

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

Warley Abreu e Silva Lopes

VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE TRELIÇADA
AUTOPORTANTE DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EXISTENTE

Belo Horizonte

2019

Warley Abreu e Silva Lopes

**VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE TRELIÇADA
AUTOPORTANTE DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EXISTENTE.**

Versão final

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço.

Orientador: Prof. Hermes Carvalho

Coorientador: Prof. Armando Cesar Lavall

Belo Horizonte

2019

L864v

Lopes, Warley Abreu e Silva.

Verificação do dimensionamento de uma torre treliçada autoportante de uma linha de transmissão existente [recurso eletrônico / Warley Abreu e Silva Lopes. – 2019.

1 recurso online (56 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Hermes Carvalho..

Coorientador: Armando Cesar Lavall.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais” .

Bibliografia: f. 56.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas. 2. Aço - Estruturas. 3. Linhas de telecomunicações. 4. Normas técnicas (Engenharia) I. Carvalho, Hermes. II. Lavall, Armando César Campos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO WARLEY ABREU E SILVA LOPES

Realizou-se, no dia 04 de outubro de 2019, às 14:00 horas, Escola de Engenharia _ sala 4409 _ bloco 1, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE TRELIÇADA AUTOPORTANTE DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EXISTENTE*, apresentada por WARLEY ABREU E SILVA LOPES, número de registro 2017691555, graduado no curso de ENGENHARIA CIVIL, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Hermes Carvalho - Orientador (UFMG), Prof(a). Armando Cesar Campos Lavall (Universidade Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 04 de outubro de 2019.

Alessandra Cristina Rodrigues Souza - Secretário(a)

Prof(a). Hermes Carvalho (Doutor)

Prof(a). Armando Cesar Campos Lavall (Doutor)

Resumo

Este trabalho apresenta a verificação do dimensionamento de uma torre metálica treliçada autoportante de linha de transmissão de energia, com base em normas atuais. Para isso, foi adotada uma estrutura existente. As ações foram citadas e calculadas ao longo do trabalho, sendo o vento a ação mais importante para esse tipo de estrutura. O objetivo deste trabalho é apresentar a rotina para o dimensionamento deste tipo de estrutura e verificar se a estrutura atende os requisitos das normas de projeto atuais. As ações e suas combinações foram determinadas conforme as recomendações das normas brasileiras ABNT NBR 6123:1988 e ABNT NBR 5422:1985, e Labegaline et. al. (1992). Para o dimensionamento da estrutura da torre de transmissão, foi adotada a norma americana ASCE 10:97, uma vez que esta é uma norma específica para o tipo de estrutura em análise, e está presente no software SAP2000 v.19. Foi desenvolvido um modelo estrutural da torre, desenhado no software AutoCAD e importado para o SAP2000, sendo os elementos definidos como elementos de treliça e viga. A estrutura foi analisada quanto ao equilíbrio e comportamento, e seu dimensionamento no SAP2000 precisou de intervenções para corrigir o comprimento destravado considerado para os elementos, baseado nas prescrições da norma ASCE 10:97. De acordo com os critérios atuais, apenas os elementos principais das mísulas da torre necessitariam de intervenções para adequação de segurança.

Palavras-chave: Torre autoportante. Linha de transmissão. Verificação do dimensionamento. Estrutura de aço.

Abstract

This study presents the checking of the design of a latticed steel transmission tower of an line power transmission, based on current standards. For this, an existing structure was adopted. The actions were quoted and calculated for this study, being that the wind is the most important action for this type of structure. The purpose of this study is to present the routine to design of this type of structure and to check if the structure meets the requirements of current design standards. The actions and their combinations were determined according to the recommendations of the Brazilian standards ABNT NBR 6123: 1988 and ABNT NBR 5422: 1985, and Labegaline et. al. (1992). For the design of the transmission tower structure, the American standard ASCE 10:97 was adopted, because it is a specific standard for the type of structure analyzed and it is included in SAP2000 v.19 software. A tower structural model was developed, designed in the AutoCAD software and imported into the SAP2000, with the elements defined as lattice elements. The structure was analyzed for balance and behavior, and its sizing in SAP2000 required interventions to correct the unbraced length considered for the elements, based on ASCE 10:97 prescriptions. According to current criteria, only the main elements of the tower arm would require interventions for safety adequacy.

Keywords: Self-suporting tower. Line transmission. Checking of the design. Steel structure.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	Torres de Transmissão.....	11
3.2	Cabos de Linhas de Transmissão.....	13
3.2.1	Cabos condutores.....	13
3.2.2	Cabos de para-raios.....	14
3.3	Ações do vento em estruturas de Linhas de Transmissão	14
3.3.1	Pressão do vento	14
3.3.2	Força de arrasto em planos reticulados.....	17
3.3.3	Força de arrasto para fios e cabos.....	20
3.3.4	Ação do vento nos isoladores de acordo com prescrições da ABNT NBR 5422:1985 21	
3.4	Estudo analítico do comportamento mecânico de cabos	21
4	ESTUDO DE CASO: A TORRE 50 DA LINHA LT-TAQUARIL ALEGRIA	23
4.1	Aspectos Gerais da Estrutura.....	23
4.2	Metodologia numérica.....	26
4.2.1	Condições de contorno impostas	28
5	MATERIAIS	29
5.1	Torre treliçada autoportante em aço	29
5.2	Cabos condutores e cabos para-raios.....	29

5.3	Isoladores.....	30
6	AÇÕES	31
6.1	Ações Permanentes.....	31
6.1.1	Reação vertical devido aos cabos - Cabo condutor Linnet 336,4 MCM e Cabo para-raios HS 5/16 in.....	31
6.1.2	Peso próprio - Cadeia de isoladores.....	31
6.2	Ações Variáveis.....	32
6.2.1	Ação do vento sobre a torre:.....	32
6.2.2	Ação do vento sobre os cabos condutores e cabos para-raios:	35
6.2.3	Ação do vento sobre a cadeia de isoladores:	37
6.2.4	Suporte em ângulo de até 3°	38
6.2.5	Rompimento de cabo	40
6.2.6	Temperatura.....	40
6.3	Combinações de ações.....	40
7	ANÁLISE E RESULTADOS	42
7.1	Resultados com a atuação do peso próprio da estrutura e cabos	42
7.2	Resultados com a atuação de única força transversal no topo da torre	45
8	DIMENSIONAMENTO	45
8.1	Barras à Compressão	46
8.1.1	Índice de Esbeltez Efetivo (KL/r).....	48
8.2	Barras tracionadas.....	50
8.3	Intervenções para o dimensionamento no software SAP2000	51
8.4	Resultados do Dimensionamento no Software SAP2000.....	52
9	CONCLUSÃO	56

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a rede de transmissão de energia elétrica ocupa grande extensão do território, e possibilita à população utilizar a energia produzida em diferentes regiões do país. Segundo a ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, “a capacidade instalada para geração de energia elétrica do SIN (Sistema Interligado Nacional) é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas em regiões distintas do país”. Estas usinas hidrelétricas, em sua maioria, situam-se em regiões afastadas dos grandes centros de consumo do país, o que exige uma malha de transmissão de energia eficiente, confiável e que possibilite otimizar a transmissão e geração de energia.

A transmissão pode ser realizada por linhas aéreas, subterrâneas ou subaquáticas, sendo convencional no Brasil a utilização de linhas aéreas, caracterizadas por possuírem cabos condutores nus e para-raios, que percorrem toda a extensão da linha sustentados e espaçados por estruturas conhecidas como suportes. Tais estruturas são classificadas quanto à forma de resistir às ações, definidas como autoportantes ou estaiadas, podendo ser projetadas como torres treliçadas com perfis de aço galvanizado ou postes de aço, concreto ou madeira. As torres treliçadas em aço são as mais comuns, pois possuem vantagens como a velocidade de execução da obra, menor mobilização de pessoal, material e equipamentos durante sua montagem.

O crescimento populacional em conjunto com o avanço tecnológico no país tem como consequência a crescente demanda por energia elétrica, e com isso, o aprimoramento da infraestrutura de transmissão de energia elétrica é inevitável.

A ANEEL, em 28 de junho de 2018, realizou o leilão da transmissão com empreendimentos de transmissão de energia elétrica que propiciarão investimentos da ordem de R\$ 6 bilhões. O leilão teve o objetivo de conceder serviço público de transmissão de energia elétrica, incluindo a construção, montagem, operação e manutenção das instalações de transmissão. Serão 12.223 megavolt-ampères (MVA) de expansão da capacidade de instalações e 2.563 km de linhas de transmissão.

Diante desse cenário, a confiabilidade de uma linha de transmissão de energia elétrica passa pelo bom dimensionamento das estruturas das torres de transmissão para suportar os esforços solicitantes, com base nas normas de referência. Principalmente porque a linha de transmissão é um sistema em série, e a falha de um subsistema, como a torre de sustentação, causa a falha de todo o sistema.

Atualmente, existem duas normas da ABNT que apresentam critérios, orientações e considerações para a estimativa das forças decorrentes da ação do vento em estruturas treliçadas, que são a NBR 5422/1985 – “Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica” e a NBR 6123/1988 – “Forças Devidas ao Vento em Edificações”.

No dimensionamento de uma torre treliçada autoportante de linha de transmissão, a utilização de uma norma específica à esta categoria de estruturas é fundamental para um dimensionamento mais econômico, eficiente e seguro. Para tal, uma opção adotada neste trabalho, é a norma americana ASCE 10-97: “Design of Latticed Steel Transmission Structures”, da American Society of Civil Engineers, baseada no Método das Tensões Admissíveis.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar a análise e a verificação do dimensionamento de uma torre metálica treliçada autoportante de transmissão de energia elétrica existente, a luz de critérios atuais aplicáveis ao dimensionamento dessa classe de estrutura. Para isso, será tomada como referência uma torre de suspensão da linha de transmissão Taquaril-Alegria/MG, de propriedade da CEMIG e construída em 1983.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Torres de Transmissão

As torres de linhas de transmissão aéreas são responsáveis pela manutenção das distâncias de segurança entre os cabos, da altura de segurança em relação ao solo e dos distanciamentos mínimos de segurança entre toda parte energizada da linha de transmissão e qualquer outro elemento ou obstáculo.

De acordo com Gontijo (1994), as torres metálicas treliçadas podem ser classificadas quanto aos seguintes critérios:

- *Disposição dos condutores*: Como ilustrado na FIGURA 1, os condutores podem ser dispostos conforme as seguintes classificações: Triangular; Vertical e Horizontal.

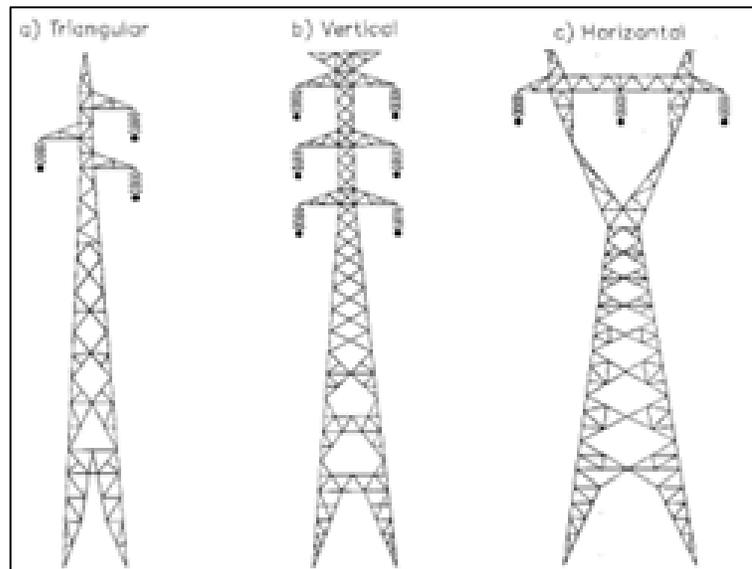


FIGURA 1 - (a) Triangular, (b) Vertical; (c) Horizontal;

- *Número de circuitos*: Um circuito ou dois circuitos.

- *Função na linha*: Estrutura de suspensão; estrutura de ancoragem; estrutura em ângulo; estrutura de derivação; estrutura de transposição.

As estruturas podem ser estabilizadas por si só, denominadas estruturas autoportantes, ou estabilizadas por cabos, estruturas estaiadas.

As **estruturas autoportantes**, ilustrada na FIGURA 2(a), são estruturas únicas, apoiadas diretamente no solo em três ou quatro pontos, que transferem todos os esforços, sejam horizontais, longitudinais ou verticais, para sua fundação e conseqüentemente ao solo. Tem como vantagens a ocupação de áreas menores e menor custo de manutenção. As torres autoportantes podem ser da forma Tronco-Piramidal, Delta; Delta (Cara de Gato). A torre metálica treliçada em análise neste trabalho trata-se de uma torre autoportante de suspensão, triangular, do tipo tronco-piramidal.

Nas **estruturas estaiadas**, ilustrada na FIGURA 2(b), os esforços horizontais transversais e longitudinais são absorvidos pelos tirantes ou estais, os quais partem da extremidade superior da torre em direção ao terreno, onde são fixados em tirantes com fundações resistentes aos esforços de tração característicos destas estruturas, e conseqüentemente, as componentes das resultantes horizontais são transmitidas ao solo. A desvantagem deste tipo de estrutura é a necessidade de áreas maiores para a faixa de servidão dos estais. Além disso, a sua instalação deve ocorrer em terrenos com topografia regular. Tem como vantagem o menor peso e menor custo de construção.

