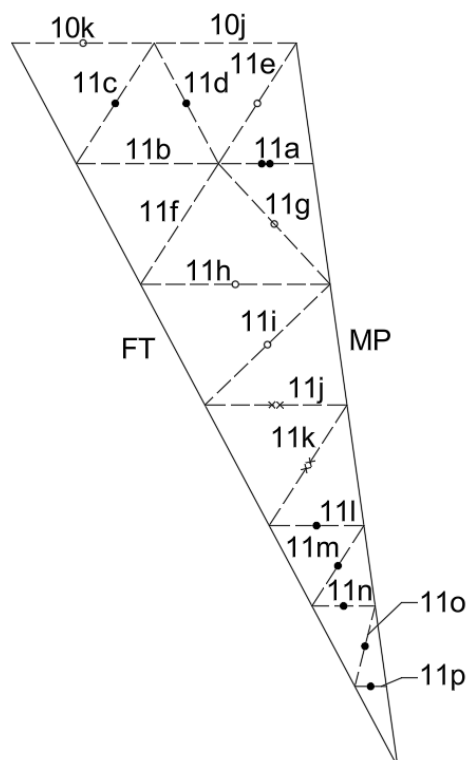
5.3.3.1 Seção 11

5.3.3.1.1 Primeiro modelo

No primeiro modelo, a análise das barras redundantes exige avaliar sua disposição e identificar os membros que elas travam. Nesse contexto, as barras 11a e 11b merecem atenção especial, pois, embora sejam a mesma barra, elas devem ser divididas na análise devido à presença de um nó intermediário. A barra 11a foi dimensionada considerando o esforço proveniente do montante MP, enquanto a barra 11b foi avaliada com base no esforço da diagonal FT. Um caso similar ocorre com as barras 11e e 11f, que também foram tratadas como segmentos separados para a análise.

Além disso, destaca-se a barra 11d, que possui uma configuração diferenciada, conectando-se exclusivamente a outras barras redundantes. Essa particularidade resulta em esforços de dimensionamento significativamente menores para essa barra em comparação com aquelas conectadas diretamente a montantes ou diagonais principais.

Figura 30 - Seção 11 (primeiro modelo)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 17 - Verificação de porcentagem de carga para o primeiro modelo

N	Dimensão (mm)	Membro travado	Sdc (kN)	%	Sdc,resultante (kN)	Rdc (kN)	Uso (%)
11a	45x45x3,0	MP	625,3	2,5	15,6	26,4	59,3
11b	45x45x3,0	FT	79,2	2,5	2,0	11,7	16,9
11c	40x40x3,0	FT	79,2	2,5	2,0	7,9	25,0
11d	40x40x3,0	11a	15,6	2,5	0,4	8,7	4,5
11e	60x60x4,0	MP	625,3	2,5	15,6	36,3	43,0
11f	60x60x4,0	FT	79,2	2,5	2,0	36,3	5,5
11g	60x60x4,0	MP	625,3	2,5	15,6	27,8	56,3
11h	60x60x4,0	MP	625,3	2,5	15,6	21,0	74,5
11i	60x60x4,0	MP	625,3	2,5	15,6	24,8	63,0
11j	50x50x4,0	MP	625,3	2,5	15,6	21,3	73,5
11k	50x50x4,0	MP	625,3	2,5	15,6	20,7	75,6
11l	40x40x3,0	MP	625,3	2,5	15,6	18,3	85,4
11m	40x40x3,0	MP	625,3	2,5	15,6	17,8	87,8
11n	40x40x3,0	MP	625,3	2,5	15,6	41,2	37,9
11o	40x40x3,0	MP	625,3	2,5	15,6	23,7	66,1
11p	40x40x3,0	MP	625,3	2,5	15,6	56,8	27,5

