



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS CAMPUS
GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNO ALMIRO ALVES DE OLIVEIRA

**MODELAGEM, ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE SUSPENSÃO
DO TIPO DELTA PARA LINHA DE TRANSMISSÃO COM BASE NAS NORMAS
TÉCNICAS BRASILEIRAS**

Goiânia, GO

2025

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO
REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Bruno Almiro Alves de Oliveira

Matrícula: 20191011050283

Título do Trabalho: Modelagem, análise e dimensionamento de uma torre de suspensão do tipo delta para linha de transmissão com base nas normas técnicas brasileiras.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção 2 ou 3, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 24 de agosto de 2025

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

BRUNO ALMIRO ALVES DE OLIVEIRA

**MODELAGEM, ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE SUSPENSÃO
DO TIPO DELTA PARA LINHA DE TRANSMISSÃO COM BASE NAS NORMAS
TÉCNICAS BRASILEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius A. da S. Mendes

Goiânia, GO

2025

O48m Oliveira, Bruno Almiro Alves de.

Modelagem, análise e dimensionamento de uma torre de suspensão do tipo delta para linha de transmissão com base nas normas técnicas brasileiras / Bruno Almiro Alves de Oliveira. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2025.
97f.

Orientação: Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo.

Coorientação: Prof. Dr. Marcus Vinicius A. da S. Mendes.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui apêndices.

1. Torre treliçada. 2. Linhas de transmissão. 3. Análise estrutural. I. Carrijo, Elias Calixto (orientação). II. Mendes, Marcus Vinicius A. da S. (coorientação). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 624.1773

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **MODELAGEM, ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE SUSPENSÃO DO TIPO DELTA PARA LINHA DE TRANSMISSÃO COM BASE NAS NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS**, sob orientação de Elias Calixto Carrijo e coorientação de Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes, apresentada pelo aluno **Bruno Almiro Alves de Oliveira (20191011050283)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Civil (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **17:00** do dia **18/08/2025** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes** (Coorientador e Presidente)
- **Claudio Marra Alves** (Examinador Interno)
- **Marcelo de Rezende Carvalho** (Examinador Interno)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 10,0

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes** (975.007.631-15), em **25/08/2025 00:41:08** com chave **563e98ae816511f0886f005056a537a4**.
- **Claudio Marra Alves** (549.260.091-53), em **25/08/2025 09:16:20** com chave **4f4c00ac81ad11f098d2005056a537a4**.
- **Marcelo de Rezende Carvalho** (022.472.711-70), em **25/08/2025 12:20:02** com chave **f874b9a881c611f0bc0c005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 25/08/2025

Código de Autenticação: 2bc522



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Fernanda, aos meus irmãos e à minha companheira Thaynara, por serem o abraço no fim do dia e a certeza de que, por mais duro que seja o caminho, o amor que compartilhamos me dará paz para sempre continuar.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, minha eterna gratidão por todo o suporte, incentivo e pela base que me permitiram chegar até aqui. O apoio incondicional de vocês foi o alicerce para a realização deste sonho.

À minha companheira, Thaynara, agradeço por sua paciência, amor e por ser a voz que me fez acreditar que este objetivo era, de fato, possível. Sua confiança foi meu maior combustível.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo e Prof. Dr. Marcus Vinícius Araújo da Silva Mendes, expressei meu profundo reconhecimento pela valiosa orientação, pela confiança depositada em meu potencial e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, Prof. Me. Cláudio Marra Alves e Prof. Dr. Marcelo de Rezende Carvalho, pelas críticas construtivas e valiosas contribuições que enriqueceram significativamente esta pesquisa.

Ao Instituto Federal de Goiás (IFG), sou grato pela excelência no ensino e por proporcionar um ambiente de aprendizado e pesquisa que foi fundamental para minha formação.

Aos meus colegas de jornada, agradeço pelas ricas trocas de conhecimento, pela amizade e pelo apoio mútuo nos desafios desta caminhada. Vocês foram essenciais para o meu crescimento profissional e pessoal.

*“Os obstáculos que enfrentamos são
oportunidades para crescermos e descobrirmos
nossa verdadeira força.”*

Haemim Sunim

RESUMO

MODELAGEM, ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UMA TORRE DE SUSPENSÃO DO TIPO DELTA PARA LINHA DE TRANSMISSÃO COM BASE NAS NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS

AUTOR: Bruno Almiro Alves de Oliveira

ORIENTADOR: Dr. Elias Calixto Carrijo

COORIENTADOR: Dr. Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes

Este trabalho apresenta a modelagem, análise estrutural e dimensionamento de uma torre treliçada autoportante do tipo delta, destinada a linhas de transmissão de energia elétrica. A estrutura foi modelada no software SAP2000, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5422:2024, considerando as principais ações normativas, como vento, peso próprio e ruptura de cabos. A partir dos esforços obtidos nas análises, desenvolveu-se um programa computacional em linguagem Python, com o apoio de um modelo de linguagem de larga escala (LLM), para automatizar o dimensionamento das barras tipo cantoneira segundo os parâmetros da ABNT NBR 17184:2024. A metodologia adotada envolveu a criação de modelos tridimensionais da torre, a aplicação de combinações críticas de carregamento no SAP2000 e a implementação de um algoritmo baseado em prompts técnicos otimizados para o modelo Claude. Os resultados indicaram que o modelo estudado representa com boa fidelidade o comportamento estrutural da torre e que a ferramenta computacional desenvolvida proporcionou ganhos de tempo e precisão no processo de verificação, respeitando os limites normativos. Conclui-se que a integração entre métodos tradicionais da engenharia estrutural e ferramentas baseadas em inteligência artificial constitui uma abordagem promissora para o desenvolvimento de projetos, contribuindo para a produtividade e a confiabilidade técnica das estruturas.

Palavras-chave: Linhas de transmissão. Torres treliçadas. Análise estrutural. Dimensionamento. Python. LLMs.

ABSTRACT

SOFTWARE INTEGRATION FOR EFFICIENT DEVELOPMENT OF SELF-SUPPORTING TOWERS IN STEEL STRUCTURES

AUTOR: Bruno Almiro Alves de Oliveira

ADIVISOR: Dr. Elias Calixto Carrijo

CO-ADIVISOR: Dr. Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes

This study presents the modeling, structural analysis, and design of a self-supporting delta-type lattice tower intended for electric power transmission lines. The structure was modeled using SAP2000 software in accordance with the requirements of the ABNT NBR 5422:2024 standard, considering critical design actions such as wind loads, self-weight, and conductor rupture. Based on the internal forces obtained from the simulations, a computational tool was developed in Python, with support from a large language model (LLM), to automate the sizing of angle-section bars according to the guidelines of ABNT NBR 17184:2024. The methodology included the creation of three-dimensional structural models, the application of critical loading combinations in SAP2000, and the implementation of an algorithm based on optimized technical prompts tailored to the Claude platform. The results demonstrated that the numerical model reliably represents the structural behavior of the tower and that the developed tool significantly improved the efficiency and accuracy of the design process, ensuring full compliance with normative standards. It is concluded that the integration of traditional structural engineering methods with artificial intelligence tools offers a promising approach for advancing project development, enhancing both productivity and structural reliability.

Keywords: transmission lines. Lattice towers. Structural analysis. design. Python. LLMs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema de transmissão de energia elétrica.....	22
Figura 2.2 - Principais elementos das linhas de transmissão.....	23
Figura 2.3 - Classificação dos tipos de torres.....	24
Figura 2.4 - Vão Gravante x Vão Médio.	25
Figura 2.5 - Subestrutura de uma torre autoportante tipo delta.	28
Figura 2.6 – Classificação das barras do tronco básico inferior e da viga.	29
Figura 2.7 - Padrões de treliçamento do tronco básico inferior.	29
Figura 2.8 – Contraventamento plano.	30
Figura 2.9 - Isopletas de velocidade básica para períodos de integração de 3s min (m/s).	36
Figura 2.10 - Fator combinado de vento G_C para cabos.	38
Figura 2.11 – Fator de efetividade.....	38
Figura 2.12 – Ângulo de incidência do vento em relação ao suporte.....	40
Figura 2.13 – Esqueça do pêndulo duplo para ruptura dos cabos	42
Figura 2.14 – Esquema de forças para a ruptura dos cabos.....	42
Figura 2.15 – Exemplo discretização de torre por MEF.	46
Figura 2.16 – Dimensões da Cantoneira.....	49
Figura 2.17 – Perfis Compostos.	52
Figura 2.18 – Distâncias entre Furos.	54
Figura 2.19 – Linha do tempo dos modelos de linguagem.....	58
Figura 3.1 – Esquema integrado da metodologia.	60
Figura 3.2 - Silhueta da torre base.....	62
Figura 3.3 – Esquema de Modelagem no AutoCAD.....	63
Figura 3.4 – Modelo Inicial no AutoCAD.....	63
Figura 3.5 – Hipóteses de Contenção.	67
Figura 3.6 – Esquema de Modelagem no SAP2000.....	69
Figura 3.7 – Modelo 3D da Torre no SAP2000	69
Figura 3.8 – Fluxo de planejamento.	70
Figura 3.9 – Geração de código.....	71
Figura 3.10 - Estrutura final do programa.	72
Figura 3.11 – Aba Materiais.	74
Figura 3.12 – Aba Materiais (sub-abas).	74

Figura 3.13 – Aba Dados.....	75
Figura 3.14 – Aba Dimensionamento.....	75
Figura 3.15 – Aba Relatórios.....	76
Figura 3.16 – Exemplo de um relatório completo	77
Figura 3.17 – Exemplo de um relatório de barra.	77
Figura 4.1 - – Ações de vento de 10 min nos isoladores.	81
Figura 4.2 – Ações de vento de 3s min nos isoladores.....	81
Figura 4.3 – Ações de vento de 10 min nos cabos.	82
Figura 4.4 – Ações de vento de 3s min nos cabos.	82
Figura 4.5 – Exemplo de lançamento das ações de vento sobre a torre no SAP2000.....	83
Figura 4.6 – Tração nos cabos – Componente vertical.	84
Figura 4.7 – Comparação entre modelos para esforços axiais.	86
Figura 4.8 – Comparação entre modelos para deslocamentos.....	87
Figura 4.9 – Deslocamento máximos ELS (mm).	88
Figura 4.10 – Envoltórias de esforços da Torre.....	90
Figura 4.11 – Relatório extraído do programa desenvolvido.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação das linhas de transmissão.	23
Tabela 2.2 - Fator de turbulência (10 min).....	35
Tabela 2.3 – Fatores de conversão do período de integração de 10 min para 30 s.	35
Tabela 2.4 – Fatores de conversão do período de integração de 10 min para 3 s.	36
Tabela 2.5 – Fórmulas para obtenção de G_c	37
Tabela 2.6 – Fórmulas para obtenção de G_t	39
Tabela 2.7 – Coeficientes de ponderação de carregamentos.	44
Tabela 5.1- Pressão Dinâmica de Vento (q).	80
Tabela 5.2 – Verificação inicial das barras.....	94
Tabela 5.3 – Resultados do dimensionamento.	94

LISTA DE QUADRO

Quadro 2.1 - Esbeltez efetiva das barras de um suporte submetidas a compressão.	50
Quadro 2.2 - Esbeltez efetiva das barras sem esforços calculados.....	54
Quadro 3.1 – Dados iniciais do projeto.	61
Quadro 3.2 – funções dos módulos do programa.	73
Quadro 4.1 – Ações de vento sobre a Torre.	83
Quadro 4.2 – Barras de projeto.....	91
Quadro 4.3 – Esforços para a fundação	92

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IA	Inteligência Artificial
EI	Módulo de Rigidez à Flexão
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LLM	Large Language Model (Modelo de Linguagem de Larga Escala)
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
SAP	Structural Analysis Program (software de análise estrutural)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	ESTUDOS RELEVANTES	19
2.2	LINHAS DE TRANSMISSÃO	22
2.3	TIPOS DE TORRES E SUAS APLICAÇÕES	25
2.4	COMPOSIÇÃO DE UMA TORRE AUTOPORTANTE	27
2.5	ETAPAS DE PROJETO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	30
2.6	NORMATIZAÇÃO.....	32
2.7	AÇÕES E CARREGAMENTOS	34
2.7.1	VENTO NOS CABOS E ESTRUTURAS (MODELO NBR5422:2024)	34
2.7.2	AÇÃO DO VENTO NOS CABOS	36
2.7.3	AÇÃO DO VENTO SOBRE CADEIAS DE ISOLADORES	39
2.7.4	AÇÃO DO VENTO SOBRE A ESTRUTURA	39
2.7.5	PESO PRÓPRIO.....	41
2.7.6	RUPTURA DE CABOS.....	41
2.7.7	HIPÓTESES DE CÁLCULO	43
2.8	MODELAGEM E ANÁLISES DAS ESTRUTURAS.....	44
2.8.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	44
2.8.2	SAP2000	46
2.9	DIMENSIONAMENTO	47
2.9.1	VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO.....	48
2.9.2	ESBELTEZ EFETIVA	50
2.9.3	VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO	52
2.9.4	BARRAS SEM ESFORÇOS CALCULADOS	54
2.9.5	VERIFICAÇÃO À FLEXO – COMPRESSÃO.....	55
2.9.6	VERIFICAÇÃO À FLEXO – TRAÇÃO	56
2.10	PROGRAMAÇÃO ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	56
2.10.1	EVOLUÇÃO DOS MODELOS DE LINGUAGEM	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1	FERRAMENTAS.....	59

3.2	PROCEDIMENTOS	60
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	60
3.3.1	MODELAGEM INICIAL COM AUTOCAD	62
3.3.2	OBTENÇÃO DAS AÇÕES E CARREGAMENTOS	64
3.3.3	MODELAGEM E ANÁLISE DA ESTRUTURA DE TORRES NO SAP2000	68
3.3.4	DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA PARA DIMENSIONAR A TORRE	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1	AÇÕES DE PROJETO	79
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE INSTALAÇÃO	79
4.1.2	AÇÃO DO VENTO	80
4.1.3	APLICAÇÃO DAS AÇÕES DE VENTO NA TORRE.....	80
4.2	ANÁLISE DA ESTRUTURA	85
4.2.1	DEFINIÇÃO DO MODELO DISCRETO	85
4.2.2	ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS	87
4.2.3	ESFORÇOS DE PROJETO	89
4.3	DIMENSIONAMENTO COM O PROGRAMA TORRES NBR 17184:2024	93
5	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
	APÊNDICE A – TABELAS DE AÇÕES DE PROJETO	102

1 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão de energia desempenham um papel crucial na infraestrutura elétrica do Brasil. Desde a inauguração da primeira linha de transmissão registrada no país, em 1883, em Diamantina (MG), com apenas dois quilômetros de extensão, até os dias atuais, o Brasil desenvolveu uma extensa rede de distribuição elétrica. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o país possui atualmente 179.311,5 quilômetros de linhas de transmissão operadas por 157 concessionárias. Essas linhas são responsáveis por garantir a transmissão eficiente de energia elétrica em todo o território nacional (ONS, 2022).

As torres treliçadas são uma excelente solução para suportar essas linhas de transmissão, graças à sua alta resistência e eficiência. Elas distribuem as forças de maneira equilibrada, o que reduz a necessidade de fundações complexas e caras. A estrutura treliçada oferece um ótimo desempenho, reduzindo os custos de transporte e instalação. Além disso, sua robustez e modularidade garantem durabilidade e uma construção rápida, atendendo de forma econômica e eficaz às demandas de transmissão de energia (SINGH, 2009).