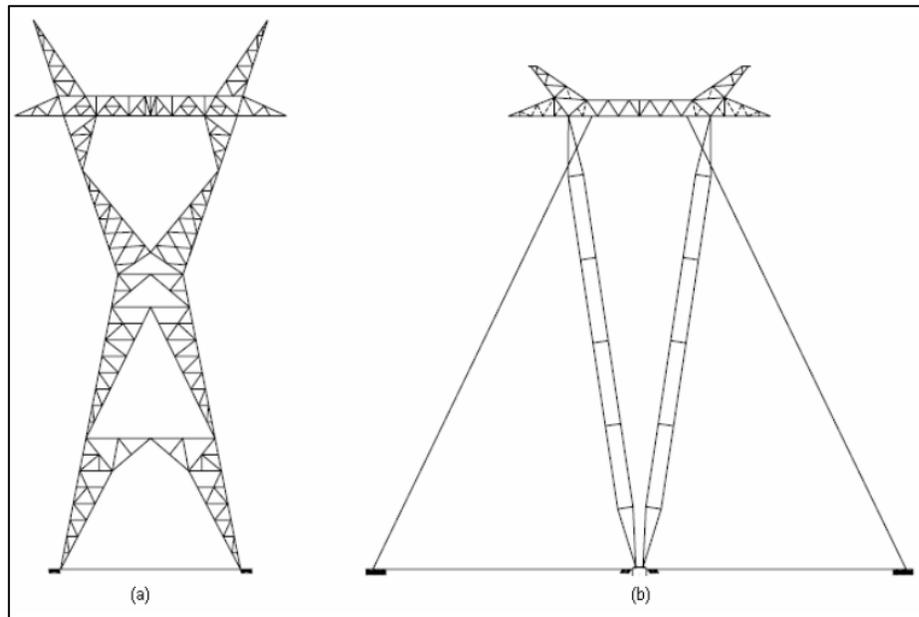


FIGURA 2 - (a) Torre Autoportante, (b) Torre Estaiada

A tensão de operação da linha de transmissão é um parâmetro importante para a definição do diâmetro dos cabos condutores, das distâncias entre eles e das distâncias às partes não energizadas, em resumo, é responsável por definir a disposição dos condutores na torre. Entre as tensões mais utilizadas estão: 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV e 765 kV.

3.2 Cabos de Linhas de Transmissão

3.2.1 Cabos condutores

São os cabos com a função de transportar a energia das usinas de geração de energia até as centrais de distribuição. São considerados o elemento ativo da linha de transmissão. Em uma linha de transmissão aérea, os cabos são nus, podendo ser de alumínio (CA), liga de alumínio-aço e alumínio com alma de aço (CAA).

CA - Cabo de Alumínio: condutor formado exclusivamente de fios de alumínio, dispostos concentricamente em relação a um fio central, formando coroas compostas de fios torcidos helicoidalmente. A quantidade de fios varia de acordo com a necessidade de cada projeto.

CAA - Cabo de Alumínio com Alma de Aço: condutor formado por uma alma de aço e coroas de fios de alumínio.

A FIGURA 3 apresenta um exemplo de cada um dos cabos condutores.

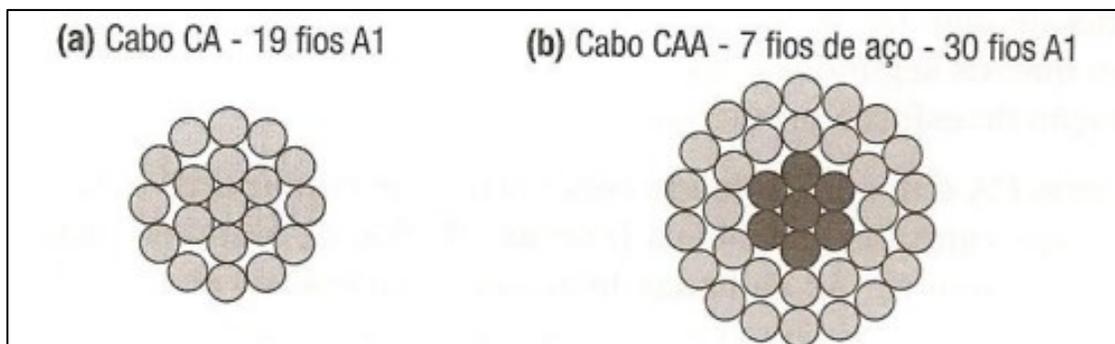


FIGURA 3: Cabos Condutores de Transmissão de Energia Elétrica

3.2.2 Cabos de para-raios

Os cabos para-raios têm a função de blindar os cabos condutores da incidência direta de descargas atmosféricas a que estão expostos, sendo um caminho de menor resistência até o solo. Eles são posicionados na parte superior das torres de transmissão e diminuem as possibilidades de interrupções do fornecimento de energia elétrica.

3.3 Ações do vento em estruturas de Linhas de Transmissão

3.3.1 Pressão do vento

De acordo com a ABNT NBR 6123:1988, as forças estáticas consequentes da ação do vento podem ser determinadas a partir de uma velocidade básica do vento (V_0), definida como a velocidade de uma rajada em 3 s, superada uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano. Esta pode ser definida a partir do mapa de isopletas de velocidades básicas do vento para cada região do país (FIGURA 4).

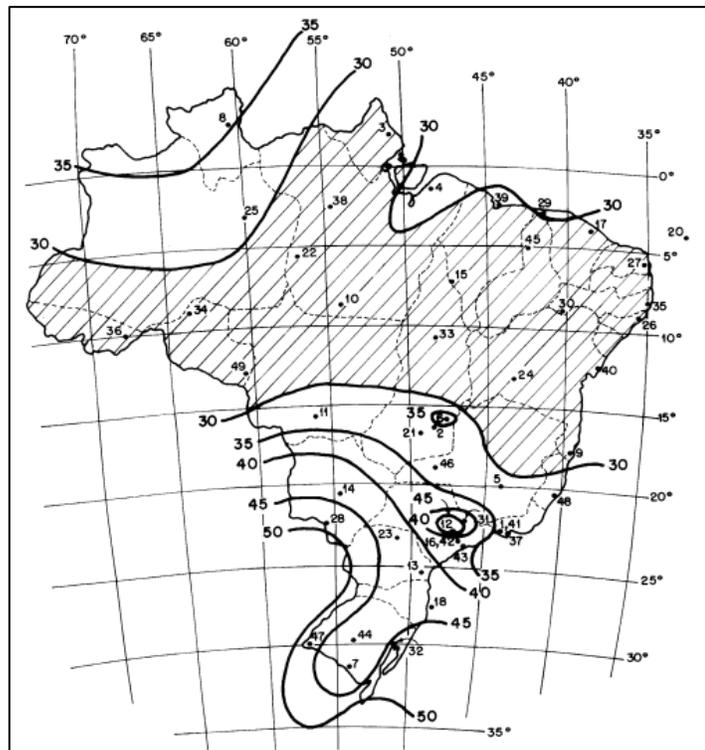


FIGURA 4 – Isopletas de velocidade básica V_0 (m/s) (ABNT NBR 6123:1988)

Multiplica-se a velocidade básica do vento pelos fatores S_1 , S_2 , S_3 para obter a velocidade característica do vento (V_k), referente à estrutura em análise.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (3-1)$$

A pressão dinâmica do vento (q_0) pode ser definida conforme a EQ. (3-2) abaixo:

$$q_0 = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (3-2)$$

O fator topográfico S_1 leva em consideração o relevo do terreno.

O fator S_2 considera uma combinação de três características do meio e da edificação, tais como a classe de rugosidade do terreno, a variação da velocidade do vento com a altura da edificação em relação ao solo e as dimensões da edificação.

A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias:

Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões como mar calmo, lagos, rios e pântanos sem vegetação.

Categoria II: Terrenos abertos em nível com poucos obstáculos, como algumas árvores ou edificações baixas. Como exemplos pode-se citar as zonas costeiras planas, campos de aviação, pradarias e charnecas, fazendas sem muros e pântanos com vegetação rala.

Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como edificações baixas e esparsas, sebes ou muros.

Categoria IV: terrenos em zona florestal, industrial ou urbanizada, cobertos por numerosos obstáculos e pouco espaçados.

Categoria V: terrenos cobertos por numerosos obstáculos altos, grandes e pouco espaçados. Cota média do topo dos obstáculos considerada igual ou superior a 25 m.

Quanto às dimensões da edificação, a norma divide em três classes:

Classe A: Edificações nas quais a maior dimensão vertical ou horizontal não supere 20 m.

Classe B: Edificações nas quais a maior dimensão vertical ou horizontal da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

Classe C: Edificações nas quais a maior dimensão vertical ou horizontal da superfície frontal supere 50 m.

Uma vez definida a classe de dimensões da estrutura e a categoria do terreno, e considerando a altura z acima do solo, o valor final do parâmetro S_2 pode ser obtido com base na EQ. (3-3).

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot (z/10)^p \quad (3-3)$$

A ABNT NBR 6123:1988 define os parâmetros que permitem determinar o fator S_2 para as cinco categorias de rugosidade do terreno, conforme a TABELA 1.

TABELA 1 – Parâmetros para o cálculo do fator S_2 .

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
III	350	p	0,085	0,09	0,10
		b	0,94	0,94	0,93
IV	420	p	0,10	0,105	0,115
		b	0,86	0,85	0,84
V	500	p	0,12	0,125	0,135
		b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos, como a probabilidade de a velocidade básica do vento (V_0) ser igualada ou superada para um determinado período de recorrência médio, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. A norma considera adequado e adota para edificações normais (moradias, escritórios, hotéis, etc.) o nível de probabilidade de 0,63 e vida útil de 50 anos, o que implica no fator estatístico S_3 igual a 1. A TABELA 2 descreve diferentes grupos de edificações indicando seus respectivos fatores S_3 .

TABELA 2 – Fatores S_3 .

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

3.3.2 Força de arrasto em planos reticulados

A ABNT NBR 6123:1988 define como estrutura reticulada uma estrutura constituída por barras retas. Para essas, a força de arrasto pode ser calculada pela EQ. (3-4):

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (3-4)$$

Onde, C_a é o coeficiente de arrasto do painel, q é a pressão dinâmica do vento e A_e é a área frontal efetiva. A área frontal efetiva corresponde à área da projeção ortogonal das barras de uma das faces da torre reticulada sobre um plano perpendicular à direção do vento.

A FIGURA 5 apresenta os valores do coeficiente de arrasto (C_a) para torres reticuladas constituídas por barras prismáticas de faces planas com cantos vivos ou levemente arredondados.

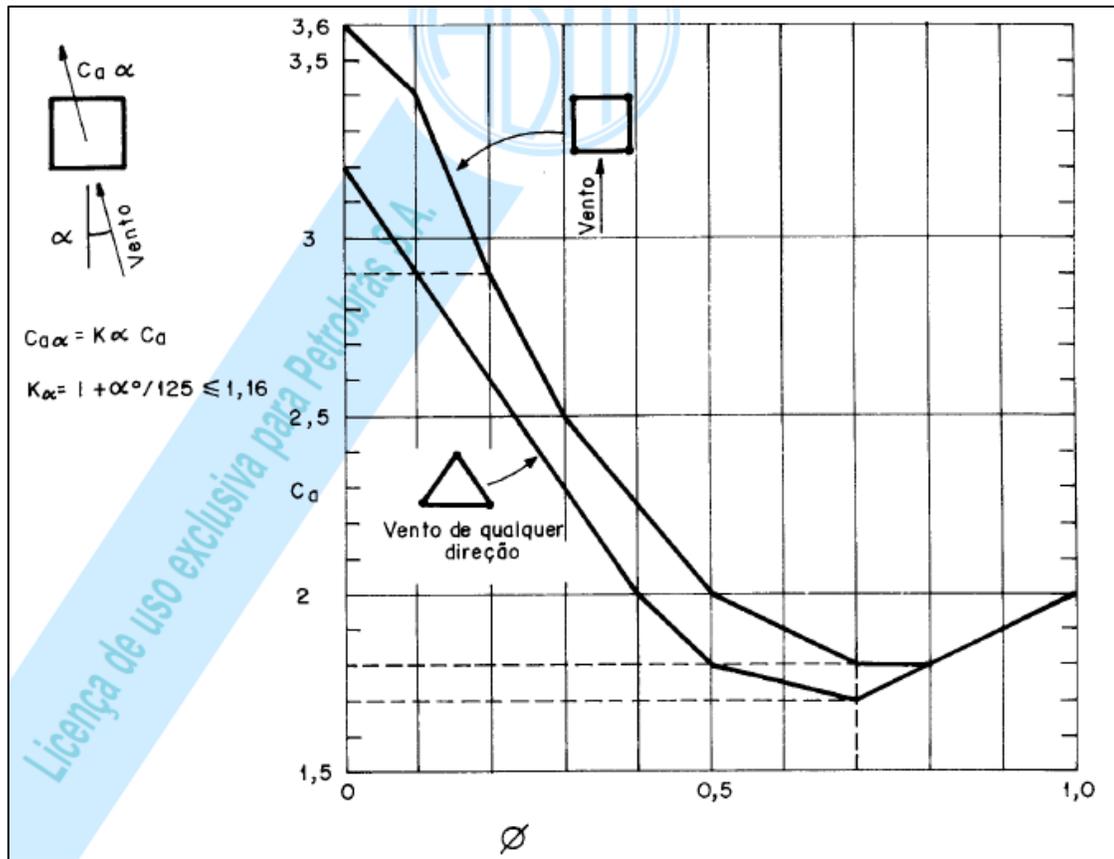


FIGURA 5 – Coeficiente de arrasto, C_a , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados (ABNT NBR 6123:1988)

O índice de área exposta (\emptyset) é igual à área frontal efetiva do reticulado dividida pela área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado.