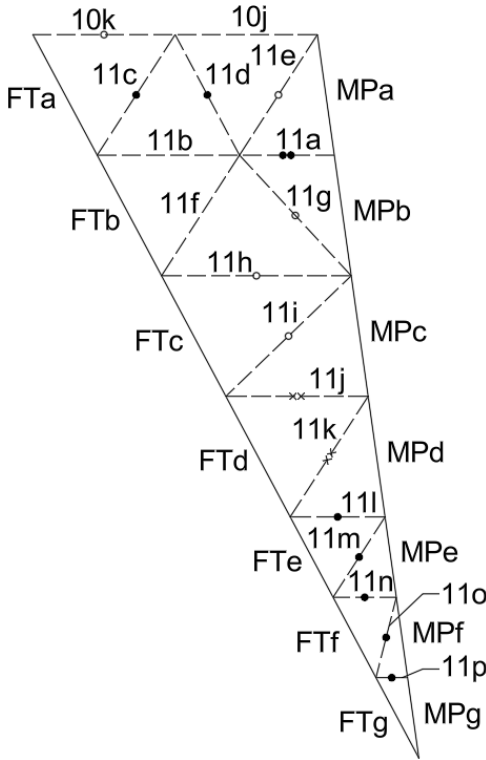
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5.3.3.1.2 Segundo modelo

No segundo modelo, o TOWER adotou considerações específicas, conforme detalhado na Seção 4.3.3.2, resultando em diferenças significativas nos esforços calculados para as barras redundantes 11b, 11c, 11d e 11f. Essas barras foram verificadas considerando 100% da força proveniente dos membros redundantes conectados às suas extremidades. Além disso, como discutido na seção mencionada, o *software* aplica a força perpendicularmente ao membro principal travado e, posteriormente, realiza a decomposição das forças nas direções X, Y e Z, determinando a resultante na direção longitudinal da barra redundante.

Uma característica particular deste modelo foi a necessidade de introdução de nós intermediários nas barras MP e FT, dividindo-as em sete segmentos ilustrados na Figura 31. Essa segmentação permitiu ao programa calcular a compressão atuante em cada segmento de forma individualizada, representando uma vantagem em relação ao primeiro modelo, onde essas barras redundantes eram dimensionadas com base em um único valor de compressão.

Figura 31 - Seção 11 (segundo modelo)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 18 - Verificação de porcentagem de carga para o segundo modelo

N	Dimensão (mm)	Membro travado	Sdc (kN)	%	Sdc,resultante (kN)	Uso (%)
11a	45x45x3,0	MPb	578,0	2,5	14,6	54,0
11b	45x45x3,0	11a	14,6	100,0	14,6	121,4
11c	40x40x3,0	10i	7,8	100,0	1,9	24,0
11d	40x40x3,0	11a	14,6	100,0	2,5	27,9
11e	60x60x4,0	ME4b	583,5	2,5	5,1	13,7
11f	60x60x4,0	11e	5,1	100,0	5,1	13,7
11g	60x60x4,0	MPc	611,1	2,5	4,2	17,0
11h	60x60x4,0	MPc	611,1	2,5	7,3	34,1
11i	60x60x4,0	MPc	611,1	2,5	6,5	25,6
11j	50x50x4,0	MPd	616,9	2,5	10,9	50,1
11k	50x50x4,0	MPd	616,9	2,5	7,1	33,4
11l	40x40x3,0	MPe	624,9	2,5	11,0	58,9
11m	40x40x3,0	MPe	624,9	2,5	7,2	39,3
11n	40x40x3,0	MPe	624,9	2,5	14,2	40,5
11o	40x40x3,0	MPe	624,9	2,5	4,1	16,8
11p	40x40x3,0	MPf	598,3	2,5	15,1	30,0