O desenvolvimento de torres autoportantes para linhas de transmissão no Brasil exige uma atenção especial às normas técnicas e regulatórias, que são fundamentais para garantir a segurança e eficiência dessas estruturas vitais para a transmissão de energia elétrica. A norma ABNT NBR 17184:2024, por exemplo, orienta a projeto e execução de torres, com foco nos critérios da estrutura, enquanto a ABNT NBR 5422:2024 define os critérios para o projeto das linhas aéreas de transmissão, definindo todas as ações e a serem consideradas em projetos e orientações a respeito das linhas de transmissão como um todo.

A análise estrutural das torres que compõem uma linha de transmissão é de suma importância devido à sua relevância para a integridade do sistema elétrico. A segurança e a confiabilidade dessas estruturas de suporte as linhas aeres de transmissão são essencial importância assegurando a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Gontijo (1994), atesta que a importância dessas estruturas é especialmente evidente no contexto da infraestrutura de transmissão de energia elétrica no Brasil, onde o vasto potencial hidrelétrico e as extensas distâncias entre as fontes de geração e os centros de consumo demandam uma rede robusta de linhas de transmissão.

Além disso, na última década, o mundo vem passando por uma transformação tecnológica marcada pelo avanço das *Large Language Models* (LLMs), conhecidas popularmente como inteligências artificiais voltadas para a geração de textos naturais. Essas tecnologias vêm se mostrando cada vez mais eficazes no auxílio a diversos profissionais, sobretudo na automatização de tarefas repetitivas, o que contribui para o aumento da

produtividade. No entanto, por se tratar de uma inovação recente, ainda são incertas as implicações ao longo prazo da incorporação dessas ferramentas em diferentes áreas do conhecimento, o que evidencia a necessidade de estudos que analisem suas aplicações em contextos específicos, como o da engenharia (Bommasani *et al.*, 2021).

Com base nisto, o presente estudo visa contribuir ao sistema elétrico brasileiro, ajudando a garantir a eficácia dos projetos de estruturas para suportes de linhas de transmissão de energia, para isso, foi realizada a modelagem de uma torre treliçada do tipo delta pelo software SAP2000, permitindo uma representação precisa da geometria e das condições de carregamento, incluindo ações como o vento, o peso próprio e situações críticas como a ruptura de cabos, conforme estabelecido na NBR 5422 (ABNT, 2024). A partir da análise estrutural do modelo, serão extraídos os esforços solicitantes para o dimensionamento das barras.

No que tange o dimensionamento, um programa em Python foi desenvolvido com o auxílio de uma LLMs, possibilitando a verificação das barras do tipo cantoneira que compõe a torre, seguindo critérios da nova NBR 17184 (ABNT, 2024), verificando a confiabilidade não só do modelo do suporte, como a eficiência do uso da inteligência artificial na criação de códigos de programação e auxílio a produtividade para a engenharia. A ferramenta Claude, sua versão Sonnet 4 foi usada para esta tarefa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um programa em Python com apoio de uma ferramenta de linguagem artificial para o dimensionamento da torre de suspensão do tipo delta, com base em dados de análise estrutural, incorporando as tecnologias e normativas nacionais mais recentes.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dos trabalhos são:

- a) Revisar a bibliografia técnica e normativa sobre práticas de projeto, métodos de análise estrutural e soluções computacionais empregadas para torres de transmissão de energia destacando abordagens que busquem eficiência, precisão e segurança estrutural.
- b) Classificar e discretizar um modelo de torre identificando características estruturais relevantes e traduzindo-as em um modelo adequado para análise com base nos requisitos das normas brasileiras.

- c) Realizar a modelagem da torre no SAP2000, estabelecendo geometrias e parâmetros necessários para a representação fiel da estrutura para análise estrutural.
- d) Estudar os carregamentos atuantes — vento, peso próprio e situações especiais como ruptura de cabos — com base nas diretrizes e fórmulas da NBR 5422:2024, aplicando as hipóteses mais relevantes.
- e) Executar a análise estrutural do modelo no SAP2000, avaliando o comportamento das barras sob diferentes combinações de carregamento e extraindo os esforços solicitantes necessários para o dimensionamento.
- f) Desenvolver e aplicar um programa em Python, com auxílio de uma LLM, para o dimensionamento automatizado das barras tipo cantoneira com base nos critérios da NBR 17184:2024, avaliando a confiabilidade dos resultados e a efetividade do uso da inteligência artificial no processo de apoio ao projeto estrutural.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

- a) **Capítulo 1** – Introdução: Apresenta o contexto da pesquisa, a relevância das torres de transmissão e os objetivos do estudo.
- b) **Capítulo 2** – Revisão da Literatura: Aborda os fundamentos técnicos e normativos sobre torres metálicas, ações atuantes, modelagem estrutural e aplicações de inteligência artificial na engenharia.
- c) **Capítulo 3** – Materiais e Métodos: Descreve as ferramentas utilizadas, os procedimentos de modelagem, análise no SAP2000 e o desenvolvimento do programa em Python com auxílio de LLMs.
- d) **Capítulo 4** – Resultados e Discussões: Apresenta os resultados obtidos com a análise estrutural e o dimensionamento, discutindo sua adequação às normas e eficácia dos processos.
- e) **Capítulo 5** – Conclusão: Expõe as principais conclusões do estudo, suas contribuições para a engenharia.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ESTUDOS RELEVANTES

Diversos estudos têm contribuído para o avanço da engenharia aplicada às torres treliçadas para linhas de transmissão de energia, especialmente no que tange à análise estrutural,

modelagem computacional e à aplicação de inteligência artificial no auxílio a projetos de engenharia, tais como:

Gontijo (1994) apresentou uma abordagem clássica para o projeto de torres autoportantes, detalhando os métodos de determinação de cargas atuantes e os esforços solicitantes nas barras, utilizando tanto o processo clássico quanto o método dos deslocamentos. Sua obra foi essencial para a compreensão da sequência de cálculo estrutural adotada neste trabalho, especialmente no que se refere à definição das hipóteses de carregamento.

Argenta (2007) contribuiu para a modelagem computacional ao propor uma abordagem dinâmica para torres de transmissão, considerando efeitos como a ação do vento e a ruptura de cabos. O autor utilizou o método dos elementos finitos e enfatizou a importância do comportamento elástico-linear das estruturas. Parte dessa metodologia foi aproveitada na definição das ações e hipóteses de carregamentos aplicadas neste estudo.

Kaminski Jr. (2007) destacou a importância da consideração de incertezas nos modelos estruturais e sua influência na confiabilidade dos resultados. A análise realizada incorporou diferentes representações de elementos estruturais, demonstrando como decisões de modelagem afetam a resposta da torre. Essa visão influenciou as escolhas de discretização adotadas neste trabalho, especialmente no uso de elementos do tipo pórtico espacial no SAP2000.

Torres (2021) analisou uma torre de suspensão com o uso do software SAP2000, aplicando as normas NBR 5422 e NBR 8800. A pesquisa focou em diferentes hipóteses de carregamento extremo, como ruptura de cabos e ação do vento, apresentando bons resultados no uso do SAP2000 para análise não linear. Sua abordagem confirmou a aplicabilidade do software adotado nesta pesquisa.

Alves (2018) explorou técnicas de otimização aplicadas ao projeto de torres metálicas, considerando simultaneamente variáveis geométricas e topológicas. Embora este trabalho não tenha se aprofundado em algoritmos de otimização, a noção de modularidade estrutural abordada por Alves contribuiu para a escolha por uma torre do tipo delta.

Oliveira (2017) analisou a importância dos contraventamentos planos em torres de transmissão, destacando seu papel na estabilidade global e no controle dos deslocamentos gerados por ações horizontais. O estudo validou a função essencial destes elementos para o desempenho e segurança da estrutura.

Albermani *et al.* (2009) realizaram um estudo de análise não linear aplicada a torres de transmissão e demonstraram, com base em testes em escala real, verificando que modelos lineares com ligações articuladas tendem a apresentar resultados inconsistentes em relação ao

comportamento real das estruturas. Os autores desenvolveram uma metodologia numérica capaz de prever o colapso de uma torre com alta precisão, reforçando a importância da consideração dos efeitos geométricos e da rigidez das ligações na análise de torres treliçadas. Esse trabalho influenciou diretamente a escolha do modelo não linear adotado nesta pesquisa.

Rao *et al.* (2012) aprofundaram a abordagem numérica e apresentaram um modelo não linear para simular colapsos progressivos em torres treliçadas, enfatizando o uso de critérios de plastificação em membros comprimidos e a importância de identificar os mecanismos de instabilidade. A metodologia utilizada pelos autores serviu de base para estruturar a sequência de análise adotada neste estudo.

Heathcote (2001) abordou a questão da confiabilidade estrutural sob a ótica da engenharia forense e da responsabilidade legal, destacando como simplificações excessivas em modelos estruturais podem comprometer a segurança e a legitimidade de um projeto. Seu trabalho serviu de apoio teórico para justificar a rejeição de modelos simplificados, como os totalmente rotulados, e reforçou a necessidade de adotar modelos mais representativos da realidade física da estrutura.

Nascimento *et al.* (2024) realizaram uma avaliação empírica sobre o desempenho de diferentes modelos de linguagem de larga escala (LLMs) em tarefas de geração de código voltadas para ciência de dados. Os autores analisaram a eficácia de modelos como ChatGPT e Claude em diversos níveis de dificuldade e categorias de problemas, identificando suas limitações e potencialidades. A abordagem estruturada dos testes realizada no estudo influenciou a estratégia adotada neste trabalho para verificar a robustez do código gerado com apoio de IA reforçando a importância de validação humana qualificada no uso de modelos generativos em engenharia.

Murr *et al.* (2023) investigaram o impacto da especificidade dos prompts na qualidade do código Python gerado por LLMs como ChatGPT, Claude e Bard. Os resultados indicaram que prompts bem elaborados resultam em maior precisão e aderência normativa nos códigos produzidos. Esse estudo fundamentou a forma como foram estruturados os comandos fornecidos ao modelo Claude durante o desenvolvimento do algoritmo de dimensionamento das barras da torre, otimizando a geração de funções coerentes com os requisitos estruturais.

Sarsa *et al.* (2022) avaliaram a capacidade do modelo OpenAI Codex na geração automática de exercícios e explicações de código, destacando sua eficácia na produção de artefatos educacionais em cursos de programação. A pesquisa demonstrou o potencial dos LLMs na geração de códigos claros, com testes e soluções embutidas. Essa referência inspirou

a adoção de uma abordagem interativa e explicativa na elaboração do programa em Python deste trabalho.

Sá (2024), em seu trabalho de conclusão de curso, desenvolveu e avaliou uma ferramenta web baseada em LLMs (GPT e Gemini) para auxiliar na identificação e explicação de bugs em códigos-fonte. A pesquisa demonstrou a aplicabilidade de modelos generativos no suporte ao desenvolvimento de software e destacou a necessidade de revisões críticas por parte do usuário. A estrutura metodológica apresentada no trabalho serviu de base para a organização da fase de testes do programa aqui desenvolvido, evidenciando como a IA pode ser usada como ferramenta de apoio e não como substituto do engenheiro projetista.

2.2 LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão são um componente essencial de um sistema elétrico, o qual no contexto brasileiro é comumente organizado em três etapas: geração, transmissão e distribuição de energia aos pontos de consumo, como ilustrado na Figura 2.1. No Brasil, uma parcela significativa, correspondente a 61,9%, da energia elétrica consumida é gerada por usinas hidrelétricas, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022). Tais usinas frequentemente são localizadas em áreas distantes dos centros urbanos, demandando, conseqüentemente, uma extensa rede de linhas de transmissão para viabilizar o transporte eficiente da energia elétrica produzida até os centros de consumo.

Figura 2.1 - Sistema de transmissão de energia elétrica.



Fonte: Brametal (2021).

De acordo com Gontijo (1994), em associação às unidades de produção de energia, estão as subestações, responsáveis por elevar a tensão da energia para possibilitar sua transmissão através da rede por longas distâncias, minimizando as perdas. Atualmente, as tensões de transmissão no Brasil variam de 69 kV a 800 kV, e a Tabela 2.1 classifica os níveis de tensão adotados na transmissão de energia elétrica no Brasil.

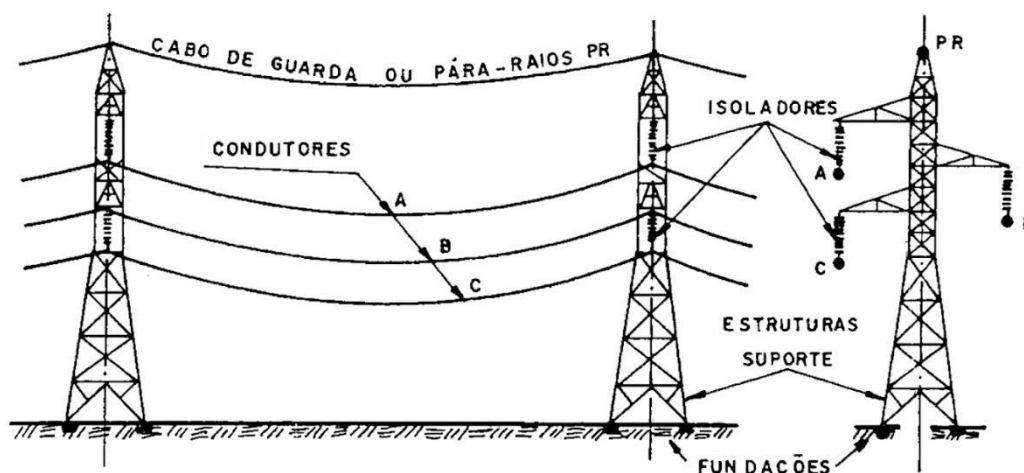
Tabela 2.1 - Classificação das linhas de transmissão.

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

Fonte: Gontijo (1994).

Segundo Labegalini *et al.* (1992), as linhas de transmissão são compostas pelas seguintes partes principais, as quais são ilustradas na Figura 2.2

Figura 2.2 - Principais elementos das linhas de transmissão.