Para torres reticuladas de seção quadrada e vento incidindo com um ângulo α em relação ao eixo normal à face, o coeficiente de arrasto ($C_{a\alpha}$) é calculado conforme a EQ. (3-5):

$$C_{a\alpha} = K_{\alpha} \cdot C_a \quad (3-5)$$

$$K_{\alpha} = 1 + \alpha^2/125 \quad 0^\circ < \alpha < 20^\circ$$

$$K_{\alpha} = 1,16 \quad 20^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$$

No caso de torres de seção triangular equilátera, a força do vento pode ser considerada constante para qualquer ângulo de incidência do vento.

Para torres constituídas por dois ou mais reticulados planos paralelos e equidistantes, onde o reticulado de barlavento provoque efeito de proteção aos demais reticulados, as forças do vento nas partes protegidas dos reticulados devem ser multiplicadas por um fator redutor de proteção (η) que depende do índice de área exposta (\emptyset) do reticulado situado imediatamente a barlavento e do respectivo afastamento relativo e/h (FIGURA 6).

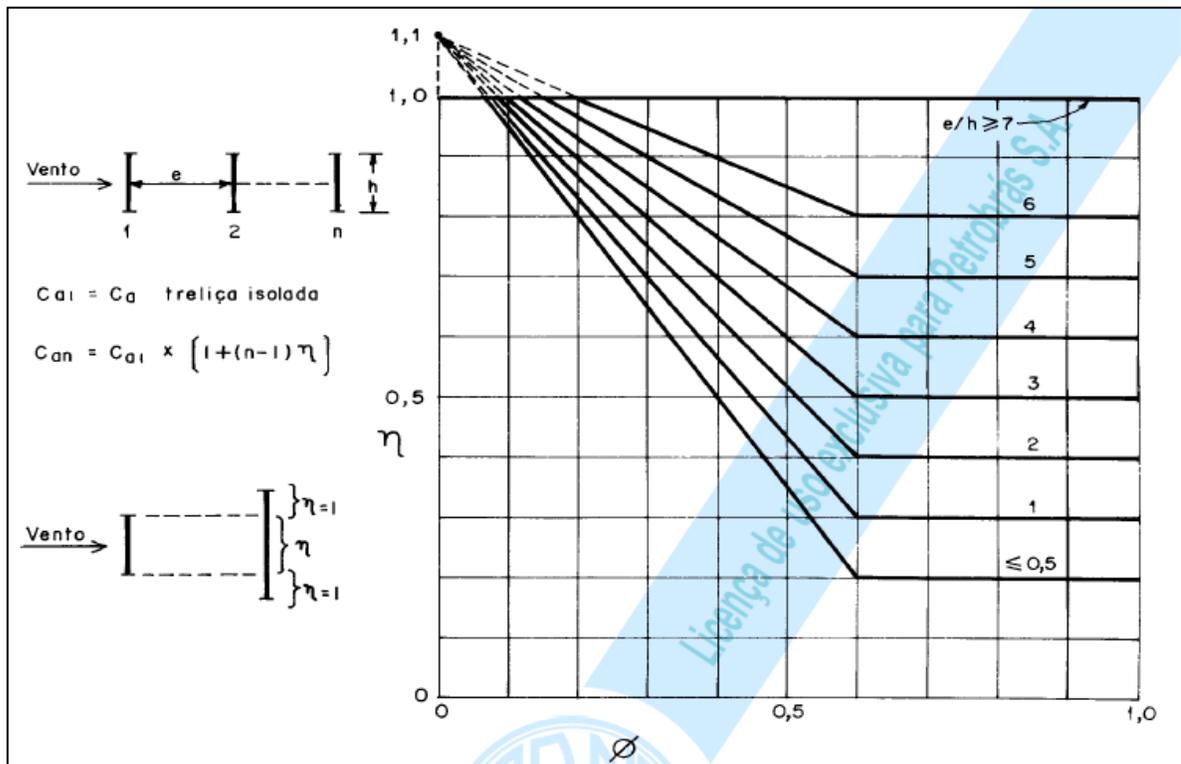


FIGURA 6 – Fator de proteção, η , para dois ou mais reticulados planos paralelos igualmente afastados (ABNT NBR 6123:1988).

No caso de torres reticuladas constituídas por barras prismáticas de faces planas e/ou por barras de seção circular de um ou mais diâmetros diferentes, os respectivos coeficientes são aplicados proporcionalmente às áreas frontais das barras. O índice de área exposta refere-se sempre ao conjunto de todas as barras de uma das faces da torre.

As componentes da força de arrasto nas faces da torre, podem ser obtidas multiplicando F_a pelos valores dados na FIGURA 7.

Direção do vento		Face I	Face II	Face III	Face IV
	n	$\frac{l}{l+\eta}$	0	$\frac{\eta}{l+\eta}$	0
	t	0	0	0	0
	n	0,20	0,20	0,15	0,15
	t	0,20	0,20	0,15	0,15
	n	0,57	0,11	0,11	—
	t	0	0,19	0,19	—
	n	0,50	0	0,37	—
	t	0,29	0	0,21	—
	n	0,14	0,14	0,43	—
	t	0,25	0,25	0	—
n : componente perpendicular à face t : componente paralela à face					

FIGURA 7 – Componentes de força de arrasto nas faces de torres reticuladas de seção quadrada ou triangular equilátera (ABNT NBR 6123:1988).

3.3.3 Força de arrasto para fios e cabos

Com base na ABNT NBR 6123:1988, para fios e cabos a força de arrasto (F_a), aplicada nos pontos de apoio dos fios e cabos no suporte (torre), pode ser calculada pela EQ. (3-6):

$$F_a = C_a \cdot q_0 \cdot (L/2) \cdot d \cdot \text{sen}^2 \beta \quad (3-6)$$

Onde, C_a é o coeficiente de arrasto, d o diâmetro do cabo em metros, β é o ângulo formado pela direção do vento em relação à direção do cabo, q_0 a pressão dinâmica do vento e L o comprimento desenvolvido do cabo considerado (em metros).

3.3.4 Ação do vento nos isoladores de acordo com prescrições da ABNT NBR 5422:1985

A ABNT NBR 5422:1985 – Projeto de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica – prescreve que a força decorrente da ação do vento sobre isoladores, aplicado na direção do vento no ponto de suspensão da cadeia de isoladores, é definida pela EQ. (3-7) abaixo:

$$F_i = q_0 \cdot C_{xi} \cdot S_i \quad (3-7)$$

Onde F_i é a força resultante da ação dos ventos sobre os isoladores, q_0 é a pressão dinâmica do vento, C_{xi} é o coeficiente de arrasto considerado igual a 1,2, e S_i é a área da cadeia de isoladores projetada ortogonalmente sobre um plano vertical.

A velocidade do vento para o cálculo da pressão deve ser considerada na altura do centro de gravidade da cadeia de isoladores.

3.4 Estudo analítico do comportamento mecânico de cabos

As estruturas da linha de transmissão tais como as torres metálicas são elementos de sustentação dos cabos condutores e para-raios, e as ações mecânicas que são transmitidas por estes cabos são preponderantes para o dimensionamento destas estruturas.

Um cabo suspenso e estendido entre dois pontos suficientemente afastados e elevados, de forma que ele não toque no solo, apresenta uma forma característica denominada catenária. Os pontos de suspensão podem estar a uma mesma altura ou possuírem alturas distintas, como ocorre na maioria dos casos.

Segundo Labegaline et. al. (1992), o comprimento final da catenária e a reação vertical devida ao peso próprio dos cabos podem ser calculados, aproximadamente, através das seguintes equações:

- i. Comprimento desenvolvido pelo cabo

$$L = \sqrt{B^2 + A^2 \cdot \left(1 + \frac{A^2}{12 \cdot C_1^2}\right)} \quad (3-8)$$

$$C_1 = \frac{T_o}{p}$$

- ii. Força vertical no suporte superior

$$V_A = \frac{A \cdot p}{2} + \frac{h \cdot T_o}{A} \quad (3-9)$$

- iii. Força vertical no suporte inferior

$$V_B = \frac{A \cdot p}{2} - \frac{h \cdot T_o}{A} \quad (3-10)$$

- iv. Tração no cabo no ponto de suspensão do suporte superior

$$T_A = T_o + \frac{Ae^2 \cdot p^2}{8 \cdot T_o} \quad (3-11)$$

onde, $A_e = A + \frac{2 \cdot h \cdot T_o}{A \cdot p}$

- v. Tração no cabo no ponto de suspensão do suporte inferior

$$T_B = T_o + p \cdot \left(\frac{A_e^2 \cdot p}{8 \cdot T_o} - h \right) \quad (3-12)$$

Onde A é o vão entre suportes, $h = B$ é a diferença de altura entre os suportes, A_e é o vão equivalente da linha, p é o peso unitário do cabo, L é o comprimento desenvolvido do cabo e T_o é a componente horizontal da força de tração (tangente) do cabo.

4 ESTUDO DE CASO: A TORRE 50 DA LINHA LT-TAQUARIL ALEGRIA

4.1 Aspectos Gerais da Estrutura

Para o estudo em questão será tomada como exemplo a mesma torre metálica treliçada autoportante utilizada em Carvalho (2010), situada em uma linha de transmissão da CEMIG fase/fase com tensão de 138 kV, denominada LT Taquaril – Alegria.

A FIGURA 8 apresenta uma fotografia de satélite da região considerada da linha LT Taquaril – Alegria, indicando a posição da torre em estudo (50) e das adjacentes (49 e 51).

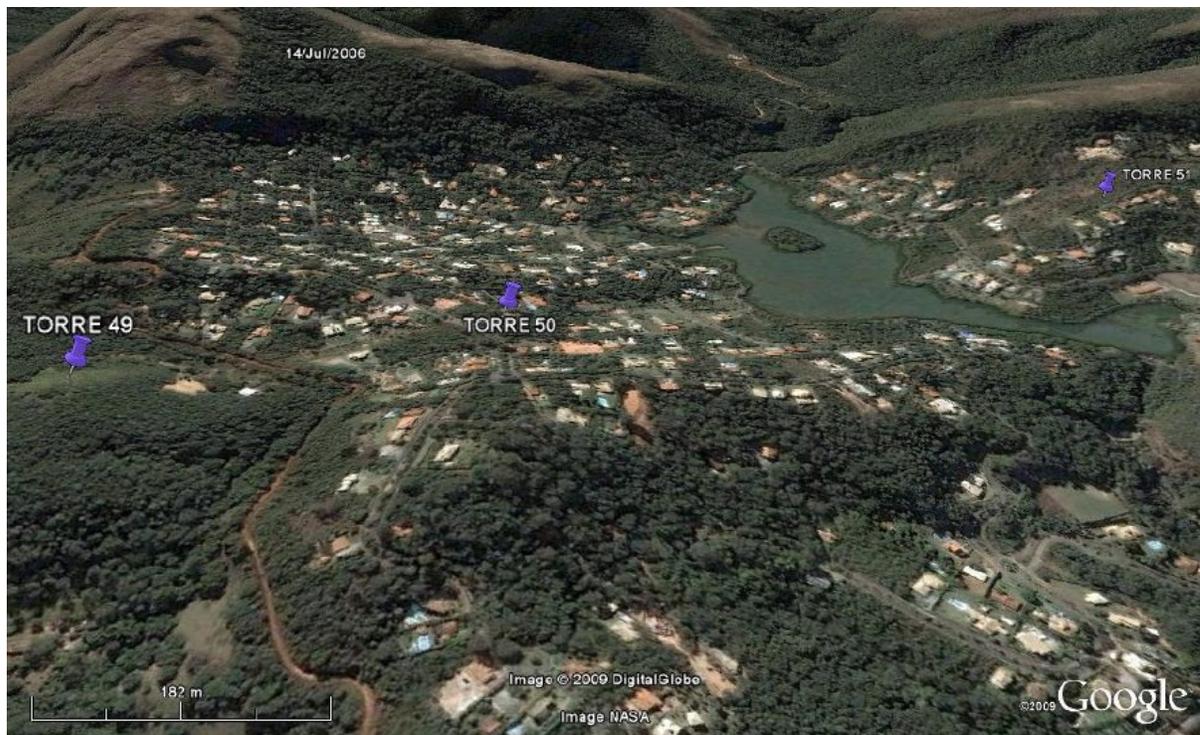


FIGURA 8 – Figura de satélite da região da linha em estudo (Carvalho (2010)).

A torre 50 encontra-se em alinhamento reto do trecho da linha de transmissão, é do tipo suspensão, possui 28 metros de altura, e é composta por perfis cantoneiras com padrões em polegadas e ligações parafusadas. Pertence a um sistema composto por três condutores elétricos em disposição triangular do tipo Linnet 336,4 MCM e um cabo para-raios HS 5/16 in. Os vãos adjacentes à torre analisada são de 400 e 882 metros respectivamente, sendo as cadeias de isoladores compostas por discos com corpo isolante de vidro temperado (255 x 146 mm) com 1,62 m de comprimento. A FIGURA 9 apresenta a geometria e as principais dimensões da estrutura da torre em análise.