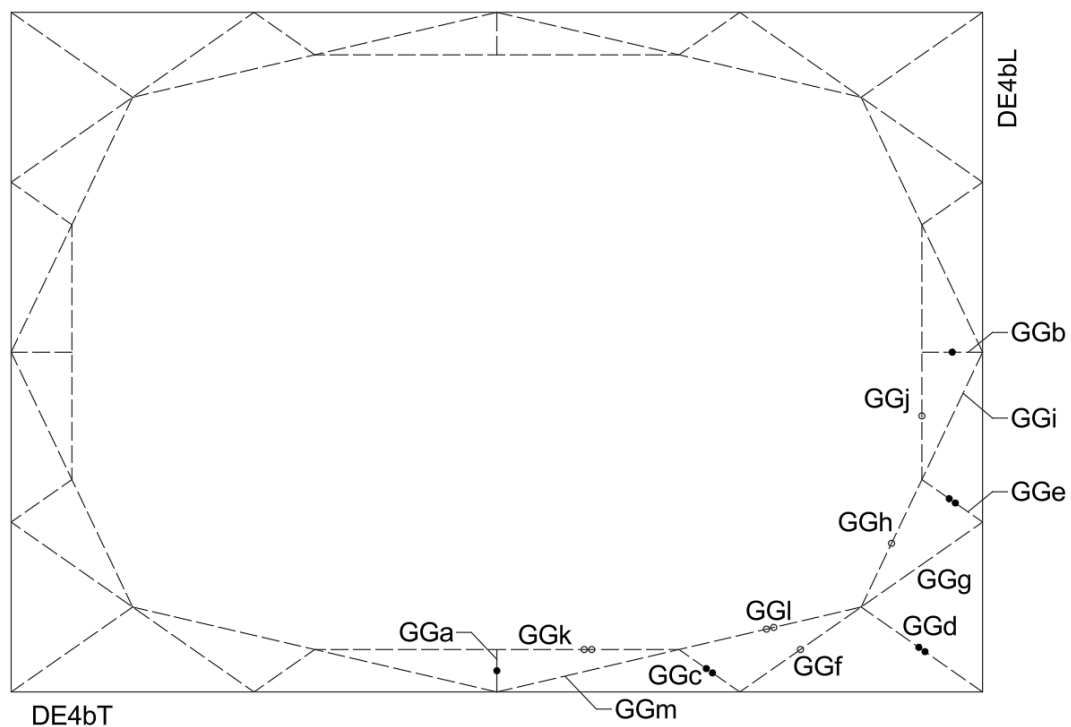
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5.3.3.2 Corte GG

5.3.3.2.1 Primeiro modelo

A análise do corte GG também exigiu a avaliação da disposição das barras redundantes para identificar os membros que elas travam. A barra GGd merece destaque, pois está diretamente conectada ao montante ME4 e às barras horizontais dos quadros DE4bT e DE4bL. Entretanto, a função principal da barra GGd é travar as barras GGg e GGf, enquanto as barras DE4bT e DE4bL são responsáveis pelo travamento do montante ME4. Portanto, dimensionar a barra GGd com base em uma porcentagem do esforço atuante no montante ME4 resultaria em um superdimensionamento.

Figura 32 - Corte GG



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Por fim, vale destacar que, no corte GG, a análise de escalada foi determinante para o dimensionamento das barras, apresentando os maiores esforços, enquanto as verificações de carga resultaram em índices de utilização significativamente menores.

Tabela 19 - Verificação de porcentagem de carga para o primeiro modelo

N	Dimensão (mm)	Membro travado	Sdc (kN)	%	Sdc, redundante (kN)	Rdc (kN)	Uso (%)
GGa	40x40x3,0	DE4bT	-47,8	2,5	-1,20	39,3	3,1
GGb	40x40x3,0	DE4bL	-53,0	2,5	-1,33	38,8	3,4
GGc	45x45x3,0	DE4bT	-47,8	2,5	-1,20	37,5	3,2
GGd	45x45x3,0	GGg	-1,3	2,5	-0,03	9,4	0,4
GGe	45x45x3,0	DE4bL	-53,0	2,5	-1,33	37,5	3,5
GGf	60x60x4,0	DE4bT	-47,8	2,5	-1,20	29,9	4,0
GGg	60x60x4,0	DE4bL	-53,0	2,5	-1,33	29,9	4,5
GGh	60x60x4,0	GGg	-1,3	2,5	-0,03	32,9	0,1
GGi	60x60x4,0	DE4bL	-53,0	2,5	-1,33	32,9	4,0
GGj	60x60x4,0	GGi	-1,3	2,5	-0,03	40,3	0,1
GGk	65x65x4,0	GGm	-47,8	2,5	-1,20	25,3	4,7
GGl	65x65x4,0	GGg	-1,3	2,5	-0,03	24,0	0,1
GGm	65x65x4,0	DE4bT	-47,8	2,5	-1,20	24,0	5,0

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5.3.3.2.2 Segundo modelo

No segundo modelo, o TOWER considerou o esforço do montante ME4 no dimensionamento da barra redundante GGd. Isso ocorre porque o *software* não identifica diretamente qual barra está sendo efetivamente travada pela redundante, mas realiza uma análise das forças em todas as barras conectadas a ela.