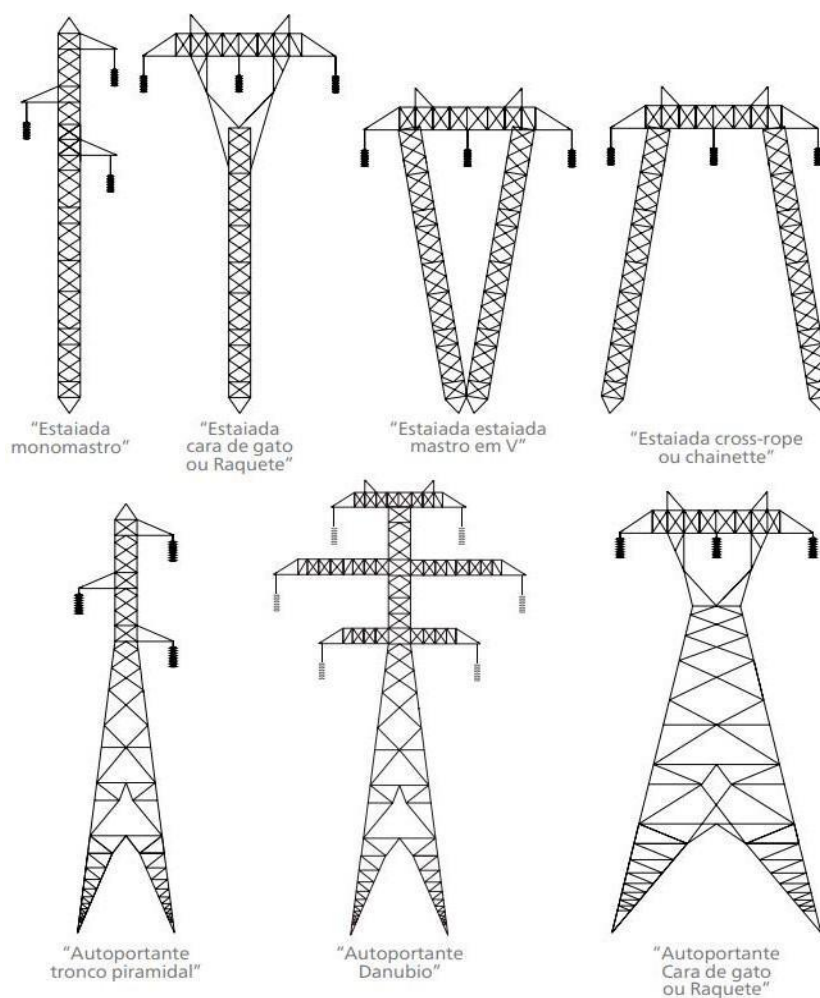


Fonte: Labegalini *et al.* (1992).

- **Cabos condutores de energia:** Componentes responsáveis por transportar a eletricidade ao longo das linhas de transmissão.
- **Cabos de guarda ou para-raios:** Dispositivos instalados para proteger a linha de transmissão contra descargas atmosféricas, direcionando-as para o solo.

- **Estruturas isolantes:** Elementos que garantem o isolamento elétrico entre os condutores e o solo, evitando curtos-circuitos.
- **Estruturas de suporte:** Suportes físicos, como torres e postes, que sustentam os cabos condutores e outros componentes da linha de transmissão
- **Fundações:** Bases estruturais que proporcionam estabilidade e sustentação às estruturas de suporte das linhas de transmissão.
- **Aterramento:** Sistema projetado para dissipar correntes elétricas indesejadas, protegendo equipamentos e pessoas contra choques elétricos.
- **Acessórios:** Componentes adicionais que complementam o funcionamento das linhas de transmissão, como conectores, chaves e disjuntores.

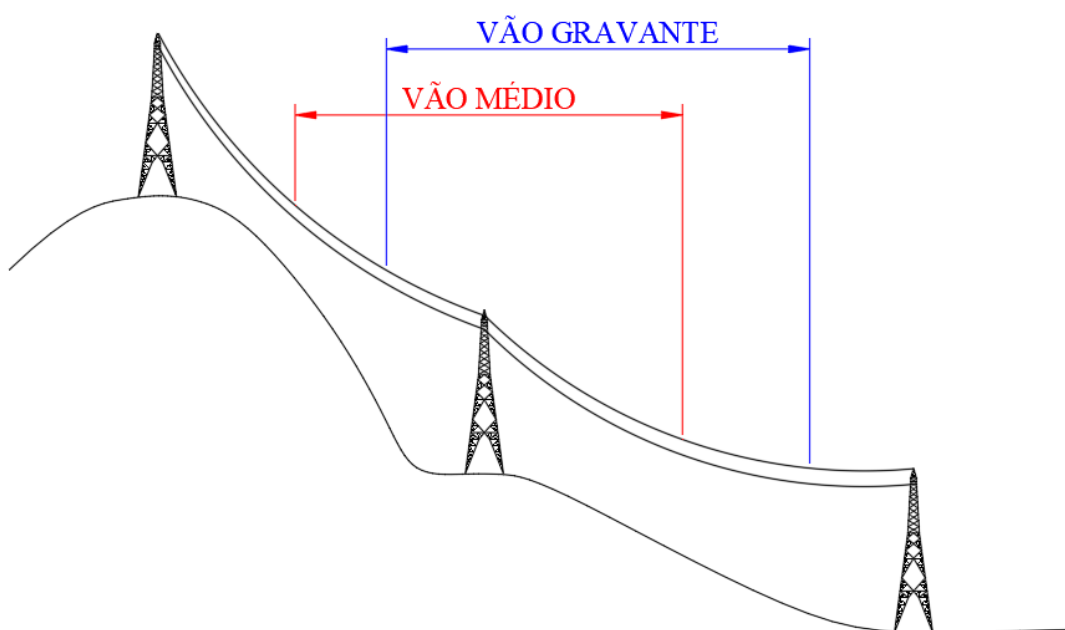
Figura 2.3 - Classificação dos tipos de torres



Fonte: Brametal (2021).

Um dos componentes importantes das linhas de transmissão são os vãos de cabos. De acordo com Engetower (2021), o vão gravante, também conhecido como vão de peso, refere-se ao comprimento do cabo que determina a força vertical exercida pelo peso dos cabos na torre. Esse cálculo é feito pela distância entre os pontos mais baixos dos vãos adjacentes. Por outro lado, o vão médio, ou vão de vento, é o comprimento do cabo que determina a força horizontal causada pelo vento, calculado pela média dos comprimentos dos vãos adjacentes. Em terrenos planos, o vão gravante é igual ao vão médio, pois a distribuição das forças é uniforme e simétrica. A Figura 2.4 ilustra como esses vãos se comportam nas linhas de transmissão.

Figura 2.4 - Vão Gravante x Vão Médio.



Fonte: Autor.

2.3 TIPOS DE TORRES E SUAS APLICAÇÕES

As torres são as estruturas de suporte mais utilizadas nas linhas transmissão, geralmente compostas por materiais metálicos como o aço galvanizado, podem ser classificadas de diferentes maneiras.

- **Quanto à voltagem da linha:** é importante destacar que a voltagem de uma linha elétrica exerce uma influência direta nas características das estruturas de suporte. Conforme a voltagem aumenta, os cabos utilizados tendem a ser mais espessos, resultando em cargas mais significativas para a estrutura e necessidade de dimensões

mais amplas para atender às distâncias elétricas exigidas. No Brasil, os níveis de tensão comuns incluem 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV, 765 kV e 800 kV.

- **Quanto à disposição dos condutores:** existem três tipos principais de torres de transmissão de energia elétrica. Estas são: a triangular, para circuito simples; a vertical, para circuito duplo; e horizontal em forma de delta, também para circuito simples.
- **Quanto ao tipo de corrente na linha:** é relevante observar que as torres de transmissão são principalmente projetadas para suportar linhas de corrente alternada (CA), que é o padrão global para distribuição de energia elétrica. Contudo, em algumas aplicações específicas, como transmissão de longa distância ou submarina, pode ser usada corrente contínua (CC), embora menos frequentemente. As estruturas de suporte são projetadas de acordo com os requisitos específicos de cada tipo de corrente.
- **Quanto à quantidade de circuitos:** é possível projetar torres de transmissão para suportar linhas simples ou duplas. Nas linhas simples, há apenas um conjunto de condutores, enquanto nas linhas duplas, há dois conjuntos de condutores paralelos. Essa distinção depende da capacidade de transmissão necessária e das características específicas do projeto de distribuição de energia elétrica.
- **Quanto à função da linha:** as torres de transmissão podem ser projetadas para desempenhar várias funções, incluindo suspensão, ancoragem, angulação, derivação, transposição e travessia. Cada tipo de torre é projetado para atender a uma dessas funções específicas, dependendo das necessidades da rede elétrica e das condições do terreno. Essa diversidade de funções permite que as linhas de transmissão sejam instaladas e operadas de forma eficiente e segura, adaptando-se às características geográficas e às exigências de distribuição de energia elétrica.
- **Quanto às funções das torres:** é essencial ressaltar que cada uma desempenha um papel crucial nas linhas de transmissão. As torres de suspensão mantêm os cabos suspensos, as de ancoragem os fixam, as de ângulo facilitam mudanças de direção, as de derivação permitem ramificações, as de transposição equalizam as fases dos circuitos e as de travessia superam obstáculos naturais, como vales e rios.
- **Quanto ao formato e à forma de resistência das estruturas das torres de transmissão de energia elétrica:** estas são divididas em dois grupos principais: as torres estaiadas, que usam cabos para transmitir esforços às fundações, e as torres autoportantes, que transmitem as solicitações diretamente às fundações. Os formatos

comuns incluem tronco-piramidal, danúbio e delta para torres autoportantes, e monomastro, raquete, mastro em V e chainette para torres estaiadas. Como mostra a Figura 2.3.

2.4 COMPOSIÇÃO DE UMA TORRE AUTOPORTANTE

As estruturas das torres autoportantes podem ser classificadas em três tipos segundo Labegalini *et al.* (1992), são elas:

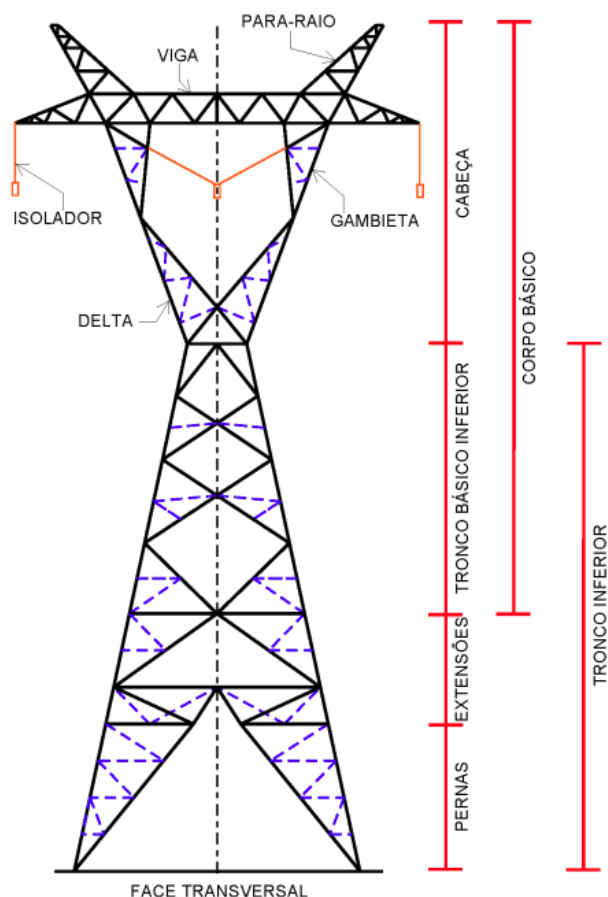
- **Rígidas:** aquelas que não apresentam deformações visíveis;
- **Flexíveis:** aquelas que apresentam deformações sensíveis e são elásticas, cujas deformações desaparecem ao cessar a solicitação.
- **Suporte misto ou semi-rígido:** estruturas que apresentam rigidez em uma das direções principais.

A Figura 2.5 mostra uma torre autossustentável do tipo delta, que traz elementos cruciais como o Delta, a Gambieta e a Viga, todos concentrados na parte superior, chamada de cabeça. Ali também ficam os para-raios e as mísulas, que seguram os cabos condutores e os isoladores, garantindo que a linha de transmissão fique estável e segura. Como explica Nargel (2019), esse tipo de torre segue um padrão modular bem prático, dividido em três partes principais: o corpo básico, as extensões e as pernas.

O corpo básico inclui a cabeça e o tronco básico inferior (TBI), formando o coração da torre. As extensões são peças que podem ser trocadas para ajustar a altura da torre, dependendo das exigências do projeto, como a posição dos cabos em alturas variadas. As pernas, por sua vez, são responsáveis por adaptar a torre ao terreno, permitindo que ela se encaixe bem em diferentes tipos de solo e relevo. Esse design modular não só facilita a criação da torre, mas também a fabricação, já que não é preciso fazer um projeto específico para cada situação. Isso acaba reduzindo custos de forma considerável e reduzindo os erros na fabricação e montagem (Nargel, 2019).

A escolha por torres do tipo delta nas linhas de transmissão traz muitas vantagens, já que elas permitem uma configuração mais eficiente e segura para a rede elétrica. A flexibilidade de seus componentes, que podem ser ajustados conforme o terreno e as necessidades do projeto, torna esse modelo uma opção prática e confiável, como também ressaltado por Nargel (2019).

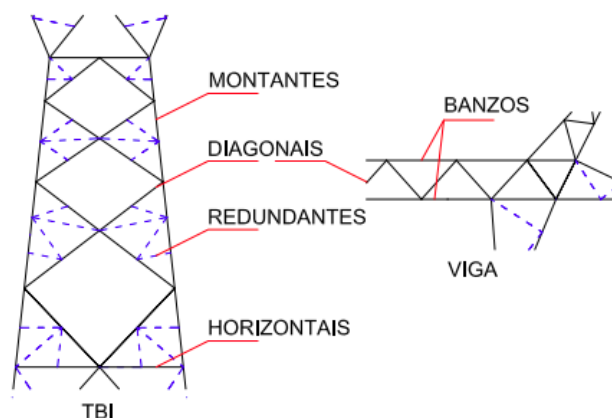
Figura 2.5 - Subestrutura de uma torre autoportante tipo delta.



Fonte: Nargal (2019).

De acordo com Nargel (2019), a classificação das barras na estrutura do tronco básico inferior (TBI) e da viga é feita com base no tipo e posicionamento de cada barra. As principais barras são os montantes, que possuem seções transversais maiores e suportam a maior parte dos esforços. As barras diagonais e horizontais, por outro lado, são responsáveis pelo travamento da estrutura e geralmente são menos solicitadas. Nas vigas das torres delta, os banzos desempenham um papel crucial ao fornecer resistência à flexão. Além disso, existem barras redundantes ou secundárias, que podem não estar incluídas no modelo estrutural, mas ajudam a reduzir os comprimentos de flambagem das barras conectadas, aumentando assim a resistência à compressão dessas barras. A Figura 2.6 ilustra esses elementos e suas classificações na estrutura.

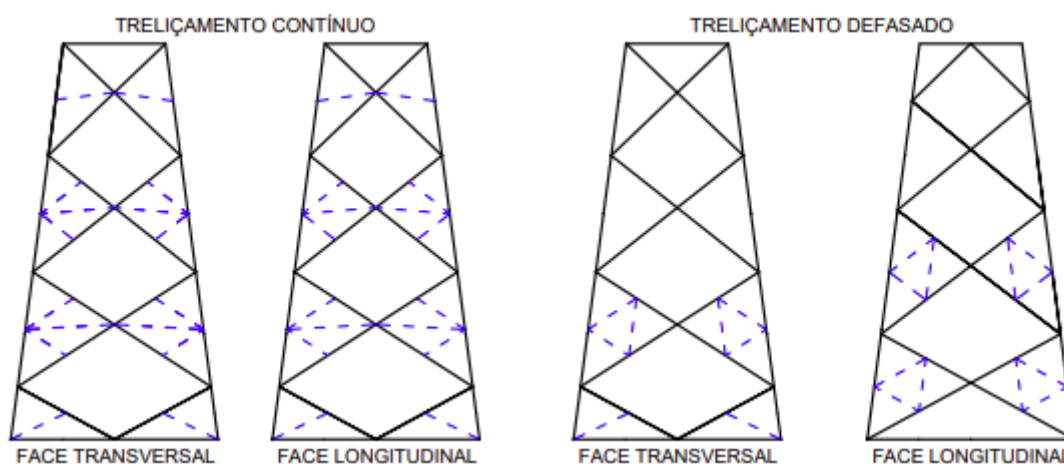
Figura 2.6 – Classificação das barras do tronco básico inferior e da viga.