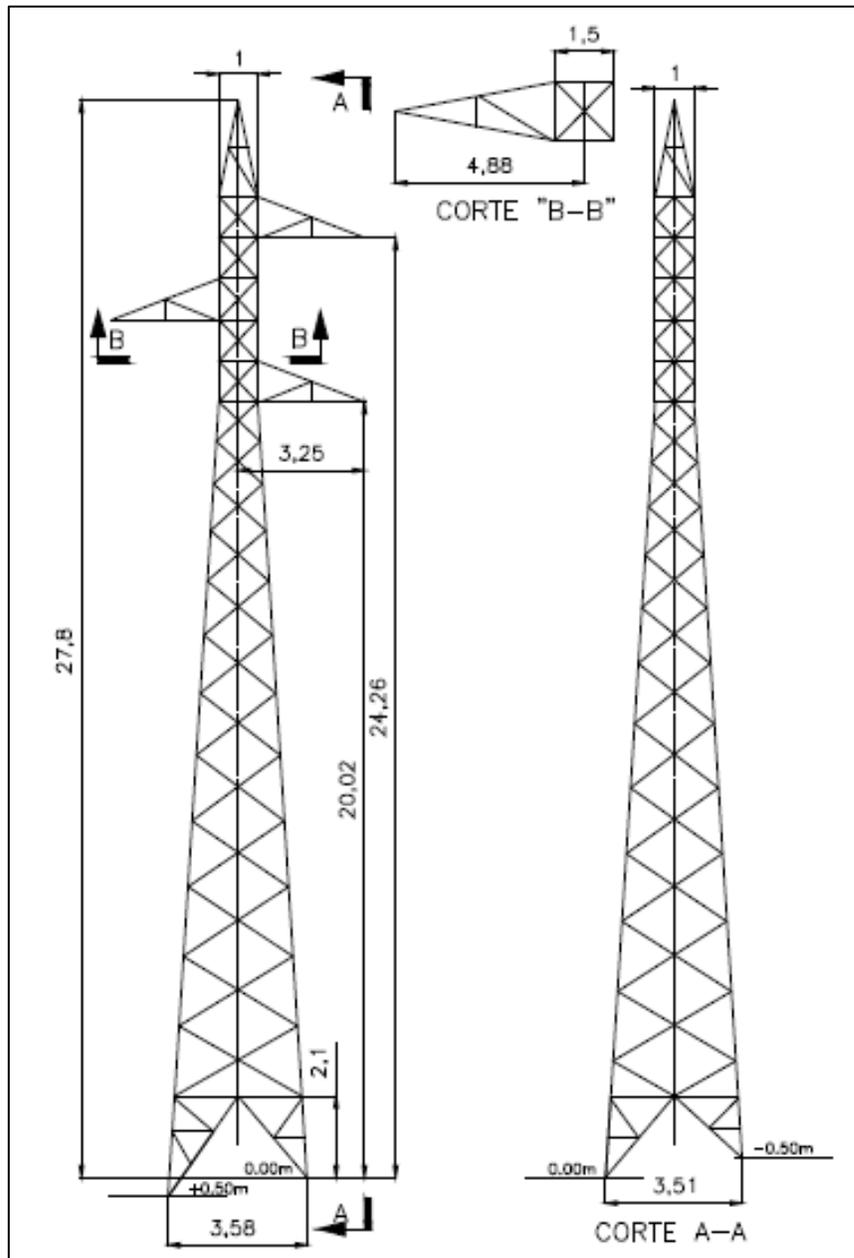


FIGURA 9 – Geometria e dimensões gerais da torre analisada [m] (Carvalho (2010)).

A FIGURA 10 a seguir, apresenta um esquema com a torre em estudo no centro (torre 50), as torres adjacentes (torre 49 à esquerda e torre 51 à direita) e os respectivos vãos dos cabos entre as torres.

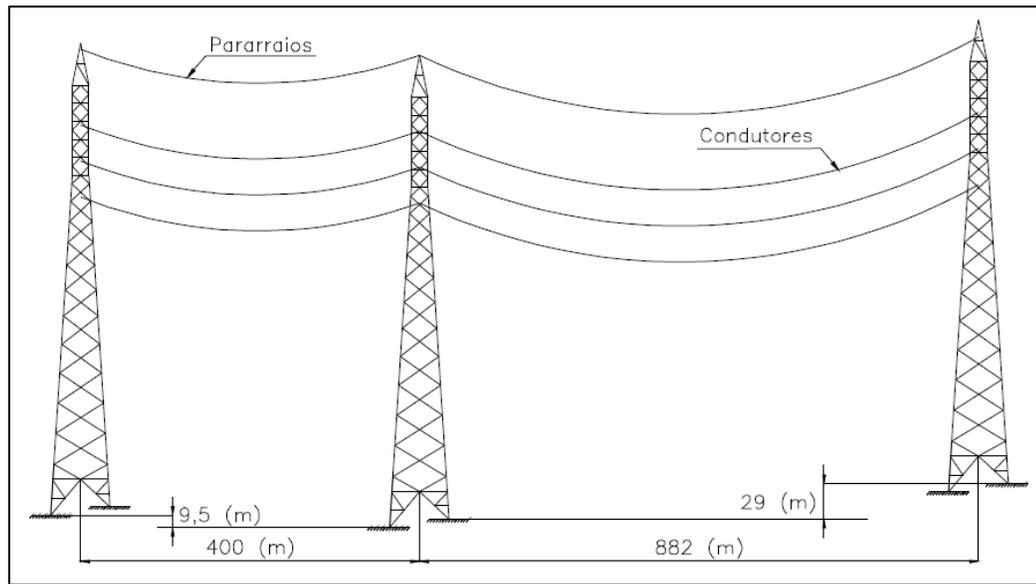


FIGURA 10 – Esquema do trecho da linha de transmissão analisado (Carvalho (2010)).

4.2 Metodologia numérica

A modelagem da estrutura em elementos finitos foi realizada através do programa computacional SAP2000 v.19. Foi construído um modelo simplificado contendo somente a torre 50 para a avaliação dos esforços solicitantes nos elementos estruturais devidos às ações externas. Neste modelo foram seguidas, para a determinação das ações do vento, predominantemente as prescrições apresentadas na norma ABNT NBR 6123:1988 e em alguns casos as prescrições da norma ABNT NBR 5422:1985 foram utilizadas. Também foram considerados os desnivelamentos das torres para o cálculo dos comprimentos desenvolvidos e das forças devidas ao peso próprio dos cabos condutores e para-raios.

O modelo estrutural simplificado da torre de transmissão (50) foi desenhado no software AutoCAD 2016 e importado para o SAP2000 v.19, com as seções transversais dos elementos apresentadas na FIGURA 11.

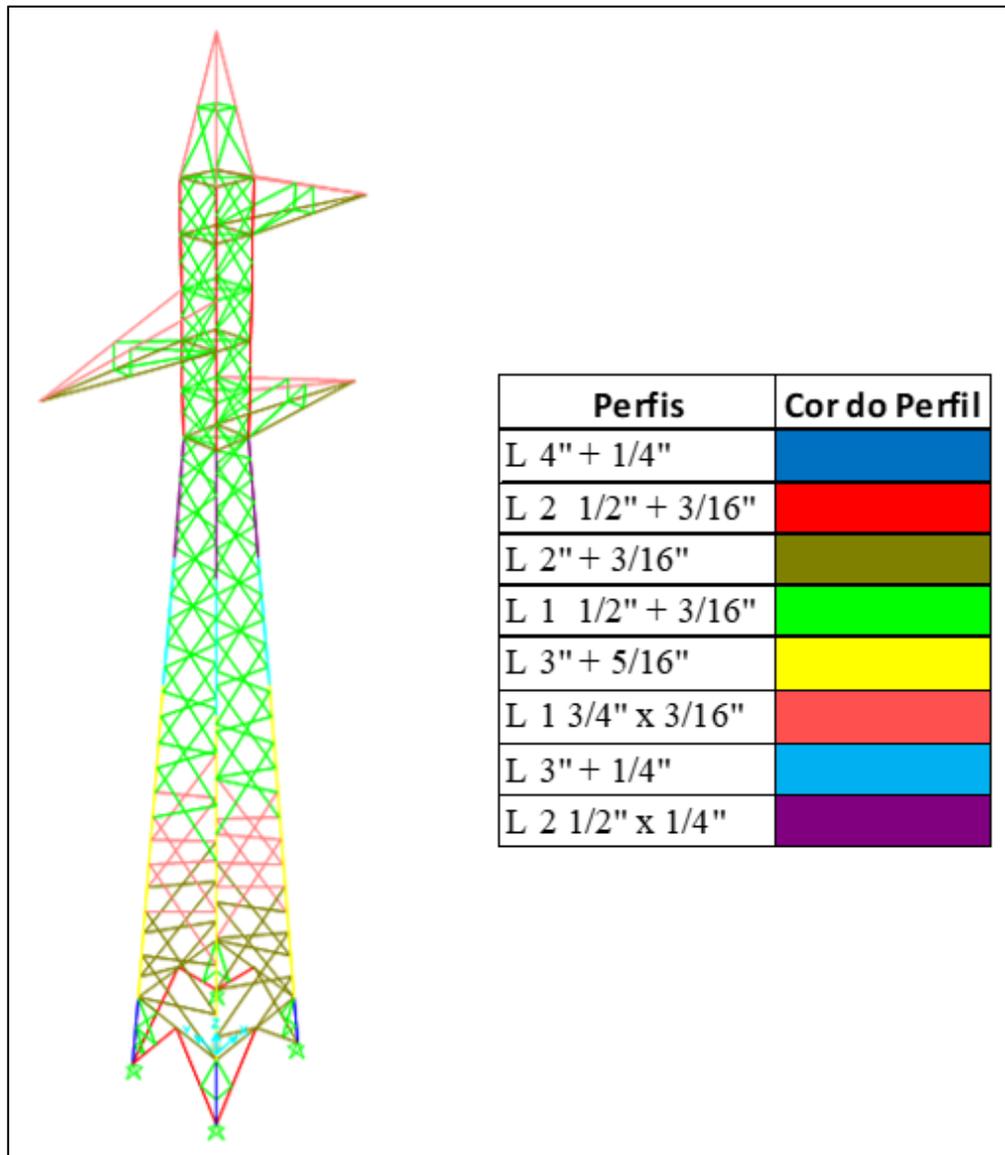


FIGURA 11 – Identificação dos perfis utilizados na estrutura.

A FIGURA 12 apresenta o modelo estrutural tridimensional desenvolvido, assim como seu sistema de coordenadas utilizado no programa SAP2000.

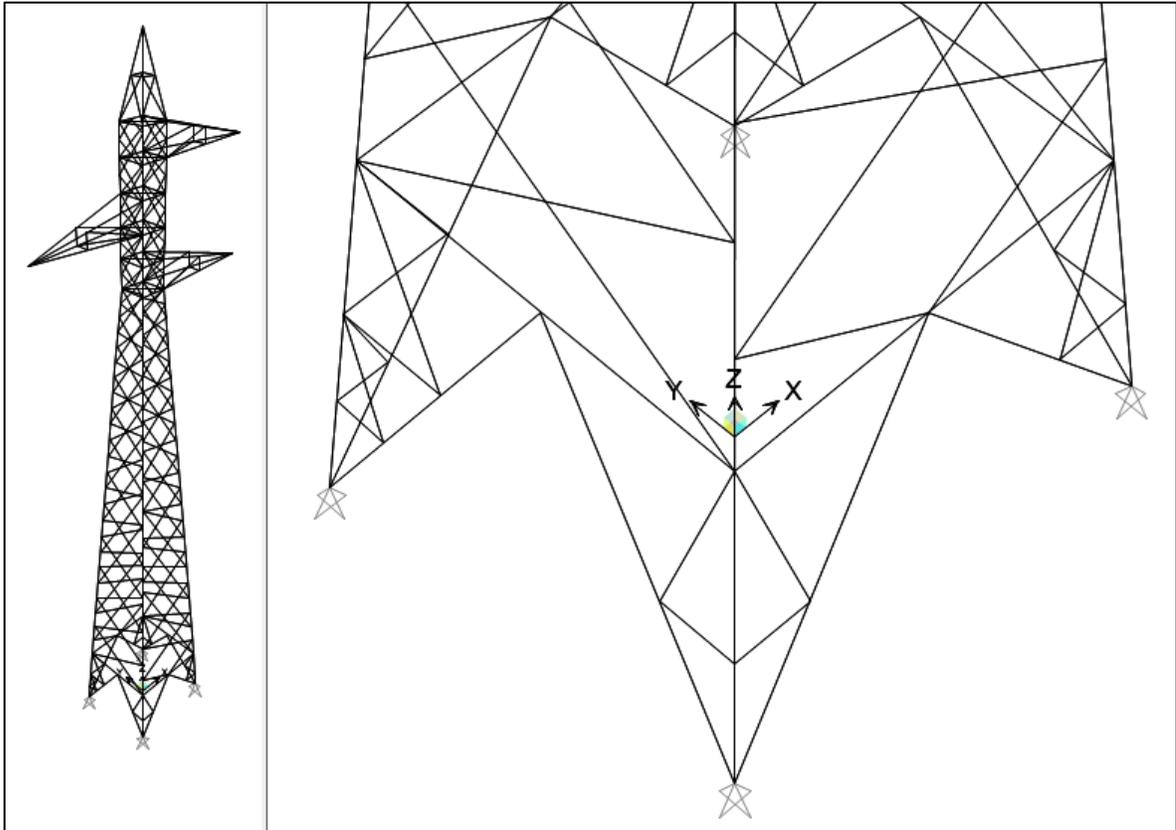


FIGURA 12 – Modelo estrutural tridimensional e sistema de coordenadas da torre de transmissão.

As barras da torre foram consideradas como elementos de treliça, ou seja, possuem nós com apenas três graus de liberdade. Os montantes e os pontaletes das mísulas podem ser consideradas como elementos de viga.