Tabela 20 - Verificação de porcentagem de carga para o segundo modelo

N	Dimensão (mm)	Membro travado	Sdc (kN)	%	Sdc,resultante (kN)	Uso (%)
GGa	40x40x3,0	DE4bTb	42,3	2,5	-1,0	2,3
GGb	40x40x3,0	DE4bLb	45,5	2,5	-0,9	2,5
GGc	45x45x3,0	DE4bTb	42,3	2,5	-1,0	2,7
GGd	45x45x3,0	ME4a	585,9	2,5	-14,9	154,6
GGe	45x45x3,0	DE4bLb	45,5	2,5	-0,7	2,1
GGf	60x60x4,0	DE4bTb	42,3	2,5	-0,9	2,8
GGg	60x60x4,0	GGf	0,9	100,0	-0,9	2,8
GGh	60x60x4,0	GGf	0,9	100,0	-0,4	1,2
GGi	60x60x4,0	DE4bLb	45,5	2,5	-0,3	0,9
GGj	60x60x4,0	GGb	0,9	100,0	-0,4	1,0
GGk	65x65x4,0	GGa	1,0	100,0	-0,5	1,9
GGl	65x65x4,0	GGc	1,0	100,0	-0,4	1,8
GGm	65x65x4,0	GGc	1,0	100,0	-0,4	1,8

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5.3.4 Verificação da força efetivamente atuante no membro

Além das três verificações tradicionalmente recomendadas pela prática brasileira, o segundo modelo, com a modelagem das barras redundantes no TOWER, permitiu uma análise detalhada das forças efetivamente atuantes nos membros. Devido à grande quantidade de barras redundantes analisadas neste trabalho, essa verificação foi direcionada exclusivamente aos casos em que o índice de utilização das barras ultrapassou 100%.

Tabela 21 - Análise não linear das redundantes do segundo modelo

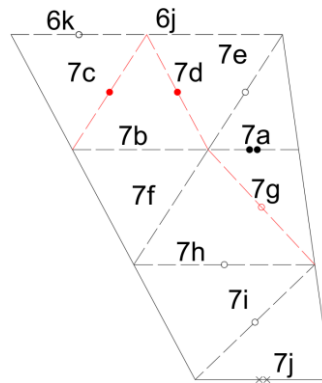
Membro	Perfil (mm)	Sdc (kN)	Rdc (kN)	Sdt (kN)	Rdt (kN)	Uso (%)
7e	40x40x3,0	-10,8	8,1	11,4	73,0	133,3
7d	40x40x3,0	-21,5	8,9	14,0	73,0	240,3
7g	60x60x4,0	-31,4	28,4	24,8	146,2	110,4
8e	40x40x3,0	-11,9	11,2	12,5	73,0	105,8
9c	40x40x3,0	-8,3	8,1	11,4	73,0	101,9
9d	40x40x3,0	-25,3	8,9	21,0	73,0	282,8
9g	60x60x4,0	-35,0	28,4	29,2	146,2	122,9
10e	40x40x3,0	-14,3	11,2	16,7	73,0	127,6
11c	40x40x3,0	-8,4	8,1	11,3	73,0	103,4
11d	40x40x3,0	-28,7	8,9	25,3	73,0	320,5
11g	60x60x4,0	-38,4	28,4	33,6	146,2	134,8
GGd	45x45x3,0	-12,0	9,6	11,9	82,6	124,6

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Conforme discutido anteriormente, o dimensionamento da barra GGd foi determinado pela verificação de escalada. Contudo, o programa identificou esforços internos significativamente maiores devido à sua conexão direta com o montante ME4.