Fonte: Nargel (2019).

Nargel (2019) também distingue as estruturas de TLTs pelo padrão de treliçamento da face transversal em relação à longitudinal. Quando as barras diagonais de faces adjacentes se conectam em um mesmo ponto, a estrutura é considerada contínua. Por outro lado, quando as diagonais de faces adjacentes se alternam ao longo dos montantes, a estrutura é classificada como defasada. Estruturas defasadas são geralmente preferidas para obter menores comprimentos de flambagem nos montantes, sem a necessidade de adicionar barras redundantes. A Figura 2.7 ilustra esses padrões de treliçamento.

Figura 2.7 - Padrões de treliçamento do tronco básico inferior.

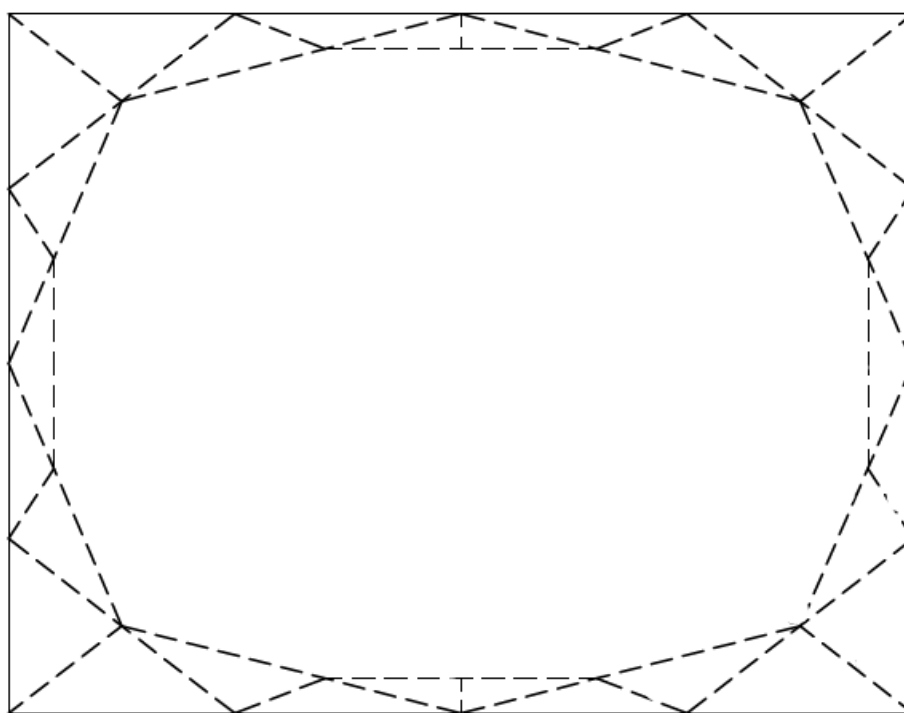


Fonte: Nargel (2019).

Outro elemento importante é contraventamento plano que, desempenha um papel crucial nas torres autoportantes, assegurando a estabilidade estrutural indispensável para

suportar cargas horizontais, como as provocadas pelo vento. Em estruturas treliçadas, o vento se destaca como a principal força de dimensionamento, e o contraventamento é vital para reduzir deslocamentos e garantir a segurança da estrutura. Esse componente aumenta a rigidez global da torre, minimizando os efeitos de flambagem nos elementos comprimidos e aprimorando o desempenho dinâmico, o que é especialmente relevante em torres esbeltas e altas. Assim, o uso adequado do contraventamento não só otimiza a resistência ao vento, mas também preserva a integridade estrutural da torre ao longo do tempo (Oliveira, 2017).

Figura 2.8 – Contraventamento plano.



Fonte: Autor.

2.5 ETAPAS DE PROJETO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Gontijo (1994) destaca que o projeto de uma linha de transmissão segue nove etapas sequenciadas, sendo que o prazo de execução de cada uma delas é função principalmente da extensão da linha e do nível de voltagem utilizado para a transmissão de energia. Essas etapas incluem:

- **Viabilização de recurso energético:** etapa inicial onde é feito um estudo para avaliar o custo da faixa de terreno, as condições do relevo, a voltagem a ser utilizada, a capacidade de geração do recurso energético, o custo da geração de energia e a disponibilidade financeira para execução da obra.

- **Levantamento topográfico:** após a definição do traçado da linha, é realizado o levantamento topográfico do percurso, gerando o perfil do terreno, juntamente com a análise do solo nas regiões de possíveis montagens das estruturas.
- **Locação das estruturas:** com posse do perfil do terreno, é feita a locação das estruturas, seguindo um processo usual que gera um desenho gráfico do perfil longitudinal do eixo da faixa de servidão. Durante a elaboração desse perfil, é recomendado ao projetista obter o menor número de torres possível, manter um padrão entre as distâncias, obedecer às distâncias mínimas normativas nas transversais de rodovias e ferrovias, além de evitar a locação de torres em brejos, beira de riachos ou rios, fundo de valas e locais onde o solo apresenta baixa resistência.
- **Escolha do tipo de torre:** para selecionar o tipo de torre adequado, é necessário verificar os espaçamentos mínimos e máximos entre as fases, a configuração dos isoladores, o ângulo de proteção do cabo para-raios, as distâncias elétricas mínimas entre as partes eletrizadas e a torre, a flecha dos condutores, o número de circuitos e a altura de segurança.
- **Cálculo preliminar das estruturas:** nesta etapa, são confeccionadas planilhas com as quantidades de torres básicas, extensões, pernas e tipos de fundações para cada família de torre, levando em consideração a especificação para a linha de transmissão e as normas de projeto. Uma empresa interessada no fornecimento das estruturas deve calcular todas as famílias de torres para obter o peso de cada elemento estrutural e o custo total da encomenda. Com base no projeto arquitetônico da torre, o projetista pode determinar a geometria do treliçamento adotado e os esforços solicitantes, permitindo o dimensionamento preciso das barras de perfis, ligações e fundações que compõem a torre. Nesta etapa, a análise estrutural é fundamental para garantir um dimensionamento seguro e eficiente.
- **Custo total da linha de transmissão:** com o projeto das estruturas da linha de transmissão elaborado, é possível avançar com o orçamento, considerando os preços dos materiais, fabricação e montagem das estruturas e fundações, além da compra e montagem dos cabos condutores, isoladores e demais detalhes. O custo final resulta em um valor por unidade de comprimento da linha, que pode ser comparado e avaliado com o preço de outras linhas já executadas. A mesma avaliação pode ser feita considerando o peso das estruturas por unidade de comprimento.

- **Projeto definitivo:** no projeto definitivo, são verificadas as cargas reais devido à ação do vento e ao peso próprio da estrutura, realizando-se um novo cálculo. Após isso, são produzidos os desenhos de detalhamento das estruturas e enviados para a aprovação dos contratantes.
- **Fabricação e teste:** após a aprovação do projeto definitivo, a estrutura pode ser fabricada e pré-moldada. Durante esse processo, são detectados e corrigidos os erros de projeto. Na maioria dos casos, as estruturas são submetidas a testes em escala real, onde são submetidas às forças das várias hipóteses de carregamento para as quais a estrutura foi dimensionada, verificando-se as tensões por meio da medição das deformações e deslocamentos. Caso a estrutura não suporte o carregamento de projeto, o projeto retorna para a etapa de análise e dimensionamento para a correção das falhas e, em seguida, é testado novamente. Somente após a aprovação, o projeto é liberado para a fabricação.
- **Montagem da linha:** por fim, inicia-se o processo de montagem da linha de transmissão, que envolve grandes dificuldades, pois geralmente as torres são locadas em regiões de difícil acesso. O trabalho é executado por duas equipes, onde uma percorre o trajeto preparando o terreno, fazendo as obras de terraplanagem e executando as fundações, enquanto a outra equipe monta as estruturas para que possam receber os cabos por meio de um sistema de bobinas e roldanas.

2.6 NORMATIZAÇÃO

A elaboração dos projetos das estruturas de suporte das linhas de transmissão no Brasil é regida por normas brasileiras e internacionais pertinentes. Dentre as principais normas que viabilizam a elaboração destas estruturas, destacam-se:

- **AISC/LRFD (American Institute of Steel Construction/Load and Resistance Factor Design):** Esta norma adota um método baseado em fatores de resistência para o projeto de estruturas de aço, considerando as cargas e resistências envolvidas.
- **ASCE (American Society of Civil Engineers):** Embora não seja exclusiva para estruturas de aço, a ASCE fornece diretrizes e padrões amplamente reconhecidos para o projeto de várias formas de estruturas, incluindo as de aço.

- **A NBR 17184 (Projeto e execução de torres metálicas treliçadas para linhas de transmissão - Procedimento):** Estabelece diretrizes, critérios, dados e métodos para projeto e fabricação de torres metálicas treliçadas galvanizadas, de perfis de aço aparafusados, adotando estados limites e critérios probabilísticos de confiabilidade, garantindo integridade estrutural e segurança das torres em operação.
- **NBR 5422 (Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia):** Esta norma estabelece os requisitos para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão acima de 38 kV a 800 kV, incluindo critérios de análise e segurança. Entre seus tem mais relevantes estão:
 - a) Parâmetros meteorológicos – velocidade do vento de projeto, considerando a rugosidade do terreno, período de retorno e altura da estrutura.
 - b) Estruturas de fundações – cargas de projeto, hipóteses de carga e recomendações para o cálculo das fundações.
 - c) Cabos e condutores – Determinação das hipóteses mecânicas para o cálculo mecânico e obtenção da flecha máxima, considerando condições ambientais.
 - d) Esforços mecânicos – Cargas de vento, cargas permanentes, cargas de montagem e carga de contenção.
 - e) Distâncias de segurança;
 - f) Aterramento;
 - g) Travessias;
 - h) Faixas de segurança.
- **NBR 8842 (Suporte Metálico Para Linhas de Transmissão):** Orienta as condições básicas ensaios de carregamento para os suportes metálicos das linhas de transmissão.
- **NBR 8850 (Execução de Suporte Metálico para Linha de Transmissão):** Esta norma define as condições básicas para o cálculo, projeto e fabricação de suportes metálicos para linhas de transmissão. Apresenta recomendações como curvas de flambagem para as peças compridas e informações relativas ao projeto e fabricação.
- **A NBR 7007 (2016) - Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural - Requisitos -** estabelece os critérios de

aceitação de aços-carbono e aços microligados em barras e perfis laminados a quente para uso estrutural.

- **ASCE 74 (American Society of Civil Engineers):** Fornece diretrizes para cargas estruturais específicas de linhas de transmissão elétrica.
- **IEC 60826 (International Electrotechnical Commission):** Estabelece critérios para a resistência de linhas de transmissão elétrica em termos de carga aplicada.

2.7 AÇÕES E CARREGAMENTOS

2.7.1 VENTO NOS CABOS E ESTRUTURAS (MODELO NBR5422:2024)

A norma brasileira NBR 5422 (ABNT, 2024) aborda a determinação dos esforços decorrentes da ação do vento nos cabos e nas estruturas das torres da linha de transmissão. Inicialmente, é calculada a pressão dinâmica do vento (q_0), que permite a obtenção dos esforços aplicados nos cabos, correntes de isoladores e suportes. Nesse contexto, temos:

$$q_0 = \frac{1}{2} \mu V_p^2 \quad (1)$$

Onde,

- q_0 : pressão dinâmica em pascal (Pa);
- μ : massa específica do ar, em (kg/m³);
- V_p : velocidade de projeto para um período de integração de 10 minutos em (m/s).

$$\mu = 1,225 \frac{288,15}{t + 273,15} \exp(-1,2 \times 10^{-4} alt) \quad (2)$$

Onde,

- t : temperatura do ar em graus Celsius (°C);
- alt : altitude média da região, expressa em metros (m);

Sendo que, a temperatura média dos últimos 10 anos foi obtida a partir dos registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

$$V_p = K_{tur} V_R \quad (3)$$

$$V_{p30s} = K_{int} V_p$$

(4)

$$V_{p3s} = 1,15 K_{int} V_p$$

(5)

Onde,

- V_p :

velocidade de projeto para um período de integração de 10 minutos em (m/s).
- V_{p30s} :

velocidade de projeto para um período de integração de 30 segundos (m/s);
- V_{p3s} :

a velocidade de projeto para um período de integração de 3 segundos (microexplosões responsáveis por 80% das quedas de torres no país).
- K_{tur} :

fator de conversão da turbulência, estabelecido para a região brasileira conforme a Tabela 2.2;
- K_{int} :

fator de conversão do período de integração de 10 minutos para 30 segundos (Tabela 2.3) e para 3 segundos (
Tabela 2.4);
- V_R :

velocidade de referência, expressa em metros por segundo (m/s) indicadas na Figura 2.9.

Tabela 2.2 - Fator de turbulência (10 min).

Região	<i>K_{tur}</i>
Sul	1,08
Sudeste e Centro Oeste	1,12
Norte e Nordeste	1,16

Fonte: ABNT (2024).

Tabela 2.3 – Fatores de conversão do período de integração de 10 min para 30 s.

	Categoria do terreno	<i>K_{int}</i>
A	Vastas extensões de água e áreas planas	1,17
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,22
C	Terre com obstáculos numerosos e pequenos	1,30
D	Áreas urbanizadas, terrenos com muitas arvores altas	1,48

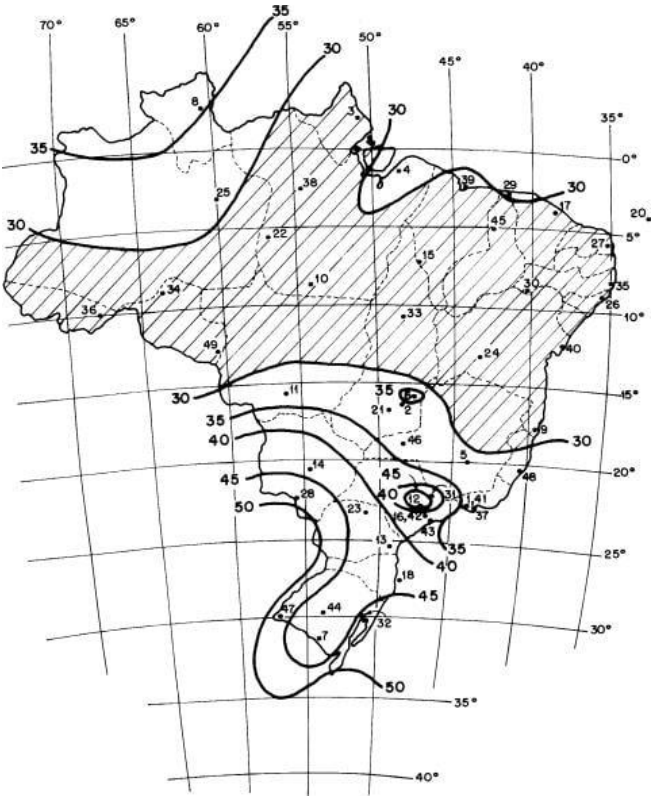
Fonte: ABNT (2024).

Tabela 2.4 – Fatores de conversão do período de integração de 10 min para 3 s.

	Categoria do terreno	<i>k_{int}</i>
A	Vastas extensões de água e áreas planas	1,31
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,41
C	Terre com obstáculos numerosos e pequenos	1,58
D	Áreas urbanizadas, terrenos com muitas arvores altas	1,88

Fonte: ABNT (2024).