4.2.1 Condições de contorno impostas

Foram aplicadas restrições apenas às três translações nos nós da base da torre, simulando a indeslocabilidade das bases fixadas aos pontos de fundação em concreto. Estas condições de contorno aplicadas podem ser vistas na FIGURA 12.

5 MATERIAIS

5.1 Torre treliçada autoportante em aço

A torre em estudo é constituída por perfis cantoneira em aço ASTM A-36, sendo:

- _ Módulo de Elasticidade = 200 GPa,
- _ Coeficiente de Poisson = 0,3
- _ Densidade = 7850 kg/m³.
- _ Resistência ao escoamento (f_y): 250 MPa
- _ Resistência à ruptura (f_u): 400 MPa

5.2 Cabos condutores e cabos para-raios

As propriedades dos cabos presentes na linha de transmissão em análise estão apresentadas na TABELA 3. Estas propriedades foram retiradas do catálogo de produtos do fabricante (NEXANS, 2003).

TABELA 3 – Propriedades dos cabos condutores e cabos para-raios

Propriedades	Cabo Conductor - Linnet 336,4 MCM	Cabo Para-raios - HS 5/16 in
Diâmetro [mm]	18,3	7,95
Material	Alumínio com alma de aço	Aço
Módulo de Elasticidade [GPa]	55,6	200
Carga de Ruptura [kgf]	6393	3630
Peso Linear [kgf/km]	688,3	305
EDS (<i>Every Day Stress</i>)	18,5%	16%
Coef. de Dilatação Linear – (α) [1/°C]	23×10^{-6}	$11,52 \times 10^{-6}$

A EDS (*Every Day Stress*) é definida como a força de tração de maior duração nos cabos após o seu lançamento, dada em relação ao valor da força de ruptura em (%). Nesta tração é considerado

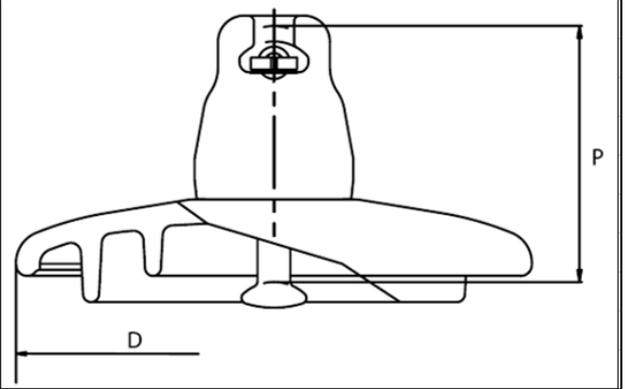
o efeito da atuação do peso próprio somado à tração imposta ao cabo para a obtenção da catenária de projeto.

5.3 Isoladores

Foi considerado a utilização dos isoladores de suspensão de vidro temperado Sediver fabricado pela Electrovidro do Grupo Internacional Seves, cujas propriedades estão apresentadas no TABELA 4. As informações e propriedades apresentadas foram retiradas do catálogo técnico do fabricante (SEDIVER, 2009).

TABELA 4 – Propriedades dos isoladores de vidro temperado Sediver

Perfil Padrão - Tipo concha bola	
Tensão de Utilização	até 230 kV
Designação	F100/146
Carga mecânica de ruptura [kN]	100
Resistência de impacto [mN]	45
Carga mecânica de rotina [kN]	50
Diâmetro (D) [mm]	255
Passo (P) [mm]	146
Distância de escoamento [mm]	320
Peso líquido aproximado [kg]	4



Segundo descrito no catálogo técnico (SEDIVER, 2009), os isoladores de perfil padrão apresentam nervuras inferiores bem espaçadas e uma distância de escoamento superior ao exigido pelas normas.

No caso da linha de transmissão em estudo, foi utilizado uma cadeia de isoladores formada por 11 unidades de isoladores F100/146.

6 AÇÕES

6.1 Ações Permanentes

6.1.1 Reação vertical devido aos cabos - Cabo condutor Linnet 336,4 MCM e Cabo para-raios HS 5/16 in

Baseado nas propriedades apresentadas no TABELA 3 e nas equações: EQ. (3-8) a EQ. (-12), foram definidas as reações de apoio na torre 50 decorrentes do peso dos cabos, apresentadas na TABELA 5.

TABELA 5 – Reações de apoio na torre 50 devido ao peso dos cabos

Propriedades	Cabo Condutor - Linnet 336,4 MCM		Cabo Para-raios - HS 5/16 in	
	882 m	400 m	882 m	400 m
Vão entre suportes (A)	882 m	400 m	882 m	400 m
Diferença de altura entre suportes (h)	29 m	9,5 m	29 m	9,5 m
$T_0 = EDS \times \text{Carga de Ruptura}$ - [kgf]	1182,7	1182,7	580,8	580,8
Peso Linear (p) - [kgf/m]	0,6883	0,6883	0,305	0,305
Comprimento Desenvolvido (L) - [m]	892,09	401,01	890,32	400,85
Peso Próprio - [kgf]	614,03	276,02	271,55	122,26
Reação vertical na torre 50 considerando o desnível (V_B) - [kgf]	264,52	96,77	115,41	47,21

A Torre 50 está posicionada em uma cota inferior às torres adjacentes, por isso tem suas reações verticais menores que a metade dos valores dos pesos próprios dos cabos.

6.1.2 Peso próprio - Cadeia de isoladores

Com base nas propriedades dos isoladores de vidro temperado F100/146 apresentados na TABELA 4, foi calculado o peso da cadeia de isoladores, demonstrado na TABELA 6.

TABELA 6 – Peso Próprio da Cadeia de Isoladores

Cadeia de Isoladores de Vidro Temperado F100/146	
Peso unitário dos isoladores - [kgf]	4
Peso da cadeia de isoladores (11 un.) - [kgf]	44

6.2 Ações Variáveis

6.2.1 Ação do vento sobre a torre:

De acordo com as prescrições da ABNT NBR 6123:1988, como descrito no item 3.3, foram analisadas e consideradas as seguintes variáveis para o cálculo da pressão dinâmica do vento (q_0):

Fator topográfico $S_1 = 1,0$

Para a definição do fator S_2 a rugosidade do terreno foi classificada como categoria III (zona florestal com cota média de 3 metros), classe de construção B.

Uma vez definida a classe de dimensões da estrutura e a categoria do terreno, e considerando a altura z acima do nível geral do terreno, o valor final do parâmetro S_2 pode ser obtido com base na EQ. (3-3).

A TABELA 1 apresentada no subitem 3.3.1 define os parâmetros que permitem determinar o fator S_2 para as cinco categorias de rugosidade do terreno. Dessa forma, foi realizada a divisão da torre em cinco módulos, a cada 5 metros de altura, exceto o módulo 5 considerado com aproximadamente 7,8 metros de altura, e definido o fator S_2 para cada um desses módulos.

Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5
S2 (5m)	S2 (10m)	S2 (15m)	S2 (20m)	S2 (28m)
0,86	0,92	0,96	0,99	1,014

Fator estatístico S_3 foi considerado para a torre de transmissão com o valor unitário.

A velocidade básica do vento (V_0) foi obtida através do mapa de isopletas da FIGURA 4 e é igual a 32 m/s (sugerida para a cidade de Belo Horizonte).

Foi considerado para o vento médio velocidade igual a 20 m/s, conforme Labegaline et. al. (1992), que considera o vento médio aproximadamente 70% do valor do vento máximo.

Velocidade característica do vento:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = 32 \text{ m/s} \cdot 1,0 \cdot S_2 \cdot 1,0$$

$$V_k = (32 \text{ m/s}) \cdot S_2 \text{ ___ [para vento máximo]}$$

$$V_k = (20 \text{ m/s}) \cdot S_2 \text{ ___ [para vento médio]}$$

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5
	V_k (5m)	V_k (10m)	V_k (15m)	V_k (20m)	V_k (28m)
Vento Máximo	27,52 m/s	29,44 m/s	30,72 m/s	31,68 m/s	32,45 m/s
Vento Médio	17,2 m/s	18,4 m/s	19,2 m/s	19,8 m/s	20,28 m/s

Portanto, a pressão dinâmica do vento (q_0) para cada módulo da torre pode ser definida conforme a EQ. (3-2).

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5
	q₀(5m)	q₀(10m)	q₀(15m)	q₀(20m)	q₀(28m)
Vento Máximo	46,43	53,13	57,85	61,52	64,54
Vento Médio	18,13	20,75	22,60	24,03	26,01

Apresenta-se na FIGURA 13 a identificação das faces da torre.

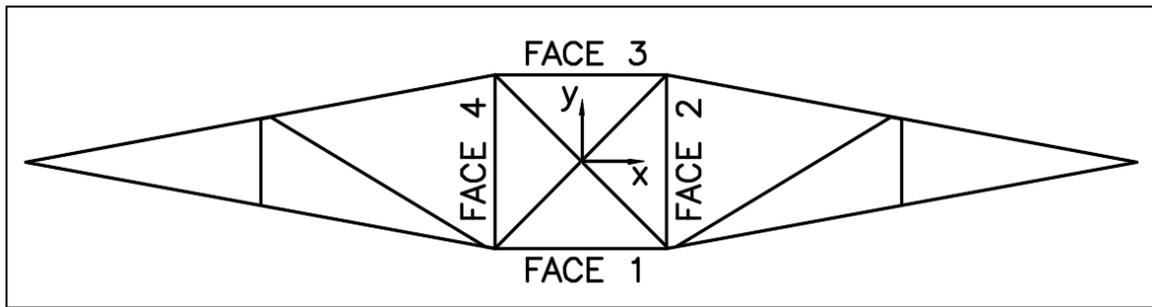


FIGURA 13 – Faces da torre de transmissão em análise

Conforme subitem 3.3.2, a força de arrasto do vento sobre uma torre reticulada constituída por barras prismáticas de faces planas, com cantos vivos ou levemente arredondados, pode ser obtida pela EQ. (3-4) e EQ. (3-5), onde os valores do coeficiente de arrasto (C_a) para vento incidindo perpendicularmente a uma das faces são fornecidos através do gráfico da FIGURA 5. O coeficiente K_α é igual a 1,0 para vento incidindo a 0° em relação ao vetor normal à face do reticulado a barlavento, e é igual a 1,16 para vento incidindo a 45° .

Sendo assim, estão apresentados os coeficientes de arrasto (C_a), para $\alpha = 0^\circ$ e faces dos módulos da torre na TABELA 7 a seguir.

TABELA 7 – Coeficientes de arrasto para as faces dos módulos da torre segundo a ABNT NBR 6123:1988.

Coeficiente de Arrasto - C_a				
MÓDULOS	FACE 1	FACE 2	FACE 3	FACE 4
MÓDULO 1	3,22	3,12	3,12	2,85
MÓDULO 2	3,22	3,22	3,22	3,22
MÓDULO 3	3,12	3,12	3,12	3,12
MÓDULO 4	3,00	3,00	3,00	3,00
MÓDULO 5	2,70	2,70	2,70	2,70

Para a torre em análise constituída por dois reticulados planos paralelos e equidistantes em duas direções, onde o reticulado de barlavento provoca efeito de proteção ao reticulado a sotavento, as forças de arrasto devidas ao vento nas partes protegidas dos reticulados devem ser multiplicadas por um fator redutor de proteção (η), os quais foram definidos para cada face dos módulos da torre e estão apresentados na TABELA 8.

TABELA 8 – Fatores de proteção (η) para as faces dos módulos da torre segundo a NBR 6123.

Fator de Proteção - η				
	FACE 1	FACE 2	FACE 3	FACE 4
MÓDULO 1	0,94	0,91	0,91	0,81
MÓDULO 2	0,94	0,94	0,94	0,94
MÓDULO 3	0,91	0,91	0,91	0,91
MÓDULO 4	0,85	0,85	0,85	0,85
MÓDULO 5	0,77	0,77	0,77	0,77

6.2.2 Ação do vento sobre os cabos condutores e cabos para-raios:

Baseado na EQ. (3-6), sendo C_a o coeficiente de arrasto para fios e cabos obtido através da tabela 14 da ABNT NBR 6123:1988, tomado como igual a 1,1 (número de Reynolds próximo de $4,2 \times 10^4$ e relação r/d maior que $1/25$), têm-se:

Cabos Condutores (Linnet 336,4 MCM)					
Diâmetro (d) =			18,3 mm		
Peso Linear (p) =			0,688 kgf/m		
Material =			Alumínio com alma de aço		
Vão (m) =		882			
q_o (kgf/m ²)	C_a	d (m)	L (m)	β (°)	Fa (kgf)
64,54 (vento máximo)	1,1	0,0183	892	90	579,4
25,21 (vento médio)	1,1	0,0183	892	90	226,3
Vão (m) =		400			
q_o (kgf/m ²)	C_a	d (m)	L (m)	β (°)	Fa (kgf)
64,54 (vento máximo)	1,1	0,0183	401	90	260,5
25,21 (vento médio)	1,1	0,0183	401	90	101,8

Cabo Para-raios (HS 5/16 in)					
Diâmetro (d) =			7,95 mm		
Peso Linear (p) =			0,305 kgf/m		
Material =			Aço		
Vão (m) =		882			
q _o (kgf/m ²)	Ca	d (m)	L (m)	β (°)	Fa (kgf)
64,54 (vento máximo)	1,1	0,008	890,3	90	251,2
25,21 (vento médio)	1,1	0,008	890,3	90	98,1
Vão (m) =		400			
q _o (kgf/m ²)	Ca	d (m)	L (m)	β (°)	Fa (kgf)
64,54 (vento máximo)	1,1	0,008	400,9	90	113,1
25,21 (vento médio)	1,1	0,008	400,9	90	44,2

A força de arrasto (Fa) decorrente da ação do vento (máximo ou médio) sobre os cabos é aplicada nos pontos de apoio dos cabos no suporte (torre).