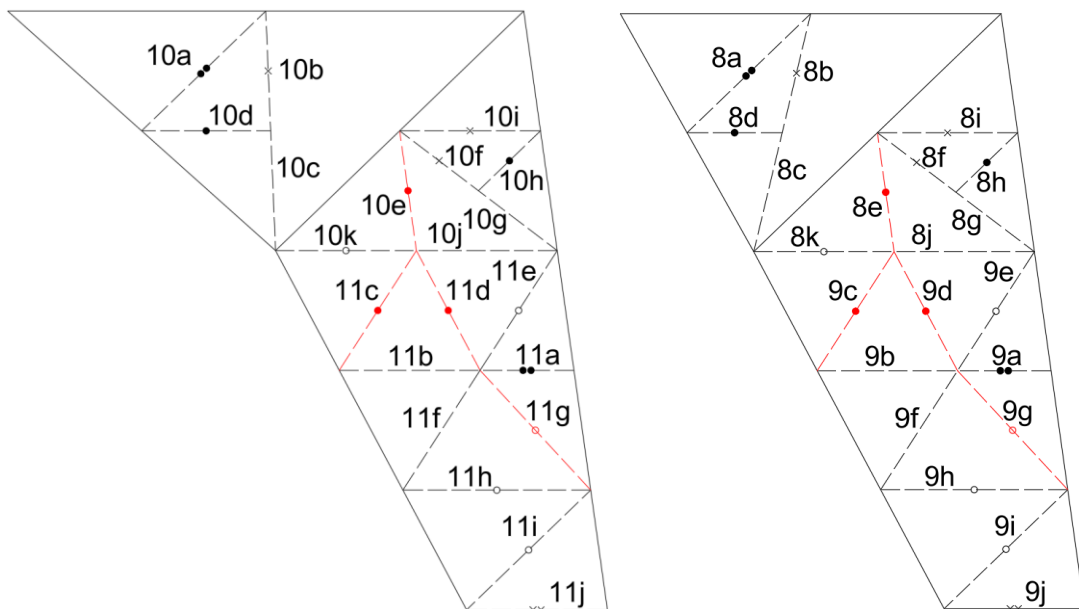
Além disso, os casos das seções 7, 8, 9, 10 e 11 apresentam o mesmo comportamento, onde o programa identificou pontos críticos nas regiões de interseção de múltiplas barras redundantes. Isso resultou em esforços internos nessas barras consideravelmente superiores aos valores previstos pelas verificações realizadas de acordo com a prática usual brasileira, podendo chegar a 3,2 vezes maior que sua resistência, como pode-se observar no membro 11d.

Figura 33 - Região crítica da seção 7



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 34 - Região crítica das seções 8, 9, 10 e 11



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A torre analisada, com mais de 60 metros de altura, caracteriza-se como uma estrutura de grande porte, apresentando regiões de conexões complexas, como aquelas destacadas anteriormente. Esse nível de complexidade torna importante a avaliação dos membros redundantes considerando as forças efetivamente atuantes em cada elemento. Essa metodologia permite maior precisão na análise estrutural, reduzindo o risco de colapsos em pontos críticos e garantindo um desempenho mais confiável e seguro da estrutura.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÃO

Este trabalho concentrou-se na análise da influência da inclusão das barras redundantes em modelos estruturais de torres de transmissão, buscando avaliar seu impacto na redistribuição dos esforços, no cálculo do peso próprio da estrutura e na área exposta ao vento. Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que os objetivos propostos foram atendidos.

Os resultados demonstraram que a inclusão das barras redundantes promove uma redistribuição dos esforços estruturais, porém com valores pouco significativos, apresentando uma redução média de 2,6% nas solicitações dos montantes, com reduções pontuais de até 5,9%. Além disso, o segundo modelo, com todas as barras da torre inclusas, proporcionou maior precisão nos cálculos do peso próprio da torre e da área exposta ao vento, permitindo uma avaliação mais detalhada das condições de carregamento e das forças atuantes nos membros.

No que diz respeito às verificações automatizadas, o *software* demonstrou grande eficiência, realizando análises integradas de todas as barras em poucos segundos. No entanto, diferenças entre as considerações internas do programa e as práticas adotadas no Brasil foram identificadas, especialmente na verificação de porcentagem de força, onde o dimensionamento de algumas barras redundantes foi feito com base em 100% da carga da barra conectada e a aplicação das forças realizada perpendicularmente ao membro travado. Essas diferenças destacam a importância de o engenheiro compreender as particularidades do *software*, assegurando que os resultados estejam alinhados às normas e metodologias de projeto.