Figura 2.9 - Isopletas de velocidade básica para períodos de integração de 3s min (m/s).



Fonte: ABNT (2023).

2.7.2 AÇÃO DO VENTO NOS CABOS

De acordo com as diretrizes da norma NBR5422 (ABNT, 2024), é possível determinar os esforços gerados pela ação do vento nos cabos aplicados nos pontos de fixação na estrutura por meio da seguinte expressão:

$$Ac = q_0 C_X G_C G_L d L sen^2 \Omega \tag{6}$$

Onde,

- q_0 : pressão dinâmica em pascal (Pa);
- C_X : medida adimensional que descreve a resistência do cabo ao fluxo de ar;
- G_C : fator combinado de vento para cabos;
- G_L : grandezas adimensionais que influenciam a interação entre o cabo e o vento;
- d : diâmetro do cabo em metros (m);
- L : em metros (m);
- Ω ângulo de incidência do vento em relação ao cabo Ω

Para cabos com encordoamento usual, podemos expressar o coeficiente de arrasto C_X como:

- a) $C_X = 1,0$ para $d \geq 15 \text{ mm}$
- b) $C_X = 1,0$ para $d < 15 \text{ mm}$

Os valores do fator combinado de vento G_C para a força exercida pelo vento sobre o cabo, em relação à categoria do terreno e à altura média do cabo (h), são mostrados na Figura 2.10 e na Tabela 2.5.

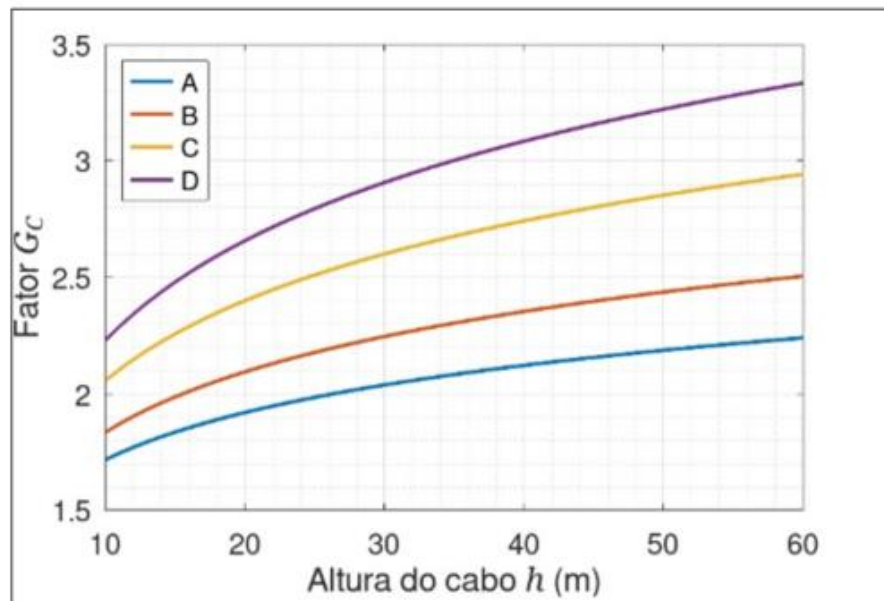
Tabela 2.5 – Fórmulas para obtenção de G_C .

Categoria do terreno		G_C
A	Vastas extensões de água e áreas planas	$0,2914 \ln h + 1,0468$
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	$0,3733 \ln h + 0,9762$
C	Terre com obstáculos numerosos e pequenos	$0,4936 \ln h + 0,9124$
D	Áreas urbanizadas, terrenos com muitas árvores altas	$0,6153 \ln h + 0,8144$

Fonte: ABNT (2024).

As fórmulas da Tabela 2.5 são aplicáveis apenas para $h \geq 10 \text{ m}$, caso $h < 10 \text{ m}$, adotar valores para $h = 10 \text{ m}$.

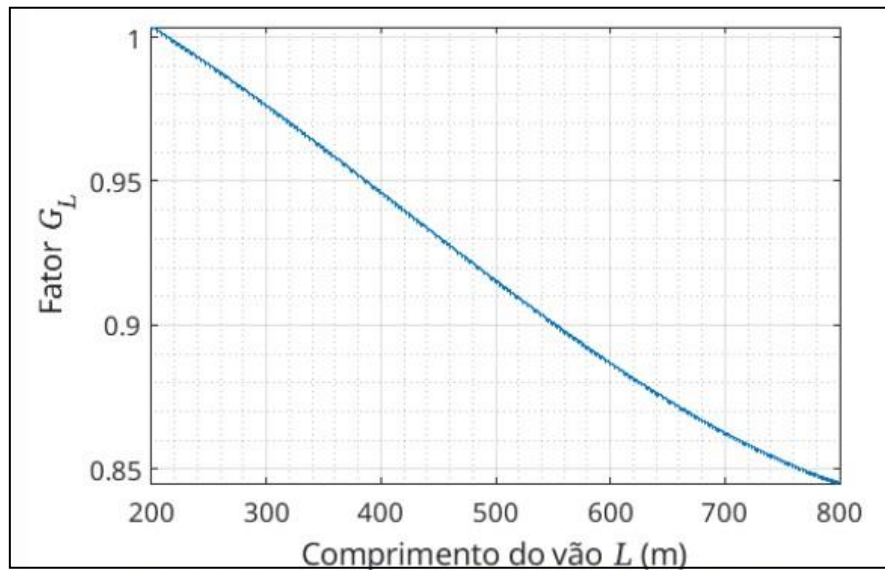
Figura 2.10 - Fator combinado de vento G_c para cabos.



Fonte: ABNT (2024).

O fator de efetividade GL = em função do comprimento do vão é expresso conforme a Figura 2.11.

Figura 2.11 – Fator de efetividade.



Fonte: ABNT (2024).

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{0,858} \{ 1,693 \times 10^{-10} L^3 - 1,093 \times 10^{-7} L^2 - 0,0002686 L + 1,057 \} & L < 200 \text{ m} \\
 & & 200 \leq L < 800 \text{ m} \\
 & 0,858 & L \geq 800 \text{ m}
 \end{aligned} \quad (7)$$

A força total transmitida ao suporte, na direção do eixo transversal, devido ao vento sobre um cabo, deve ser calculada da seguinte forma:

$$A_{cx} = \frac{1}{2} (A_{c1} + A_{c2}) \cdot \cos \frac{\phi}{2} \quad (8)$$

Onde,

A_{c1} e A_{c2} : forças totais exercidas pelo vento sobre os cabos nos dois vãos adjacentes, em newton (N);

ϕ : ângulo de deflexão do eixo da linha em graus.

2.7.3 AÇÃO DO VENTO SOBRE CADEIAS DE ISOLADORES

O esforço causado pelo vento nos conjuntos de isoladores, exercido nos seus pontos de fixação na estrutura, pode ser determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$A_i = 1,2 q_0 G_t S_i \quad (9)$$

Onde,

A_i : força resultante na cadeia de isoladores, expressas em newton (N);

q_0 : pressão dinâmica expressa em pascal (Pa);

G_t : fator combinado de vento para suportes e paracadeia de isoladores, admissional dada pela Tabela 2.6;

S_i : área efetiva das cadeias de isoladores, em metros quadrados (m²).

Tabela 2.6 – Fórmulas para obtenção de G_t .

Categoria do terreno		G_t
A	Vastas extensões de água e áreas planas	$-0,0002 h^2 + 0,0232 h + 1,4661$
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	$-0,0002 h^2 + 0,0274 h + 1,6820$
C	Terre com obstáculos numerosos e pequenos	$-0,0002 h^2 + 0,0298 h + 2,2744$
D	Áreas urbanizadas, terrenos com muitas árvores altas	$-0,0002 h^2 + 0,0384 h + 2,9284$

Fonte: ABNT (2024).

2.7.4 AÇÃO DO VENTO SOBRE A ESTRUTURA

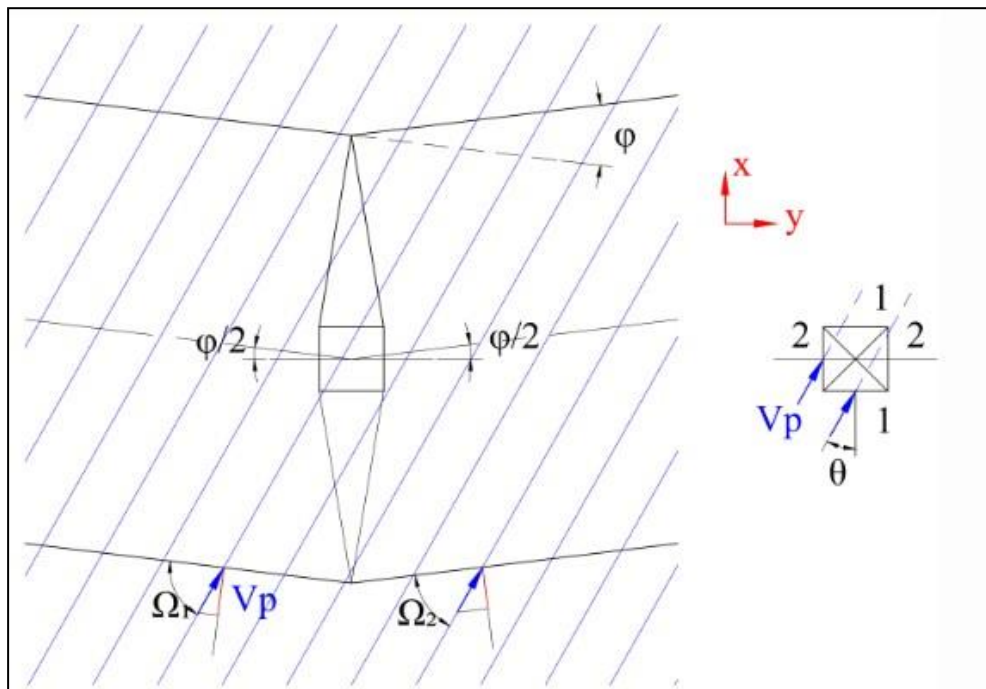
A determinação da influência do vento em uma estrutura é realizada pela análise dos painéis de comprimento inferior a 10 metros, com a aplicação das cargas nos seus centros de gravidade. A velocidade do vento é ajustada com base na altura do painel. Em suportes de seção transversal retangular, essa influência pode ser calculada usando a seguinte expressão:

$$A_t = q_0(1 + 0,2 \operatorname{sen}^2 2\theta)(S_{T1}C_{X1} \cos^2 \theta + S_{T2} C_{X2} \operatorname{sen}^2 \theta) G_t \quad (9)$$

Onde,

- A_t : força exercida sobre um tronco em newtons (N);
- q_0 : pressão dinâmica expressa em pascal (Pa);
- θ : o ângulo de incidência do vento em graus ($^\circ$);
- S_{T1} e S_{T2} : áreas líquidas totais das faces 1 e 2 do tronco, projetadas ortogonalmente sobre um plano paralelo à respectiva face em metros quadrados (m^2);
- C_{X1} e C_{X2} : os coeficientes de arrasto próprio das faces 1 e 2 para um vento horizontal perpendicular à respectiva face, sendo adimensionais;
- G_t : fator combinado de vento, adimensional, como definido na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Ângulo de incidência do vento em relação ao suporte.



Fonte: ABNT (2024).

A força A_t deve ser decomposta conforme as direções das faces transversal e longitudinal do tronco. Essas componentes devem ser aplicadas no centro de gravidade de cada face:

$$A_{t1} = A_t \cos \theta \quad (10)$$

$$A_{t2} = A_t \sin \theta \quad (11)$$

O coeficiente de arrasto para painéis de suporte treliçado compostos de perfis planos e dado pela seguinte expressão:

$$C_{X1,2} = 4,1757 X^2 - 6,1681X + 4,0088 \quad (12)$$

Onde,

X: índice da área exposta de uma face definido como a razão entre a área líquida da face (ST1 e ST2), e a área total determinada pelo contorno do painel, adimensional.

2.7.5 PESO PRÓPRIO

Na análise de estruturas, é fundamental estimar com precisão o peso próprio dos elementos estruturais, os quais estarão sempre presentes nos casos de carregamentos definidos. No presente trabalho, a ferramenta SAP2000 é empregada para a análise das estruturas. O software calcula automaticamente o peso próprio da estrutura, sendo suficiente fornecer os dados referentes ao perfil de aço que constitui a estrutura da torre, conforme dissertação de Argenta (2007).

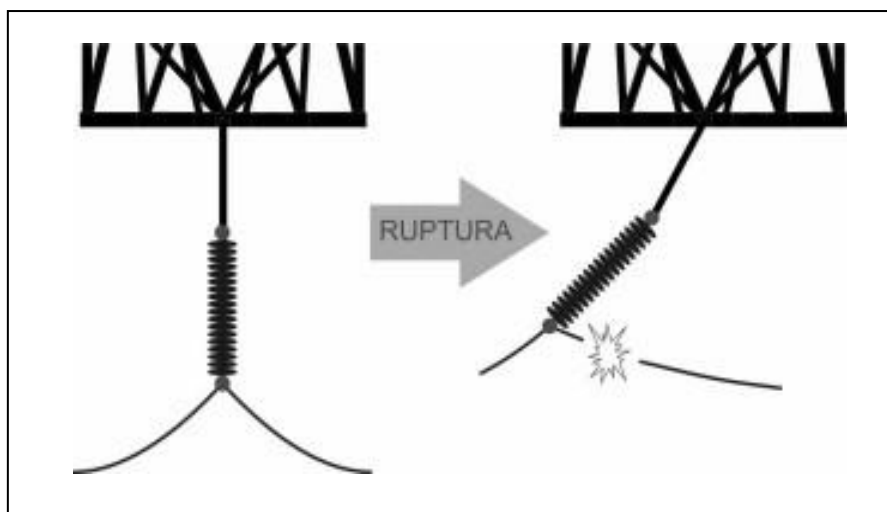
2.7.6 RUPTURA DE CABOS

A análise estrutural de torres autoportantes requer uma consideração minuciosa das cargas decorrentes da ruptura dos cabos, como enfatizado por Kaminski (2007). A ruptura de cabos em uma linha de transmissão pode resultar em consequências significativas, incluindo danos substanciais e o potencial colapso em cascata de torres de suspensão. Quando um cabo se rompe, a torre fica sujeita a uma carga equivalente à tração aplicada no cabo, com os efeitos do vento e do peso reduzidos pela metade. Essa carga desequilibra o sistema estrutural, gerando consequências severas para a integridade da torre. Este fenômeno é ilustrado pelo Figura 2.13.

Para compreender melhor os efeitos da ruptura dos cabos, é crucial analisar os diferentes aspectos do processo. Argenta (2007) destaca que o lançamento dos cabos em uma linha de transmissão é realizado por meio de roldanas instaladas nos pontos de fixação dos cabos na torre. Um cabo guia é utilizado para puxar o cabo condutor entre as roldanas até o

ponto de ancoragem. A correção da altura do cabo entre as torres é necessária para manter o equilíbrio da linha, aplicando uma tensão de tração no cabo para levantá-lo das partes mais baixas. Essas operações são essenciais para o funcionamento adequado da estrutura.