Em consequência da ação transversal do vento sobre os cabos, ocorre um acréscimo de tensão nos cabos, pois o deslocamento angular dos cabos sob ação do vento causa um aumento virtual de peso linear do cabo (p_2). Este novo peso linear (p_2) pode ser calculado pela EQ. (6-1):

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 + f_a^2} \quad (6-1)$$

onde,

p_1 = peso linear do cabo;

$f_a = C_a \cdot q_o \cdot d$, é força linear do vento sobre o cabo;

Dessa forma, o novo estado de tensão do cabo pode ser calculado de acordo com a “equação de mudança de estado” - EQ. (6-2) - descrita em Labegaline et. al. (1992):

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{\alpha_1} \left[\left(\frac{C_2 \cdot \sinh(A/2C_2)}{C_1 \cdot \sinh(A/2C_1)} - 1 \right) - \frac{1}{ES} \cdot (T_{02} - T_{01}) \right] \quad (6-2)$$

onde,

$$C_1 = T_{01}/p_1 \quad e \quad C_2 = T_{02}/p_2;$$

$t_2 =$ temperatura final;

$t_1 =$ temperatura inicial = 20°C;

$A =$ vão do cabo;

$E =$ módulo de elasticidade do cabo analisado;

$S =$ área da seção transversal do cabo;

$T_{01} = EDS \times$ Carga de Ruptura =

Componente horizontal da força de tração no estado normal;

$T_{02} =$ Componente horizontal da força de tração no cabo no estado final de tensão;

$\alpha_1 =$ Coeficiente de dilatação térmica linear do cabo;

Portanto, a nova tensão de tração longitudinal gerada nos cabos condutores e para-raios para o vão de 882 metros é:

Estado de tensão 1: Vento médio a 20°C

$$T_{02} = 1457,15 \text{ kgf (Cabo Condutor)}$$

$$T_{02} = 711,4 \text{ kgf (Cabo Para_Raios)}$$

Estado de tensão 2: Vento máximo a 20°C

$$T_{02} = 2433,7 \text{ kgf (Cabo Condutor)}$$

$$T_{02} = 1182,1 \text{ kgf (Cabo Para_Raios)}$$

6.2.3 Ação do vento sobre a cadeia de isoladores:

A seguir apresenta-se o cálculo da força de vento atuante nos isoladores.

Área da cadeia de isoladores:

$$S_i = 75\% \times (0,146 \text{ m} \times 0,255 \text{ m}) = 0,028 \text{ m}^2/\text{un.}$$

$$S_i(\text{cadeia}) = 0,028 \text{ m}^2/\text{un.} \times 11\text{un.} = 0,308 \text{ m}^2$$

Como os isoladores estão inseridos no Módulo 5, a pressão dinâmica do vento considerada é:

$$q_0 = 64,54 \text{ kgf/m}^2 \text{ para vento máximo;}$$

$$q_0 = 25,21 \text{ kgf/m}^2 \text{ para vento médio;}$$

Portanto, a força de arrasto sobre a cadeia de isoladores é:

$$F_i = q_0 \cdot C_{xi} \cdot S_i = q_0 \times 1,2 \times 0,308$$

$$F_i = 23,85 \text{ kgf} \text{ para vento máximo;}$$

$$F_i = 9,29 \text{ kgf} \text{ para vento médio;}$$

6.2.4 Suporte em ângulo de até 3°

Em uma linha de transmissão com distâncias tão grandes entre suportes em alinhamento reto, como no caso deste trabalho, é comum a presença de desalinhamentos em até 3°. Portanto, será considerado a atuação de uma força transversal nos pontos de apoio dos cabos, que ocorre após o tensionamento dos cabos adjacentes, e que pode ser amplificado com a atuação do vento.

De acordo com Labegaline et. al. (1992), a força total que as estruturas em ângulo deverão absorver, será:

$$F_{AT} = 2 \cdot T_{0,m\acute{a}x} \cdot \text{sen} \frac{\alpha}{2} + f_a \cdot a_m \cdot \text{cos} \frac{\alpha}{2} \quad (6-3)$$

onde,

$T_{0,m\acute{a}x}$ = Força de tração inicial nos cabos;

$\alpha = 3^\circ = \text{ângulo de desalinhamento entre suportes};$

$$a_m = \frac{882m+400m}{2} = 641m = \text{vão médio dos cabos adjacentes};$$

$f_a = C_a \cdot q_0 \cdot d$, é força linear do vento sobre o cabo;

$F_{AT} = \text{Força total transversal devido ao ângulo};$

Nesta formulação, a primeira parte ($2 \cdot T_{0,máx} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$) se refere ao efeito do tensionamento já existente nos cabos, e a segunda parte ($f_a \cdot a_m \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$) se refere ao acréscimo de força de tração devido ao efeito do vento, ou seja, quando não for considerado o efeito do vento, a segunda parte pode ser desconsiderada ($f_a = 0$).

Efeito do ângulo de 3° sem vento:

$$F_{AT} = 2 \times 1182,7 \times \sin \frac{3^\circ}{2} = 61,92kgf \text{ (Cabo Condutor)}$$

$$F_{AT} = 2 \times 580,8 \times \sin \frac{3^\circ}{2} = 30,41kgf \text{ (Cabo Para_Raios)}$$

Efeito do ângulo de 3° com vento máximo:

$$F_{AT} = 61,92kgf + \left(1,30 \times 641 \times \cos \frac{3^\circ}{2} \right) = 894,93kgf \text{ (Cabo Condutor)}$$

$$F_{AT} = 30,41kgf + \left(0,564 \times 641 \times \cos \frac{3^\circ}{2} \right) = 391,81kgf \text{ (Cabo Para_Raios)}$$

Efeito do ângulo de 3° com vento médio:

$$F_{AT} = 61,92kgf + \left(0,508 \times 641 \times \cos \frac{3^\circ}{2} \right) = 387,44kgf \text{ (Cabo Condutor)}$$

$$F_{AT} = 30,41kgf + \left(0,221 \times 641 \times \cos \frac{3^\circ}{2}\right) = 172,02kgf \text{ (Cabo Para_Raios)}$$

6.2.5 Rompimento de cabo

No caso dos cabos de vãos adjacentes de uma torre de suspensão, as forças longitudinais são equilibradas no ponto de fixação à cadeia de isoladores. Na hipótese de rompimento de um dos cabos, ocorre o desequilíbrio, sendo a força longitudinal do cabo remanescente tomada como a componente horizontal da força de tração (T_o) do cabo, sob ação de vento médio, calculada conforme EQ. (6-2) para os cabos condutores e para-raios, multiplicada por um fator de redução comumente adotado como 0,7 que, de acordo com Labegaline et. al. (1992), considera a redução de esforço devido ao deslocamento da cadeia de suspensão do lado do cabo intacto.

6.2.6 Temperatura

A variação da temperatura dos cabos condutores ou para-raios causam a dilatação ou retração linear deles. Em consequência, a tração no cabo sofre variação, aumentando em caso de retração e diminuindo em caso de dilatação. No caso de vãos adjacentes desiguais, esse efeito da temperatura causa o desequilíbrio dos esforços nos cabos, o qual será absorvido pelo suporte.

Segundo Labegaline et. al. (1992), o novo estado de tensão do cabo devido ao efeito da variação da temperatura pode ser calculado de acordo com a “equação de mudança de estado” – EQ. (6-2). Porém, neste trabalho, será desconsiderado o efeito da variação da temperatura.

6.3 Combinações de ações

Foram consideradas as seguintes combinações de ações:

1º) Cabos intactos, alinhamento com ângulo de até 3º, e atuação do vento máximo longitudinal. → **COMB 01 e COMB 02**

2º) Cabos intactos, alinhamento com ângulo de até 3º, e atuação do vento máximo transversal. → **COMB 03 e COMB 04**

3º) Ruptura do cabo para-raios, alinhamento com ângulo de até 3º, e a ação do vento médio transversal. → **COMB 05 e COMB 06**

4º) Ruptura do cabo para-raios, alinhamento com ângulo de até 3º, e a ação do vento médio longitudinal. → **COMB 07**

5º) Ruptura dos cabos condutores em qualquer posição de maneira não simultânea, alinhamento com ângulo de até 3º, e a ação do vento médio transversal. → **COMB 08, COMB 09, COMB 10, COMB 11, COMB 12 e COMB 13.**

6º) Ruptura dos cabos condutores em qualquer posição de maneira não simultânea, alinhamento com ângulo de até 3º, e a ação do vento médio longitudinal. → **COMB 14, COMB 15 e COMB 16.**

As combinações das ações estão relacionadas com a segurança estrutural, pois levam em consideração a possibilidade das ações ocorrerem simultaneamente. Como a análise e dimensionamento da estrutura foram baseadas na norma americana ASCE 10-97: “*Design of Latticed Steel Transmission Structures*”, que tem como base o Método das Tensões Admissíveis, as combinações foram feitas sem a consideração de coeficientes de ponderação ou fatores de combinação, ou seja, com os valores das ações permanentes e variáveis originais.

Por recomendação da norma brasileira ABNT NBR5422:1985, independentemente da combinação, os valores obtidos para as ações permanentes devem ser multiplicados pelos seguintes fatores mínimos:

$K_1 = 1,15$ para cargas máximas de peso dos cabos (vertical);

$K_2 = 1,0$ para o peso próprio do suporte, ferragens de cabos, cadeias de isoladores;

$K_3 = 1,10$ para ações transversais originadas da tração mecânica dos cabos.

7 ANÁLISE E RESULTADOS

7.1 Resultados com a atuação do peso próprio da estrutura e cabos

Considerando as ações de peso próprio da estrutura da torre, dos isoladores e dos cabos, assim como a posição em desnível do suporte analisado em relação aos adjacentes, podem-se analisar os resultados das reações de apoio na TABELA 9, cuja numeração dos nós correspondem aos ilustrados na FIGURA 14 a seguir.

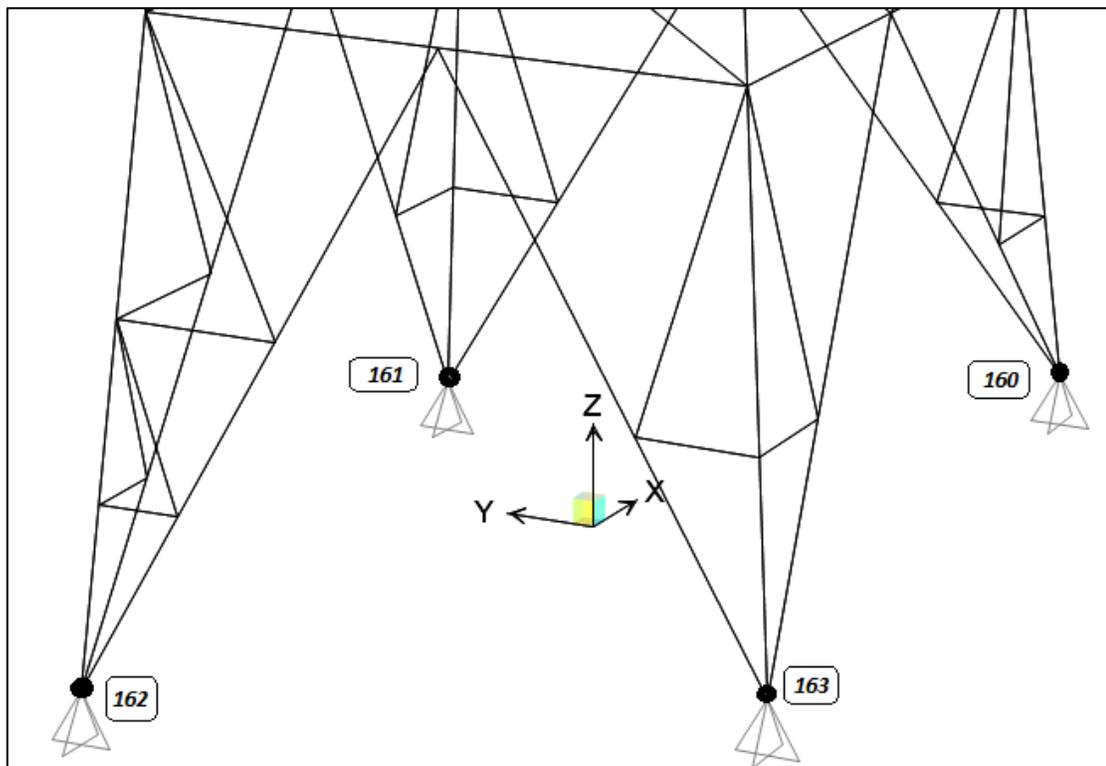


FIGURA 14 – Numeração dos nós dos pontos de apoio (fundação).

TABELA 9 – Reações de apoio devidas aos pesos próprios e somatório [kgf].

Reações de Apoio - Rotulado			
Nó	eixo x	eixo y	eixo z
160	-73,591	89,077	1284,352
161	-72,799	-87,534	1278,377
162	73,974	-48,252	672,659
163	72,415	46,708	635,91
SOMA:	-0,001	-0,001	3871,298

O somatório das reações nos eixos x e y com resultante nula, evidencia que a estrutura se encontra em equilíbrio e o modelo numérico é consistente. O somatório das reações no eixo z demonstram o peso total da estrutura, cabos e isoladores que chegam à fundação da torre.