Outro ponto relevante identificado foi a detecção de regiões críticas na torre. A modelagem detalhada revelou que algumas barras, dimensionadas com seção mínima pelas verificações usuais, apresentaram esforços até três vezes superiores às suas resistências nominais. Esse fato evidencia a importância de uma análise criteriosa das forças internas em regiões de interseção de elementos redundantes, que podem estar subdimensionados em abordagens mais enxutas.

Apesar das vantagens técnicas do segundo modelo, a prática adotada no Brasil, que desconsidera as barras redundantes, continua válida e eficiente para

projetos nos quais a agilidade e a economia de recursos são fatores prioritários. No entanto, em projetos com condições críticas de carregamento ou maior exigência de segurança estrutural, a inclusão das barras redundantes é altamente recomendável.

Em conclusão, a comparação entre os dois modelos demonstra que a decisão de incluir as barras redundantes deve ser fundamentada em uma análise criteriosa do impacto no desempenho estrutural, no tempo de modelagem e na eficiência computacional. Embora a modelagem completa exija maior esforço e recursos, ela se mostrou essencial para análises mais precisas e robustas, sendo particularmente indicada para projetos com maior complexidade ou sujeitos a condições de carregamento severas.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a realização de uma análise estrutural para uma família completa de torres de transmissão. Este estudo permitiria investigar o comportamento estrutural de diferentes configurações de torres dentro da mesma família, considerando variações de altura e combinações de extensões de corpo e pernas. A pesquisa incluiria a avaliação das condições de carregamento aplicadas a cada modelo, como cargas de vento, peso próprio e esforços térmicos, além de situações críticas que combinam múltiplos fatores.

Adicionalmente, recomenda-se a substituição dos perfis das barras redundantes que apresentaram falha neste trabalho, com o objetivo de avaliar o impacto dessa modificação no desempenho estrutural da torre. Essa análise deve considerar o acréscimo de peso e custo decorrente da mudança dos perfis, permitindo uma avaliação mais abrangente da viabilidade técnica e econômica da inclusão de barras redundantes no projeto estrutural.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 2023.
- ANSYS INC. **ANSYS: engineering simulation software**. Versão 2024 R1. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2024.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 10-15 - Design of Latticed Steel Transmission Structures**. 2015.
- BERARDO, B. **Estudo do aterramento dos pés de torres de linha de transmissão frente às descargas atmosféricas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2012.
- BRAMETAL. **Torres e estruturas metálicas em aço galvanizado**. Linhares, 2020.
- CHAVES, R. A. **Fundações de torres de linhas de transmissão e de telecomunicação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- CSI - COMPUTERS AND STRUCTURES INC. **SAP2000: integrated software for structural analysis and design**. Versão 26.0.0. Walnut Creek, CA: Computers and Structures Inc., 2023.
- DEICHMANN, A. **Otimização dimensional, de forma e topológica de famílias de torres de linhas de transmissão de energia**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Santa Catarina, 2019.
- GONTIJO, C. R. **Contribuição à análise e projeto de torres autoportantes de linhas de transmissão**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **IEC 60826: Design criteria of overhead transmission lines**. Genebra, 2003.
- KAMINSKI, J. **Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. de. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.
- MME. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília, 2020.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapa do sistema de transmissão**. Disponível em:

http://www.ons.org.br/PublishingImages/paginas/Setembro2019_Mapas%20Sistema%20de%20Transmissao.jpg. Acesso em: 14 nov. 2024.

PIXABAY. **Electricity cables**. Disponível em: <https://pixabay.com/photos/electricity-cables-6585087/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

PIXABAY. **Pylon electricity blue landscape**. Disponível em: <https://pixabay.com/photos/pylon-electricity-blue-landscape-4383633/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

POWER LINE SYSTEMS. **TOWER: transmission tower analysis and design software**. Versão 19.01. Madison, WI: Power Line Systems, 2023.

VELOZO, L. T. **Metodização do Estudo das Fundações para Suportes de Linhas de Transmissão**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.