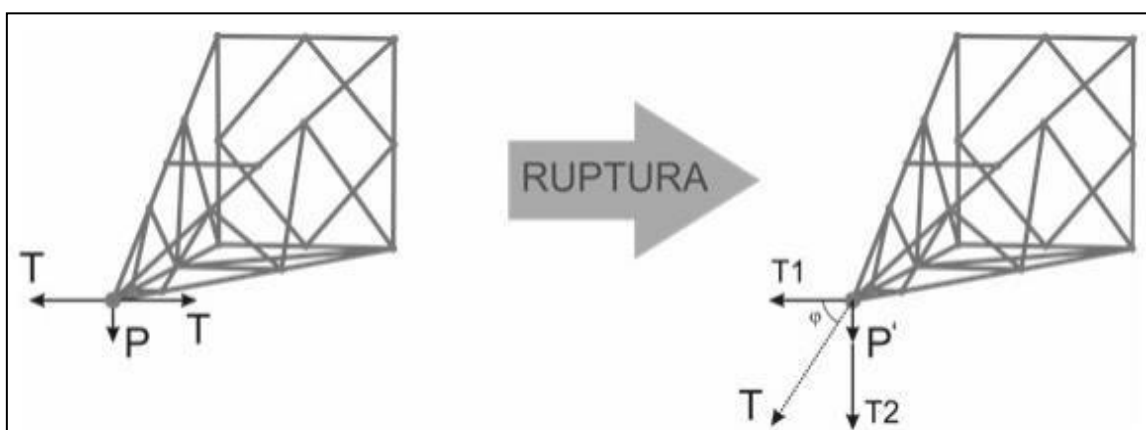
Figura 2.13 – Esqueça do pêndulo duplo para ruptura dos cabos



Fonte: Argenta (2007).

A Figura 2.14, ilustra as diferentes forças e componentes envolvidas no processo de ruptura dos cabos. Esta figura visualiza as forças que atuam sobre a estrutura após a ruptura de um cabo, fornecendo insights valiosos para a análise estrutural da torre.

Figura 2.14 – Esquema de forças para a ruptura dos cabos.



Fonte: Argenta (2007).

2.7.7 HIPÓTESES DE CÁLCULO

Na busca por abordar situações críticas às quais uma torre de transmissão pode estar sujeita, são adotadas as quatro hipóteses básicas de cálculo apresentadas por Gontijo (1994), que são:

- **Hipótese 1** – Considera-se o vento máximo em qualquer direção com os cabos intactos;
- **Hipótese 2** – Reduz-se a velocidade do vento e considera-se a ruptura dos cabos de para-raios;
- **Hipótese 3** – Reduz-se a velocidade do vento e considera-se a ruptura dos cabos de condutor.

Já a norma NBR 5422 (ABNT, 2023) traz outras hipóteses, dentre elas é válido considerar a Hipótese 4:

- **Hipótese 4** – Construção e manutenção.

Gontijo (1994) destaca que as hipóteses apresentadas são válidas para torres de suspensão de circuito único; no caso de circuito duplo, as hipóteses devem ser verificadas separadamente. Além disso, as bitolas dos cabos devem ser majoradas, e em torres de ancoragem e de fim de linha que utilizam mísulas retangulares ou trapezoidais, as cargas aplicadas nos pontos de fixação dos cabos são diferentes devido à desigualdade dos vãos adjacentes. Normalmente, as cargas verticais e transversais são verificadas com a aplicação de dois terços da carga total em uma face da torre e o restante na outra (Gontijo, 1994).

A norma NBR 5422 (ABNT, 2024) também estabelece uma hipótese para o para análise estrutural com destaque para a hipótese para o estado limite de utilização, cujas hipóteses de carregamento mecânico devem considerar combinações adequadas das seguintes cargas:

- a) Cargas permanentes;
- b) Cargas de vento associadas ao projeto do isolamento;
- c) Cargas de tração de cabos.

A Tabela 2.7 estabelece os coeficientes de ponderação definidos pela NBR 5422 (ABNT, 2024) para equacionamento das hipóteses citadas, considerando que os coeficientes de ponderação das cargas no estado limitem de utilização devem ser considerados iguais a 1,0.

Tabela 2.7 – Coeficientes de ponderação de carregamentos.

Hipótese	Cargas				
	Permanente	Vento	Vertical	Tração nos cabos	
				Transversal	Longitudinal
Vento de 10 min	1,15	1	1.15 (0,87)	1	1
Vento de 3 s	1,15	1	1.15 (0,87)	1	1
Contenção de falha	1,15	-	1.15	1	1
Construção e manutenção	1,5	1,5	1.5	1,5	1,5

NOTA: Os coeficientes de ponderação entre parênteses são aplicáveis às *hipóteses* com carga vertical reduzida.

Fonte: ABNT (2024).

2.8 MODELAGEM E ANÁLISES DAS ESTRUTURAS

2.8.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Marim (2009) descreve o método dos elementos finitos como uma técnica amplamente empregada para analisar o comportamento estrutural de componentes quando sujeitos a carregamentos estáticos e/ou dinâmicos.

A história do Método dos Elementos Finitos (MEF) é marcada por uma evolução significativa, desde suas origens teóricas até sua aplicação prática com o advento da computação. Este sistema de tópicos irá destacar os principais marcos históricos do desenvolvimento do MEF ao longo do tempo.

- Em 1909, Walter Ritz foi um dos primeiros a aplicar conceitos semelhantes ao MEF para resolver problemas de mecânica dos sólidos.
- Richard Courant, em 1943, expandiu os estudos de Ritz e introduziu a nomenclatura "Método dos Elementos Finitos", descrevendo sua forma computacional.
- Por volta de 1950, Ray William Clough e outros pesquisadores começaram a desenvolver programas computacionais para aplicar o MEF em problemas reais, como o cálculo de estruturas de aeronaves.
- Em 1964, a parceria entre a NASA e a MacNeal-Schwendler Corporation resultou no desenvolvimento do software GPSA (General Purpose Structural Analysis), posteriormente renomeado para NASTRAN (Nasa Structure Analysis).
- MSC Nastran, derivado do GPSA/NASTRAN, tornou-se um dos softwares de MEF mais populares, especialmente na indústria aeroespacial e automotiva.

- John Swanson, após trabalhar em um projeto governamental relacionado à propulsão nuclear de foguetes, fundou a empresa Ansys, que se tornou uma líder no desenvolvimento e aplicação de software de MEF.

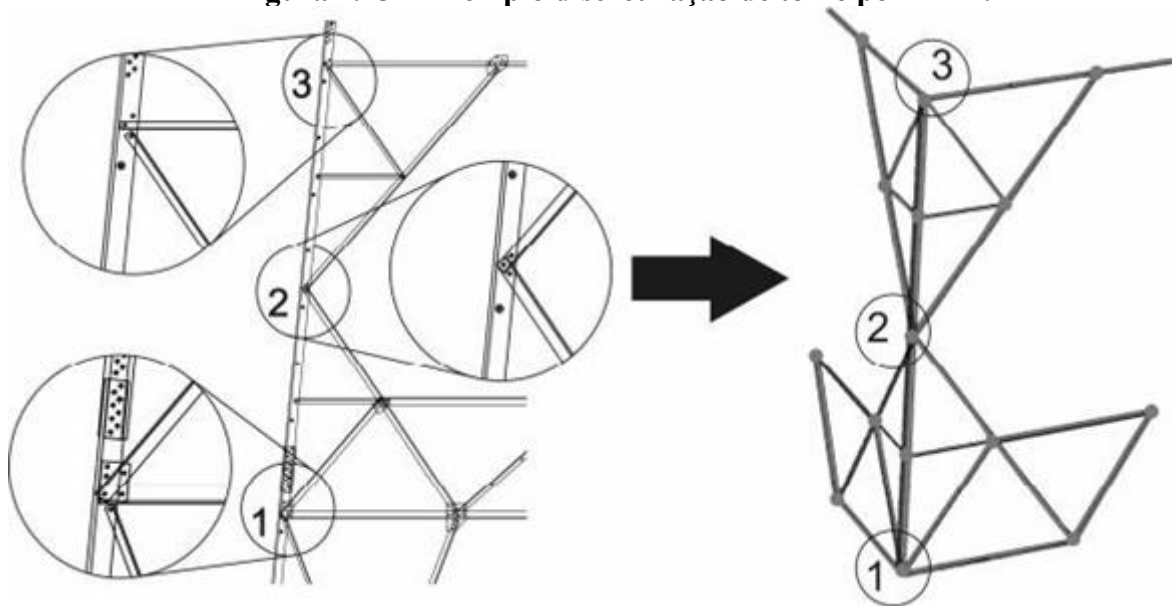
Desde então, o MEF continua a evoluir com o avanço da tecnologia computacional, com melhorias na precisão, eficiência e capacidade de lidar com problemas complexos em diversas áreas da engenharia.

De acordo com Carvalho (2015), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma abordagem matemática amplamente utilizada na engenharia para resolver problemas complexos em diversas áreas, como acústica, termodinâmica, eletromagnetismo e estruturas. O princípio do MEF é substituir infinitas variáveis desconhecidas por uma quantidade limitada de elementos com comportamentos bem definidos. Esses elementos são interligados por pontos denominados "nós", formando o que se conhece como "malha". O MEF visa obter resultados aproximados para os problemas analisados e, quanto menores e mais numerosos forem os elementos da malha, maior será a precisão dos resultados. Essa técnica, fundamentada em teorias matemáticas, tem grande importância na compreensão do comportamento estrutural e na otimização de soluções para diferentes aplicações industriais.

Segundo Oliveira (2006), os elementos que formam a torre de transmissão de energia são sempre representados por elementos finitos do tipo "pórtico espacial de dois nós", o que permite considerar adequadamente todos os esforços presentes nos elementos da torre, incluindo esforços de flexão. Já para as cadeias de isoladores, esses podem ser representados como "elementos rotulados" em suas extremidades, ou seja, conectados de maneira que apenas os esforços axiais, como tração e compressão, sejam levados em consideração nas análises.

Como as torres são definidas como pórticos, Argenta (2007) observa que a ligação 1, mostrada em detalhe na Figura 2.15, é feita com barras diretamente conectadas à aba do perfil da borda ou por meio de chapas de ligação, também ligadas à aba do perfil da borda. Qualquer barra que chegue a essa conexão e esteja submetida a algum esforço normal vai gerar outros tipos de esforços, como esforço cortante, momento torçor, momento fletor e esforços axiais na barra da borda. O mesmo comportamento ocorre na ligação 2, também indicada na Figura 2.15, e em diversas outras conexões da torre. Esses detalhes garantem que a modelagem contemple adequadamente os efeitos gerados pelas forças atuantes, principalmente as induzidas pelo vento, que podem impactar significativamente o desempenho estrutural da torre.

Figura 2.15 – Exemplo discretização de torre por MEF.



Fonte: Argenta (2007).

Para aplicar a análise por elementos finitos na torre estudada, optou-se pelo uso do programa SAP2000 para modelar a estrutura em formato de pórtico tridimensional. A escolha desse software foi motivada pela sua facilidade de uso na modelagem da estrutura e pela integração eficaz das funções de carregamentos dinâmicos, permitindo uma análise mais robusta dos efeitos do vento e outros esforços atuantes.

2.8.2 SAP2000

Segundo Gomes (2023), o SAP2000 surgiu como uma ferramenta poderosa para modelagem e análise de estruturas complexas, inicialmente voltado para simplificar o trabalho dos engenheiros civis. Ao longo do tempo, o software foi aprimorado, integrando funcionalidades que permitem sua aplicação em uma ampla gama de estruturas, desde construções simples até pontes e torres de transmissão. O programa se destaca pela sua capacidade de simular diferentes tipos de carregamento, como forças provenientes do vento, oferecendo um alto nível de precisão nas análises. “O SAP2000 possibilita a modelagem, análise e dimensionamento de estruturas, oferecendo aos engenheiros ferramentas que agilizam o fluxo de trabalho”.

Além disso, Alves (2015) afirma que "o SAP2000 é uma ferramenta essencial para a simulação de estruturas submetidas a ventos extremos", o que o torna particularmente útil para a análise de torres de transmissão e outras estruturas altas. Com o SAP2000, é possível modelar

componentes estruturais, como as vigas montantes e as diagonais, com alta precisão, permitindo prever o comportamento da estrutura sob diferentes condições de carregamento.

O SAP2000 tem uma aplicação crucial na análise de torres autoportantes, especialmente no contexto de forças externas como o vento. De acordo com Alves (2015), “a análise de deflexões e tensões causadas por ventos extremos é essencial para garantir a integridade estrutural, prevenindo colapsos e grandes prejuízos”. As torres autoportantes, sendo estruturas complexas, exigem que cada elemento, como as vigas montantes e as diagonais, seja modelado de maneira que todos os esforços, incluindo axiais, de flexão e torção, sejam adequadamente considerados.

Gomes (2023) reforça que "o SAP2000 permite calcular com precisão as cargas permanentes e acidentais em estruturas como as torres autoportantes", possibilitando que os engenheiros analisem interações complexas entre as vigas montantes e diagonais, levando em consideração as forças que atuam sobre a estrutura, como os momentos fletores e torçores, além dos esforços cortantes. Esses detalhes garantem que a modelagem contemple adequadamente os efeitos gerados pelas forças atuantes, principalmente as induzidas pelo vento, que podem impactar significativamente o desempenho estrutural da torre.

2.9 DIMENSIONAMENTO

Após o cancelamento da antiga NBR 8850 (ABNT, 1985), estabeleceu-se uma lacuna normativa para o projeto de torres em linhas de transmissão, o que levou muitas empresas do setor a adotarem normas estrangeiras como referência. Diante da necessidade de padronização e de maior segurança na concepção dessas estruturas, especialmente considerando as particularidades do material metálico e as diversas condições de carregamento a que estão submetidas, foi publicada a NBR 17184 (ABNT, 2024). Essa norma incorpora as melhores práticas e os avanços tecnológicos mais recentes, visando assegurar que as torres de transmissão atendam aos requisitos estruturais de resistência, estabilidade e durabilidade exigidos para o contexto brasileiro.

Na NBR 17184 (ABNT, 2024) dimensionamento das torres deve atender à verificação do Estado Limite Último (ELU), conforme expresso na seguinte desigualdade:

$$R_d \geq S_d \quad (13)$$

Onde,

S_d : Solicitações de cálculo;

R_d : Resistência de cálculo do suporte.

A resistência de cálculo é obtida através da aplicação do fator de resistência Φ_R sobre a resistência limite R_k , conforme a equação 14.

$$R_d = \Phi_R \cdot R_k \quad (14)$$

Onde,

Φ_R : Fator de resistência que minora a resistência limite;

R_k : Resistência limite do suporte, obtida em função da tensão característica.

Fatores de minoração da resistência limite (ou característica):

a) Para suporte projetado e testado através de protótipo conforme NBR-8842:

$$\Phi_R = 0,93;$$

b) Para suporte projetado sem teste de protótipo:

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

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

2.9.1 VERIFICAÇÃO À COMPRESSÃO

Tratando-se da norma ABNT NBR 17184:2024, a resistência de cálculo à compressão é dada conforme a equação 15.

$$R_{dc} = \Phi_R \cdot F_C \cdot A_g \text{ [daN]} \quad (15)$$

Onde,

Φ_R : Fator de resistência que minora a resistência limite;

R_{dc} : Resistência a compressão de cálculo do suporte;

A_g : Área bruta da seção transversal do perfil, em cm^2 ;

F_C : Tensão limite de compressão, em daN/cm^2 .