A FIGURA 15 ilustra as tensões axiais internas (em MPa) das barras da torre sob ação do carregamento permanente devido aos pesos próprios. Pode-se observar que ocorrem na estrutura tensões internas que variam dentro da escala de 35 MPa em compressão até 39 MPa em tração, aproximadamente.

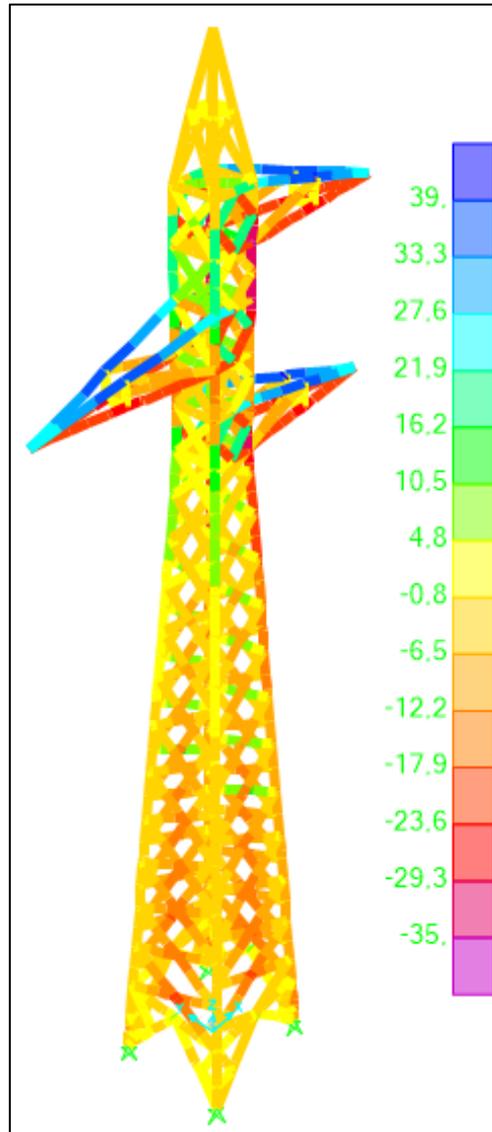


FIGURA 15 – Tensões internas nas barras da estrutura [MPa]

7.2 Resultados com a atuação de única força transversal no topo da torre

Foi aplicada uma única força transversal de 364,3kgf no ponto mais alto da torre (altura de 28,3m) no sentido negativo da direção do eixo x, o que corresponde a um momento fletor solicitante de 10309,7kgf.m na base da torre. Como apresentado na TABELA 10, pode-se perceber que o somatório dos binários gerados na base da torre coincidem com o momento fletor solicitante de 10309,7kgf.m, o que também evidencia que a estrutura se encontra em equilíbrio e o modelo numérico é consistente.

TABELA 10 – Comparação entre binários e momento solicitante.

Reações de Apoio - Rotulado				Dist. (eixo x)	Binário (Reação)	Momento Solicitante
Nó	eixo x	eixo y	eixo z			
160	92,731	-94,064	-1458,816	1,772	-2585,4	(28,3m x 364,3kgf) = 10309,7kgf.m
161	87,758	89,186	-1398,993	1,804	-2523,9	
162	89,521	-88,997	1398,819	-1,836	-2568,1	
163	94,291	93,876	1458,989	-1,804	-2632,1	
SOMA:	364,301	0,001	-0,001		-10309,5	

8 DIMENSIONAMENTO

Como no Brasil não existe uma norma específica para o dimensionamento de estruturas metálicas treliçadas de torres de transmissão de energia, e sendo estas estruturas de comportamento muito específico, foi adotado neste trabalho a norma americana ASCE 10-97: “*Design of Latticed Steel Transmission Structures*”, da American Society of Civil Engineers. Esta norma trata especificamente do tipo de estrutura em questão e está presente no software SAP2000 v.19, o qual foi utilizado neste trabalho para análise e dimensionamento da estrutura.

A ASCE 10-97 utiliza o Método das Tensões Admissíveis, no qual o dimensionamento é feito a partir da comparação da tensão atuante com a tensão admissível.

8.1 Barras à Compressão

No dimensionamento à compressão, a tensão atuante de cálculo (f_a) no elemento estrutural é comparada com a tensão admissível (F_a), conforme a EQ. (8-1).

$$f_a = \frac{N_d}{A_g} \leq F_a \quad (8-1)$$

onde,

f_a = Tensão atuante de cálculo devido a N_d ;

N_d = Solicitação de cálculo de compressão;

A_g = Área bruta de seção transversal;

F_a = Tensão admissível;

A tensão admissível é determinada através das equações EQ. (8-2) e EQ. (8-3).

$$F_a = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right)^2 \right] \cdot F_y \quad \text{para} \quad \frac{KL}{r} \leq C_c \quad (8-2)$$

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad \text{para} \quad \frac{KL}{r} > C_c \quad (8-3)$$

sendo,

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}};$$

F_y = Limite de escoamento do aço;

E = Módulo de elasticidade;

KL/r = índice de esbeltez efetivo;

L = Comprimento destravado;

r = raio de giração;

K = Coeficiente de flambagem;

A tensão admissível é determinada pelas equações EQ. (8-2) e EQ. (8-3), desde que $w/t \leq (w/t)_{lim}$, calculado conforme EQ. (8-4).

$$(w/t)_{lim} = \frac{80\Psi}{\sqrt{F_y}} \quad (8-4)$$

Se $w/t > (w/t)_{lim}$, a tensão admissível (F_a) deve ser calculada pela mesma equação, porém com F_y substituído por F_{cr} , definido pela EQ. (8-5) ou EQ. (8-6).

$$F_{cr} = \left[1,677 - 0,677 \frac{w/t}{(w/t)_{lim}} \right] F_y \quad \text{para } (w/t)_{lim} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{144\Psi}{\sqrt{F_y}} \quad (8-5)$$

$$F_{cr} = \frac{0,0332\pi^2 E}{(w/t)^2} \quad \text{para } \frac{w}{t} > \frac{144\Psi}{\sqrt{F_y}} \quad (8-6)$$

Nas equações EQ. (8-4) a EQ. (8-6) acima, $\Psi = 2,62$ para F_y adotado em MPa.

Para que as equações EQ. (8-2) a EQ. (8-6) sejam válidas, a relação w/t não deve exceder 25, sendo w e t definidos conforme a FIGURA 16.

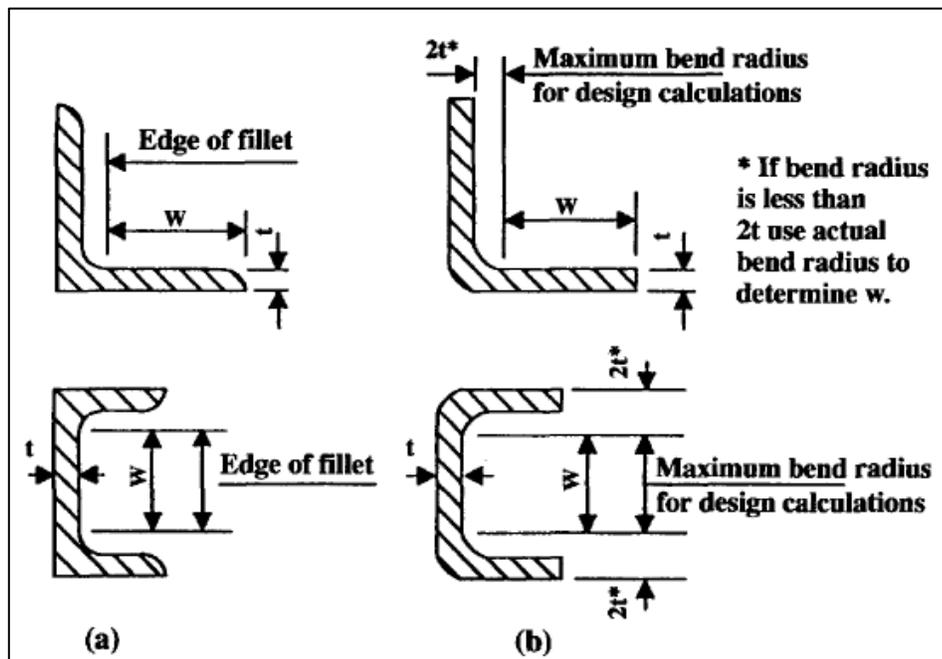


FIGURA 16 – Determinação da razão w/t . (ASCE 10-97)

8.1.1 Índice de Esbeltez Efetivo (KL/r)

8.1.1.1 Montantes

Para cantoneiras presentes nas montantes, parafusadas nas duas abas e com as forças de compressão centradas, o índice de esbeltez efetivo pode ser determinado como:

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

Os valores de referência para a relação L/r devem ser adotados conforme a FIGURA 17.

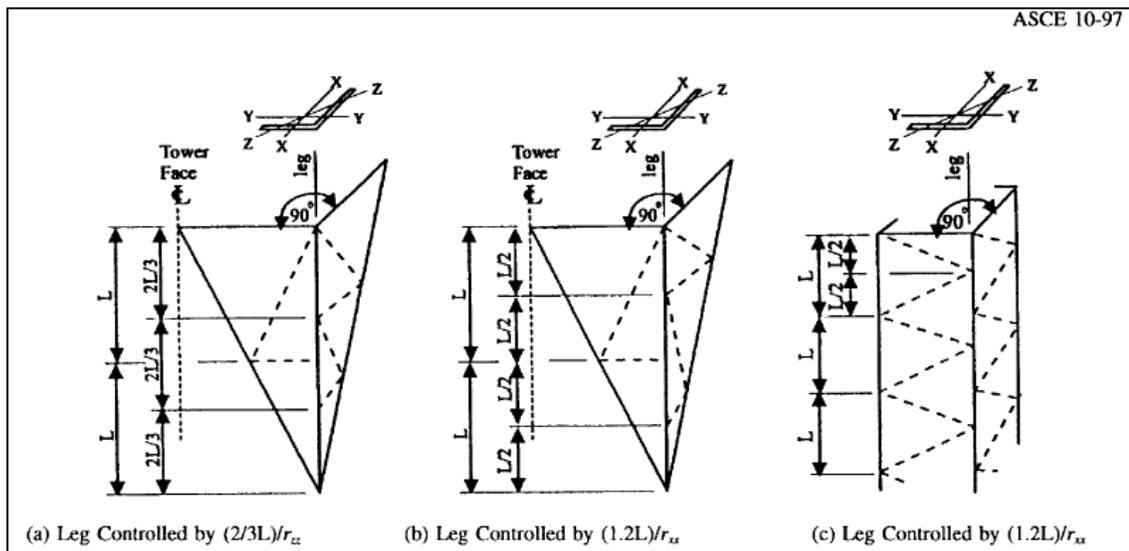


FIGURA 17 – Montantes de cantoneiras de abas iguais com contraventamento alternado. (ASCE 10-97)

(a) Perna controlada por $(2/3L)/r_{zz}$:

(b) Perna controlada por $(1,2L)/r_{xx}$:

(c) Perna controlada por $(1,2L)/r_{xx}$:

8.1.1.2 Outras barras comprimidas

Para barras com força concêntrica nas duas extremidades:

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

Para barras com força concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra extremidade:

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

Para barras com força excêntrica em ambas as extremidades:

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

Para barras rotuladas em ambas as extremidades.

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

Para barras parcialmente engastadas em uma extremidade e rotulada na outra extremidade:

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

Para barras parcialmente engastadas em ambas as extremidades:

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

8.1.1.3 Barras Redundantes

Para barras redundantes, no caso geral:

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

Se as barras estiverem rotuladas nas duas extremidades:

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

Se as barras estiverem parcialmente engastadas em apenas uma extremidade:

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

Se as barras estiverem parcialmente engastadas nas duas extremidades:

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

8.2 Barras tracionadas

No dimensionamento à tração pela norma ASCE 10-97, a tensão de tração atuante (f_t) no elemento estrutural é comparada com a tensão limite de escoamento (F_y), conforme a EQ. (8-7):

$$f_t = \frac{N_d}{A_n} \leq F_y \quad (8-7)$$

Sendo:

f_t = Tensão atuante de cálculo à tração;

N_d = Solicitação de cálculo de tração;

A_n = Área líquida da seção transversal;

F_y = Limite de escoamento do aço;

onde, A_n é igual a área bruta da seção transversal subtraída dos furos ou outras aberturas na seção em análise. Se houver uma cadeia de furos em uma linha diagonal ou em ziguezague, a largura líquida de um elemento será determinada deduzindo-se da largura bruta a soma dos diâmetros de todos os furos na cadeia e acrescentando para cada espaço de gabarito na cadeia a quantidade $s^2/4g$, em que s = espaçamento longitudinal e g = espaçamento transversal de quaisquer dois furos consecutivos. A área líquida da seção transversal conectada A_n é obtida a partir da cadeia que resulta na menor largura da ligação.

$$A_n = A_g - \sum t \cdot d_f + \sum t \cdot \frac{s^2}{4g}$$

onde,

A_g = Área bruta da seção transversal;

t = espessura da cantoneira;

d_f = diâmetro do furo;

g = espaçamento entre dois furos, perpendicular à direção da força de tração;

s = espaçamento entre dois furos, paralelo à direção da força de tração;

8.3 Intervenções para o dimensionamento no software SAP2000

No dimensionamento da estrutura analisada neste trabalho, foram necessárias algumas adaptações para a correta aplicação da norma.