A tensão limite das barras submetidas a um carregamento axial de compressão é obtido conforme as equações 16 e 17:

$$F_c = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{kL/r}{C_c} \right)^2 \right] F_y \quad \text{Se } k.L/r \leq C_c \quad (16)$$

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad \text{Se } kL/r \leq C_c \quad (17)$$

Com,

$$C_c = \pi \left(2E/F_y \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Onde,

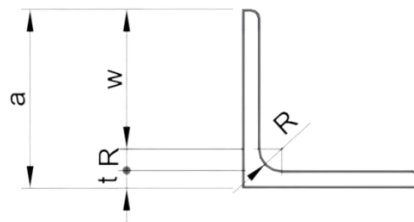
F_y : Tensão limite de escoamento do aço, em daN/cm² ;

E : Módulo de elasticidade longitudinal, em daN/cm²;

$k.L/r$: Esbeltez efetiva;

A maioria das torres de linhas de transmissão utiliza perfis do tipo L (cantoneiras). Nesse contexto, a norma adota maior rigor para esses elementos. A Figura 2.16 apresenta as dimensões do perfil, enquanto as equações 19, 20 e 21 fornecem os valores dos limites de tensão para esses perfis.

Figura 2.16 – Dimensões da Cantoneira.



Fonte: Autor.

a = largura da aba;

t = espessura da cantoneira;

R = raio de laminação;

$w = (a - t - R)$ = largura plana da aba;

$$\text{Se } w/t \leq (w/t)_{lim} \quad F_{cr} = F_y \quad (19)$$

$$\text{Se } (w/t)_{lim} < w/t \leq 0,846(E/F_y)^{1/2} \quad F_{cr} = [1,677 - 0,677(w/t)/(w/t)_{lim}]F_y \quad (20)$$

$$\text{Se } w/t > 0,846(E/F_y)^{1/2} \quad F_{cr} = 0,3276.E/(w/t)^2 \quad (21)$$

Onde,

$$(w/t)_{lim} = 0,470(E/F_y)^{1/2} \quad (22)$$

2.9.2 ESBELTEZ EFETIVA

A esbeltez efetiva de um elemento estrutural é definida como a razão entre o seu comprimento de flambagem e o raio de giração correspondente. No entanto, para que esse valor represente com precisão o comportamento real da barra, é necessário considerar as condições de ligação, as quais influenciam significativamente a forma de aplicação dos esforços — permitindo saber se a carga está centrada ou é excêntrica.

A determinação do comprimento de flambagem efetivo pode ser realizada por meio das relações apresentadas no Quadro 2.1 cujas equações foram extraídas NBR 17184 (ABNT, 2024), nos fornecendo os fatores de correção (coeficientes de comprimento efetivo) em função do tipo de apoio, grau de engastamento e da configuração dos parafusos.

Quadro 2.1 - Esbeltez efetiva das barras de um suporte submetidas a compressão.

 Barras com cargas concêntricas em ambas as extremidades: $\text{Se } 0 \leq L/r \leq 120 \rightarrow k.L/r = L/r$ Equação (1) – código: 1B-1B
 Barras com carga concêntrica em uma extremidade e excêntrica na outra: $\text{Se } 0 \leq L/r \leq 120 \rightarrow k.L/r = 30 + 0,75 L/r$ Equação (2) – código: 1A-1B

Continua

continuação.

 Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades: Se $0 \leq L/r \leq 120 \rightarrow k.L/r = 60 + 0,5 L/r$ Equação (3) – código: 1A-1A
 Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades: Se $120 \leq L/r \leq 200 \rightarrow k.L/r = L/r$ Equação (4) – código: 1A-1A
 Barras com restrição parcial à rotação em uma das extremidades: Se $120 \leq L/r \leq 225 \rightarrow k.L/r = 28,6 + 0,762 L/r$ Equação (5) – código: 1A-1A
 Barras com restrição parcial à rotação em ambas as extremidades: Se $120 \leq L/r \leq 250 \rightarrow k.L/r = 46,2 + 0,615 L/r$ Equação (6) – código: 2A-2A
Os montantes devem atender a condição: $k.L/r \leq 150 \rightarrow k.L/r = L/r$ Equação (1) – código: 2M-2M

Fonte: Adaptado Ogata (2022).

Nos casos em que perfis de seção transversal simples não apresentam resistência suficiente para determinada solicitação, a NBR 17184 (ABNT, 2024) estabelece os critérios para o uso e a verificação de cantoneiras de seção transversal composta:

- a) Os perfis compostos devem atender aos mesmos limites de esbeltez efetiva.

b) A esbeltez efetiva de cada elemento do perfil composto deve atender:

$$k_1.L_1/r_1 \text{ (Perfil isolado)} \leq (3/4) . k_2.L_2/r_2 \text{ (Perfil composto)} \quad (23)$$

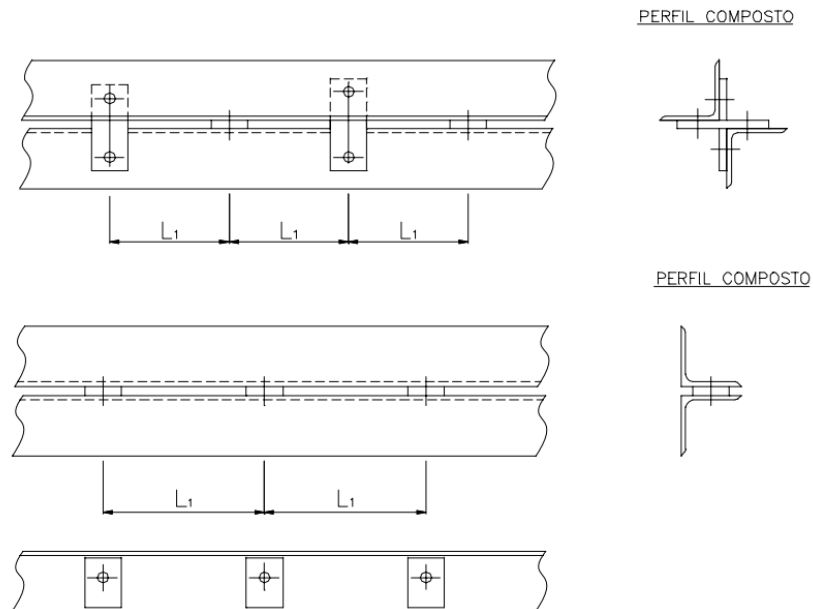
L_2 = comprimento de flambagem do perfil composto;

r_2 = raio de giração do perfil composto;

L_1 = comprimento livre do perfil isolado, como indicado na figura a seguir;

r_1 = raio de giração mínimo do perfil isolado;

Figura 2.17 – Perfis Compostos.



Fonte: ABNT (2024).

2.9.3 VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO

De acordo com a ABNT NBR17184:2024, a resistência de cálculo à tração é determinada pela equação 24.

$$R_{dt} = \Phi_R . F_t . A_n \text{ [daN]} \quad (24)$$

Onde,

- Φ_R : Fator de resistência que minora a resistência limite;
- R_{dt} : Resistência a tração de cálculo do suporte;
- A_n : Área líquida da seção transversal;
- F_t : Tensão limite de tração, em daN/cm².

A tensão limite a tração é definida pela norma, conforme as equações 25 e 26.

$$\text{Tração concêntrica:} \quad F_t = F_y \text{ [daN/cm}^2\text{]} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} &\text{Tração em cantoneira} \\ &\text{conectadas somente em uma} \quad F_t = 0,9 \cdot F_y \text{ [daN/cm}^2\text{]} \quad (26) \\ &\text{aba:} \end{aligned}$$

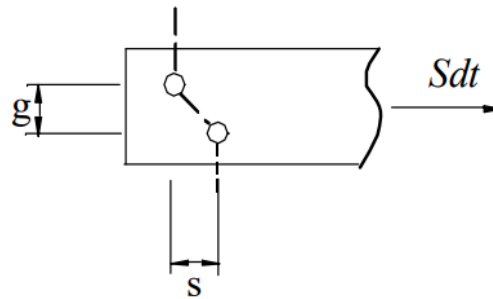
A área líquida das barras tracionadas pode ser expressa pela equação 27, onde g e s são definidos a partir da Figura 2.18.

$$A_n = A_g - n \cdot d_f \cdot t + [\Sigma (s^2 / 4 \cdot g)] \cdot t \quad (27)$$

Onde,

- A_g = Área bruta da seção transversal do perfil [cm²];
- n = Quantidade de furos;
- d_f = Diâmetro do furo = $d_p + 0,3$ cm;
- d_p = Diâmetro nominal do parafuso [cm];
- s = Distâncias entre furos na direção paralela ao esforço [cm];
- g = Distâncias entre furos na direção perpendicular ao esforço [cm];
- t = Espessura do perfil da barra tracionada [cm].

Figura 2.18 – Distâncias entre Furos.



Fonte: ABNT (2024).

A esbeltez limite para elementos tracionados deve anteder os valores de $L/r \leq 375$, para barras com solicitação continua e $L/r \leq 250$, para que podem ficar sem solicitação de tração em determinadas condições de carregamento.

Se tratando de perfis compostos, a norma NBR17184:2024 sugere as seguintes condições:

- Os perfis compostos devem atender aos mesmos limites de esbeltez definidas para perfis simples;
- Já a esbeltez de cada elemento do perfil compost de antender:

$$\begin{aligned} L_1/r_1(\text{Perfil isolado}) &\leq 300 \\ L_1/r_1(\text{Perfil isolado}) &\leq L_2/r_2(\text{Perfil composto}) \end{aligned} \quad (28)$$

2.9.4 BARRAS SEM ESFORÇOS CALCULADOS

No caso de barras sem esforços calculados na análise estrutural, estas devem atender às condições especificadas no Quadro 2.2 quanto à esbeltez efetiva e à esbeltez limite de $k.L/r \leq 250$.

Quadro 2.2 - Esbeltez efetiva das barras sem esforços calculados.

Barras sem restrição parcial à rotação em ambas as extremidades	$Se\ 0 \leq L/r \leq 120$ $Se\ 120 < L/r \leq 250$	$k.L/r = L/r$ $k.L/r = L/r$
Barras com restrição parcial à rotação em uma das extremidades	$Se\ 0 \leq L/r \leq 120$ $Se\ 120 < L/r \leq 290$	$k.L/r = L/r$ $k.L/r = 28,6 + 0,762 L/r$

continua

continuação.

Barras com restrição parcial à rotação em ambas as extremidades	$Se\ 0 \leq L/r \leq 120$ $Se\ 120 < L/r \leq 330$	$k.L/r = L/r$ $k.L/r = 46,2 + 0,615 L/r$
---	---	---

Fonte: Autor.

2.9.5 VERIFICAÇÃO À FLEXO – COMPRESSÃO

Como os elementos da torre são submetidos a uma análise não linear, como pórtico espacial, a maioria das barras é solicitada tanto por esforços axiais quanto por momentos fletores e torção. A norma NBR 17184 (ABNT, 2024) define que barras solicitadas à flexo-compressão devem atender à condição expressa na equação 29.

$$\frac{S_{dc}}{R_{dc}} + \frac{S_{dMx}}{R_{dMx}} \cdot \frac{1}{(1 - S_{dc}/P_{ex})} + \frac{S_{dMy}}{R_{dMy}} \cdot \frac{1}{(1 - S_{dc}/P_{ey})} \leq 1 \quad (29)$$

Onde,

S_{dc} : solicitação de cálculo à compressão, em daN;

S_{dMx} e S_{dMy} : solicitações de cálculo à flexão em relação aos eixos x e y, em daN.cm;

R_{dc} : resistência de cálculo à compressão;

R_{dMx} e R_{dMy} : resistências de cálculo à flexão em relação aos eixos x e y, em daN.cm.;

Sendo,

$$R_{dMx} = \Phi_R \cdot F_Y \cdot W_x \text{ e } R_{dMy} = \Phi_R \cdot F_Y \cdot W_y \quad (30)$$

$$P_{ex} = \pi^2 \cdot E \cdot I_x / (K_x \cdot L_x)^2 [daN] \quad (31)$$

$$P_{ey} = \pi^2 \cdot E \cdot I_y / (K_y \cdot L_y)^2 [daN] \quad (32)$$

Onde,

E : módulo de elasticidade longitudinal, em daN / cm²;

I_x e I_y : momentos de inércia em relação aos eixos x e y, respectivamente, em cm⁴;

L_x e L_y : comprimentos de flambagem em relação aos eixos x e y, em cm;

K_x e K_y :	coeficientes correspondentes ao modo de flambagem da barra em relação aos eixos x e y, respectivamente;
Φ_R :	fator de minoração da resistência limite;
F_y :	tensão de escoamento do aço, em daN/cm ² ;
W_x e W_y :	módulos de resistência elásticos em relação aos eixos x e y, respectivamente, em cm ³ .

Sendo que no caso em que as cargas são centradas o termo $1/(1 - S_{dc}/P_{ex})$ e $1/(1 - S_{dc}/P_{ey})$ são desprezados da equação 29.

2.9.6 VERIFICAÇÃO À FLEXO – TRAÇÃO

Para o dimensionamento das barras em perfil cantoneira submetidas à flexo-tração, a norma NBR17184 (ABNT, 2024) impõe a condição estabelecida pela equação 33.

$$S_{dt} / R_{dt} + S_{dMx} / R_{dMx} + S_{dMy} / R_{dMy} \leq 1 \quad (33)$$

Onde,

S_{dt} :	solicitação de cálculo à compressão, em daN;
R_{dt} :	resistência de cálculo à tração axial, em daN;
S_{dMx} e S_{dMy} :	solicitações de cálculo à flexão atuante em relação aos eixos x e y, respectivamente, em daN.cm;
R_{dMx} e R_{dMy} :	resistências de cálculo à flexão em relação aos eixos x e y, (eq: 30);
Φ_R :	fator de minoração da resistência limite;
F_y :	tensão de escoamento do aço, em daN/cm ² ;
A_n :	Área líquida da seção transversal;
W_x e W_y :	módulos de resistência elásticos em relação aos eixos x e y, respectivamente, em cm ³ .

2.10 PROGRAMAÇÃO ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A linguagem Python, desenvolvida por Guido van Rossum na década de 1990, consolidou-se para aplicações em engenharia devido à sua sintaxe simples e adaptabilidade. No contexto da engenharia estrutural, Python tem sido amplamente utilizado na automação de

tarefas de análise, dimensionamento e documentação de projetos (Lutz, 2013). Ferramentas open-source como NumPy, SciPy e OpenSeesPy permitem desenvolver rotinas personalizadas de cálculo estrutural, conforme demonstrado por Sarsa *et al.* (2022), ao utilizar LLMs para geração e explicação de códigos e testes automatizados.

Em projetos comerciais no Brasil, integrações com Python já são realidade: menciona-se, por exemplo, a **TQS Python API**, presente nas versões mais recentes do software TQS, que permite ao engenheiro automatizar tarefas como exportação de relatórios, dimensionamento repetitivo e emissão de documentos (TQSNEWS, 2024). Esse tipo de integração promove ganhos de produtividade e redução de erros em projetos estruturais.

A integração de Python com softwares comerciais também é uma realidade. Segundo Sarsa *et al.* (2022), a geração automática de testes e scripts é uma das aplicações mais promissoras de LLMs aliados a linguagens como Python, permitindo economia de tempo em tarefas repetitivas e maior confiabilidade em ambientes educacionais e profissionais. Além disso, estudos como o de Sá (2024) mostram que ferramentas baseadas em Python integradas a LLMs (como a API do Gemini) são eficazes na identificação de erros e na geração de soluções automatizadas para códigos em diversas linguagens de programação.