- Barra de Montante: Para os elementos de montante, devem ser desconsiderados os efeitos de momento fletor, pois a estrutura deve se comportar como uma treliça.
- Barra Horizontal: quando existe uma ou mais barras travando as barras horizontais, estas devem ter as razões de comprimento destravado (“unbraced length ratio”) multiplicado por $L1/L3$, onde $L1$ é o maior comprimento destravado entre os apoios e $L3$ é comprimento total da barra.
- Barra diagonal: as razões de comprimento destravado (“unbraced length ratio”) devem ser multiplicadas por $L1/L3$, onde $L1$ é o maior comprimento destravado e $L3$ o comprimento total da barra, a fim de corrigir o comprimento destravado considerado.

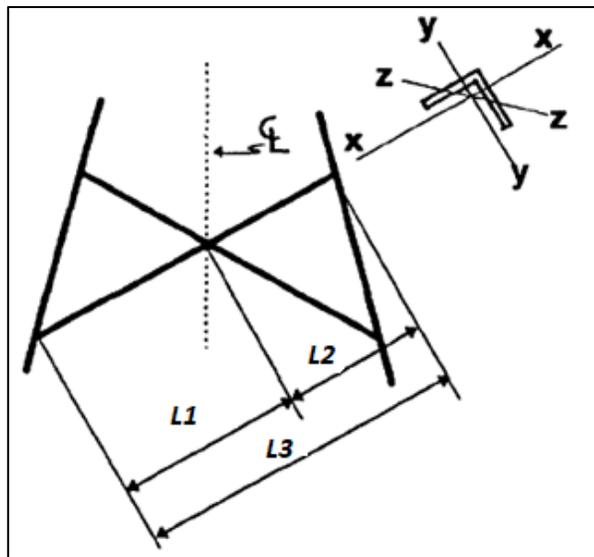


FIGURA 18 – Comprimentos destravados das diagonais da torre (ASCE 10-97).

8.4 Resultados do Dimensionamento no Software SAP2000

A seguir apresentam-se os índices de utilização mais críticos encontrados para os elementos da estrutura, conforme combinações de ações descritas anteriormente. Define-se índice de utilização como sendo a razão entre tensão máxima atuante no elemento e a tensão admissível.

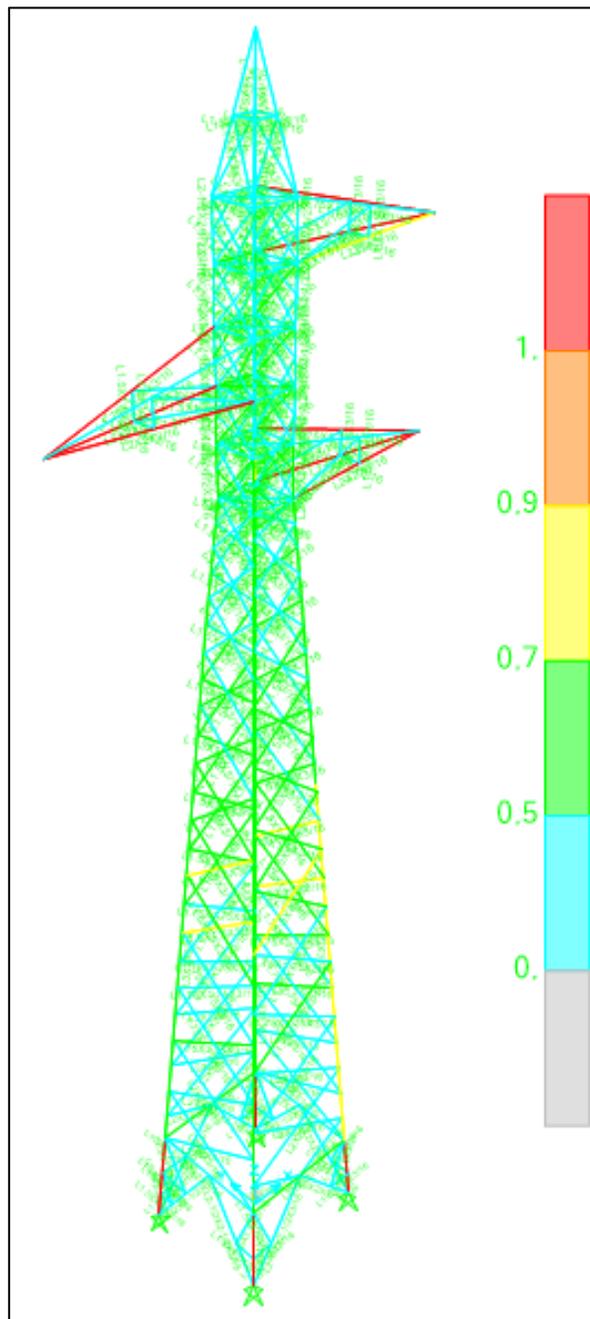


FIGURA 19 – Resultado do dimensionamento no SAP2000 pela norma ASCE 10-97.

Pode-se perceber que apenas os pontaletes das mísulas da torre e as bases dos montantes não apresentaram índices de utilização dentro dos limites aceitáveis. A FIGURA 20 apresenta a verificação dos pontaletes das mísulas.

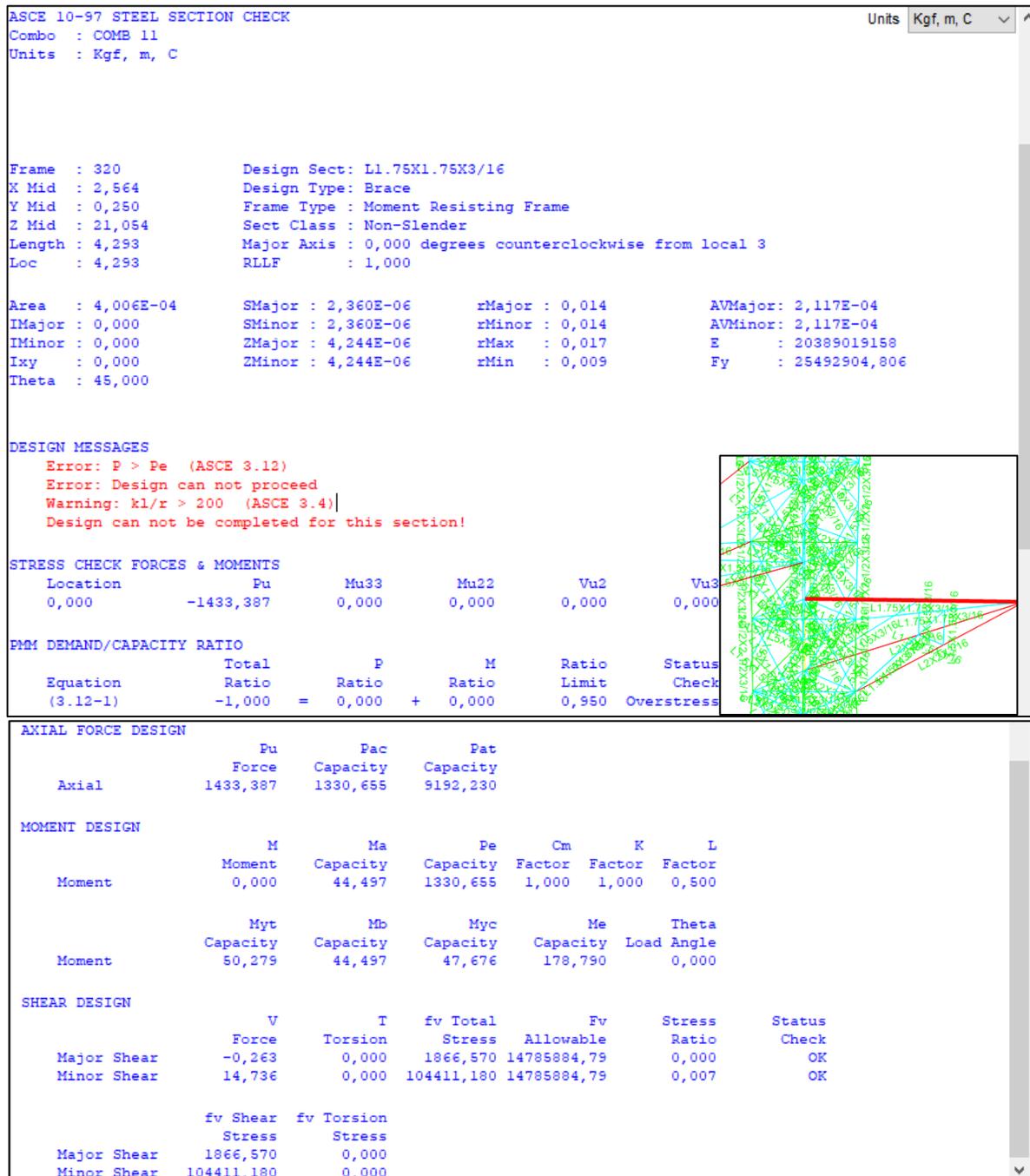


FIGURA 20 – Verificação dos pontaletes das mísulas.

Steel Stress Check Data ASCE 10-97								
File								
ASCE 10-97 STEEL SECTION CHECK							Units	Kgf, m, C
Combo : COMB 04								
Units : Kgf, m, C								
Frame : 290	Design Sect: L4X4X1/4							
X Mid : -1,737	Design Type: Column							
Y Mid : 1,737	Frame Type : Moment Resisting Frame							
Z Mid : 1,052	Sect Class : Slender							
Length : 3,117	Major Axis : 0,000 degrees counterclockwise from local 3							
Loc : 2,271	RLLF : 1,000							
Area : 0,001	SMajor : 1,721E-05	rMajor : 0,032	AVMajor: 6,452E-04					
IMajor : 1,265E-06	SMinor : 1,721E-05	rMinor : 0,032	AVMinor: 6,452E-04					
IMinor : 1,265E-06	ZMajor : 3,081E-05	rMax : 0,040	E : 20389019158					
Ixy : 0,000	ZMinor : 3,081E-05	rMin : 0,020	Fy : 25492904,806					
Theta : 45,000								
DESIGN MESSAGES								
Error: Section overstressed								
STRESS CHECK FORCES & MOMENTS								
Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu		
2,271	-13979,608	111,054	66,445	0,000	0,000	0,000		
PMM DEMAND/CAPACITY RATIO								
Equation	Total Ratio	P Ratio	M Ratio	Ratio Limit	Status Check			
(3.12-1)	1,033	= 0,588	+ 0,444	0,950	OK			
AXIAL FORCE DESIGN								
	Pu Force	Pac Capacity	Pat Capacity					
Axial	13979,608	23762,957	28716,467					
MOMENT DESIGN								
	M Moment	Ma Capacity	Pe Capacity	Cm Factor	K Factor	L Factor		
Moment	0,000	402,318	50653,484	1,000	1,000	0,457		
	Myt Capacity	Mb Capacity	Myc Capacity	Me Capacity	Theta Load Angle			
Moment	402,318	592,188	646,060	1936,961	-14,107			
SHEAR DESIGN								
	V Force	T Torsion	fv Total Stress	Fv Allowable	Stress Ratio	Status Check		
Major Shear	-99,220	0,000	230686,684	14785884,79	0,016	OK		
Minor Shear	-55,393	0,000	128788,245	14785884,79	0,009	OK		
	fv Shear Stress	fv Torsion Stress						
Major Shear	230686,684	0,000						
Minor Shear	128788,245	0,000						

FIGURA 21 – Verificação da base da coluna.

9 CONCLUSÃO

A verificação do dimensionamento de uma estrutura real projetada na década de 80 foi realizada face aos critérios atuais de dimensionamento de estruturas de linhas de transmissão. Apenas os elementos principais (pontaletes) das mísulas da torre não atenderam aos critérios de dimensionamento da norma americana ASCE 10-97. Dessa forma, a estrutura não estaria apta a desempenhar suas funções estruturais em segurança. Provavelmente o subdimensionamento dos elementos decorreu da adoção de menores forças devidas ao vento para a região, já observado em comparações dos valores obtidos através da norma ABNT NBR 5422:1985 com a norma ABNT NBR 6123:1988. Essa costuma resultar em forças devidas ao vento maiores que as obtidas por aquela.

A utilização da norma americana ASCE 10:97 através do software SAP2000 deve ser cautelosa, devendo ser feita as devidas intervenções no modelo estrutural para a correta aplicação da norma.

10 REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5422: *Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, 1985.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123: *Forças devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.

ASCE, American Society of Civil Engineers. ASCE 10-97: *Design of Latticed Steel Transmission Structures*. Reston, VA, 1997.

CARVALHO, H. *Metodologias para Análise Estática do Efeito do Vento em Linhas de Transmissão*. 2010. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ELIAS, K.M. *Torre de Transmissão de Energia Elétrica: Novo Design e os Desafios da Inserção no Contexto Urbano*. 2015. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GONTIJO, C.R. *Contribuição à Análise e Projeto de Torres Autoportantes de Linhas de Transmissão*. 1994. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LABEGALINI, P.R., LABEGALINI, J.A., FUCHS, R.D., ALMEIDA, M.T. *Projetos Mecânicos das Linhas de Transmissão*. 2ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992, 528 p.

Leilão de transmissão da ANEEL termina com 55,26% de deságio. *Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL*, Brasília, 28 jun. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/leilao-de-transmissao-da-aneel-termina-com-55-26-de-desagio/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 12 out. 2018.

NEXANS. *Catálogo de Produtos: Alumínio, condutores nus*, 2003.

O Sistema Interligado Nacional. *Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS*. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 12 de outubro, 2018.

SEVES, Electrovidro. *Catálogo de Produtos: Isoladores de suspensão de vidro temperado Sediver*, 2009.