2.10.1 EVOLUÇÃO DOS MODELOS DE LINGUAGEM

Os Large Language Models (LLMs) representam uma evolução dos modelos de linguagem natural baseada em redes neurais profundas, com destaque para a arquitetura Transformer, que marcou uma nova era no processamento de linguagem (Sarsa *et al.*, 2022). Esses modelos são treinados com grandes volumes de texto e código e operam prevendo a próxima palavra ou token em uma sequência, o que os torna capazes de gerar respostas textuais ou códigos com alto grau de coerência sem que possuam uma "compreensão" real do conteúdo (Sá, 2024).

A Figura 2.19 apresenta uma linha do tempo com os principais marcos históricos no desenvolvimento dos LLMs, destacando desde os primeiros modelos baseados em redes neurais até as recentes versões especializadas, evidenciando a rápida evolução e ampliação das capacidades desses sistemas.

Figura 2.19 – Linha do tempo dos modelos de linguagem.



Fonte: Medium (2025).

Na prática, esses modelos já demonstram desempenho satisfatório em tarefas zero-shot e few-shot de programação. Segundo Jiang *et al.* (2024), modelos como ChatGPT, Claude e Codex apresentaram acertos superiores a 80% em benchmarks de geração de código como HumanEval e MBPP.

Um exemplo notável foi apresentado por Liang, Kalaleh e Mei (2025), que desenvolveram um framework integrando LLMs ao software OpenSeesPy, gerando automaticamente modelos estruturais completos a partir de descrições textuais. O sistema obteve precisão de até 100% em tarefas específicas de análise estrutural.

Além disso, Jiang *et al.* (2024) também evidenciaram avanços em sistemas híbridos que combinam LLMs com mecanismos de busca em APIs e rotinas de testes automatizados. Os benefícios observados incluem:

- Aumento significativo da produtividade em etapas repetitivas de codificação e verificação;
- Redução de erros humanos em scripts técnicos (Jiang *et al.*, 2024; Huynh; Lin, 2025).

No entanto, Murr *et al.* (2023) demonstraram que LLMs como Claude, ChatGPT e Bard ainda geram códigos que embora corretos, podem não respeitar lógicas normativas ou critérios técnicos essenciais em engenharia. Essa limitação foi corroborada por Nascimento *et al.* (2024), que avaliaram o uso de LLMs em problemas de ciência de dados e constataram que, embora os modelos gerem boas respostas preliminares, exigem ajustes manuais significativos para resultados confiáveis em tarefas mais complexas.

Diante disso, reforçam a importância de uma abordagem híbrida, em que a IA atua como suporte inicial e o engenheiro assume o papel de validador técnico. Essa perspectiva é amplamente recomendada por autores como Murr *et al.* (2023) e Sá (2024), que destacam que o uso de LLMs deve ser visto como ferramenta de apoio à engenharia e não protagonista.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 FERRAMENTAS

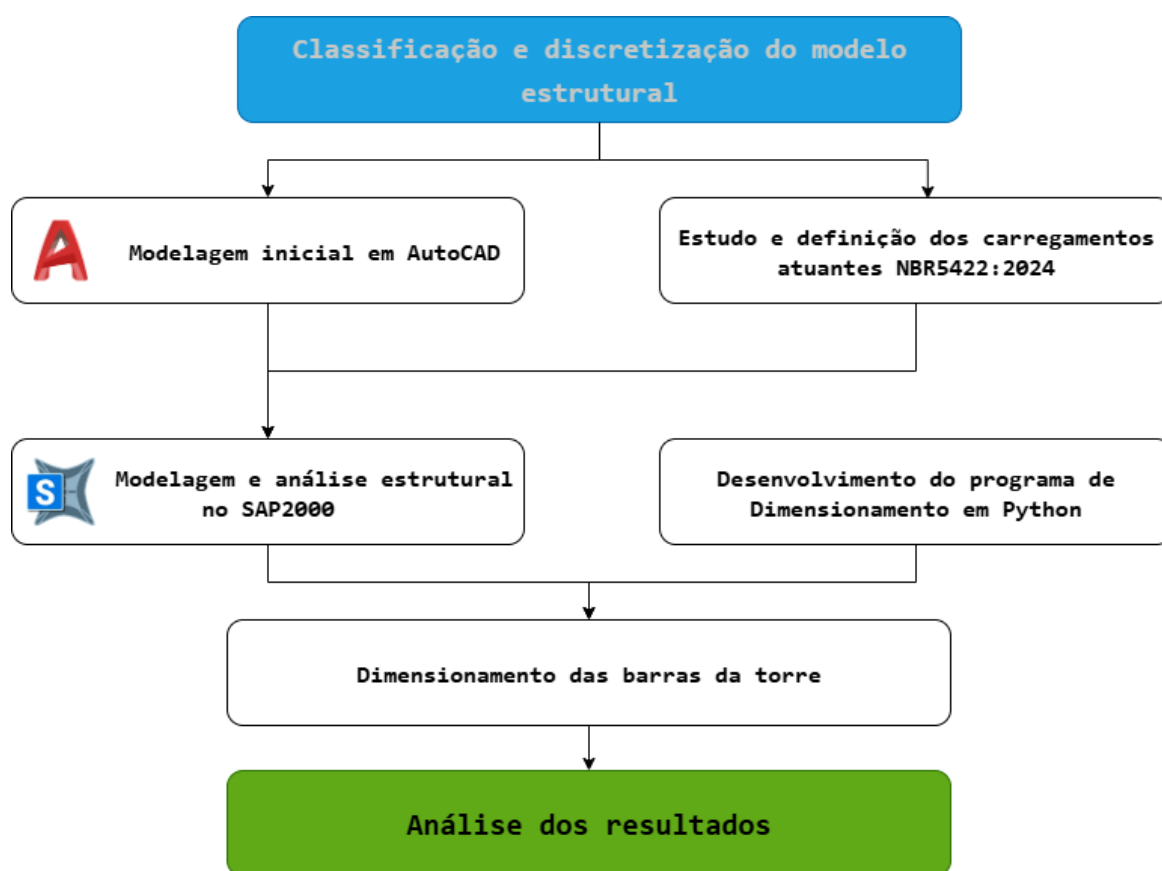
As ferramentas computacionais utilizadas para o desenvolvimento, análise e dimensionamento das barras das torres, de forma que assegure o cumprimento das normas técnicas brasileiras vigentes foram:

- **AUTOCAD e SAP2000:** utilizado para modelar tridimensionalmente a geometria da torre, realizar a análise estrutural e extrair os esforços atuantes nas barras, que serviram como base para o dimensionamento.
- **Python:** adotado nesta pesquisa como a principal linguagem e plataforma para o desenvolvimento do programa computacional de dimensionamento das barras.
- Inteligência Artificial **Claude:** utilizada para converter algoritmos e roteiros de cálculo em códigos funcionais na linguagem Python.
- **Microsoft Office:** utilizado para a redação e formatação do texto, análise e tratamento dos dados por meio de planilhas, além da elaboração de gráficos e tabelas que auxiliaram na organização e apresentação dos resultados do trabalho.

3.2 PROCEDIMENTOS

Para alcançar o objetivo a Figura 3.1 apresenta um esquema de integração da metodologia aplicada ao trabalho, onde iniciou-se pela classificação e discretização do modelo estrutural.

Figura 3.1 – Esquema integrado da metodologia.



Fonte: Autor.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

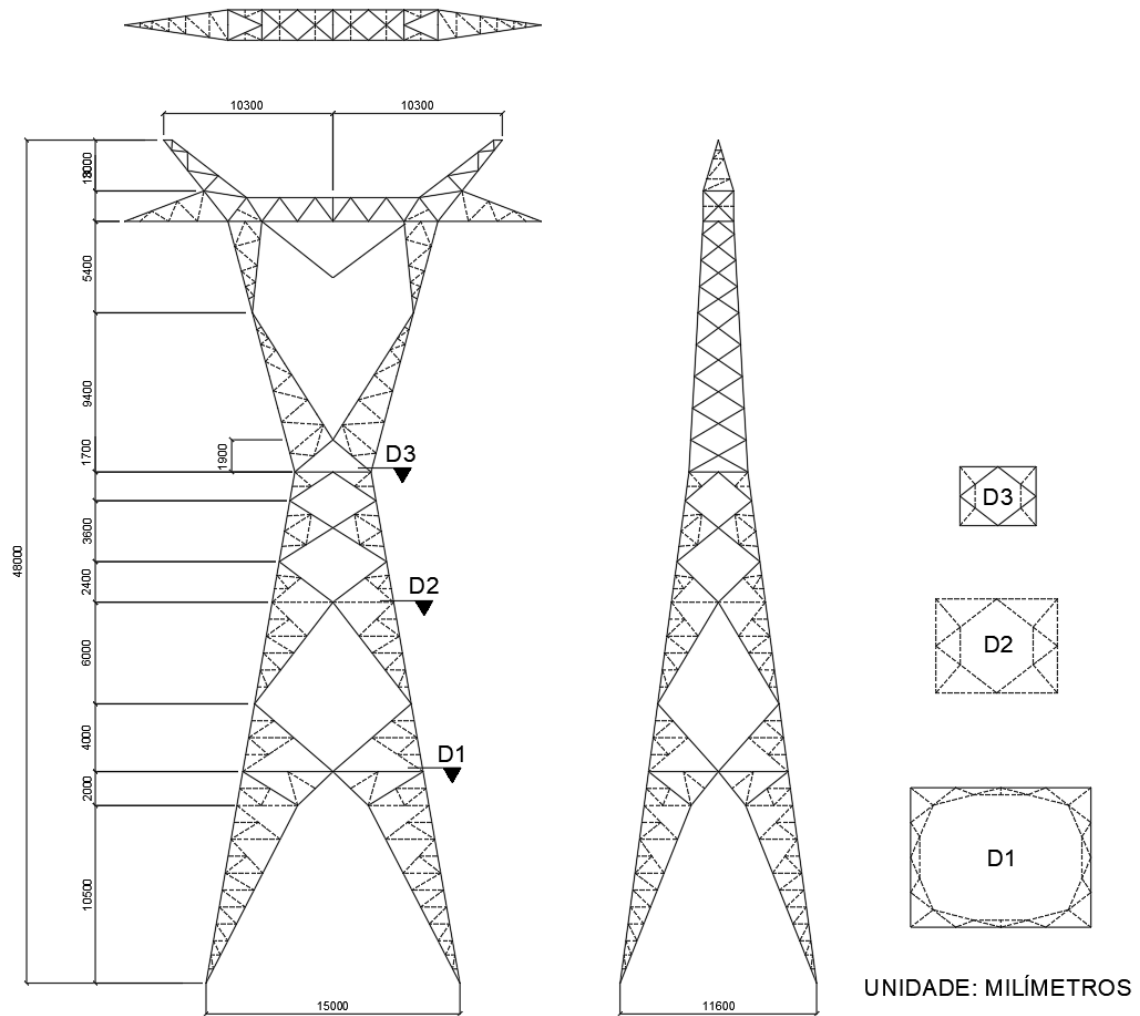
A estrutura analisada neste trabalho corresponde a uma torre do tipo delta, integrante da linha de transmissão 500 kV MEL – AÇU III, implantada em 2018. Os parâmetros iniciais utilizados para a modelagem e dimensionamento, tais como altura, vão e características geométricas, encontram-se consolidados no Quadro 3.1 e o modelo da torre apresentando na Figura 3.2.

Quadro 3.1 – Dados iniciais do projeto.

Características da Linha	LINHA DE TRANSMISSÃO AÇU III - Localidade: Serra do Mel - RN - Altitude da região: 218 m - Categoria do terreno: Terreno aberto, com poucos obstáculos - Número de Cabos Para-Raios: 2 - Número de Circuitos: 3 - Tensão da Linha: 500kV - Temperatura média: 27°C (INMET – Nos ultimos 10 anos) - Número de Cabos Condutores: 3 - Velocidade básica do vento (3s): 30 m/s (NBR 6123:2023)	
Estrutura	- Utilização: Suspensão - Tipo de Torre: Autoportante delta - Vão Gravante: 580m a 0° - Altura da Torre: 49,8 metros - Aço: ASTM A572 – Gr. 50	
Cabos Condutor e Para-Raios	CONDUTOR Cabo: CAL 838 Liga 1120 Bitola: 838 MCM Diâmetro (mm): 26.78 Seção (mm²): 425.16 Peso (kgf/m): 1.1765 Tração de ruptura (kgf): 9076	PARA-RAIOS Dotterel 176.2 MCM 15.42 141.93 0.656 7865
Isoladores	CADEIA I Área de Vento (m²): • 1.68 Peso (kgf): • 305	CADEIA V • 3.37 • 540

Fonte: Autor.

Figura 3.2 - Silhueta da torre base.

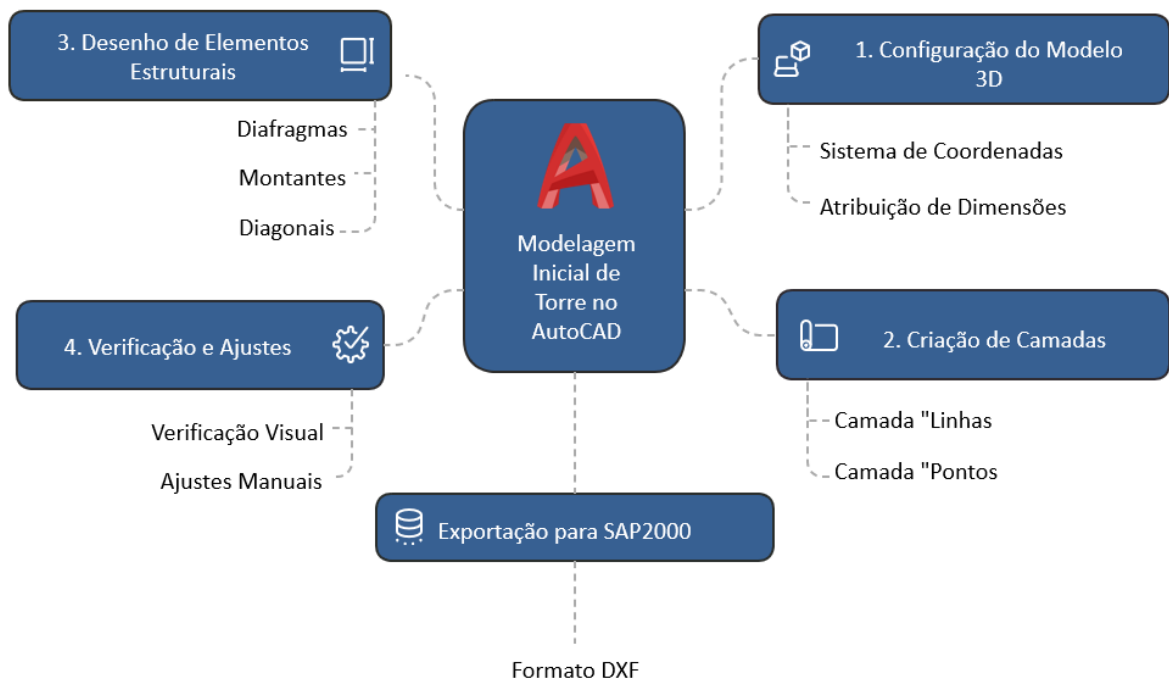


Fonte: Autor.

3.3.1 MODELAGEM INICIAL COM AUTOCAD

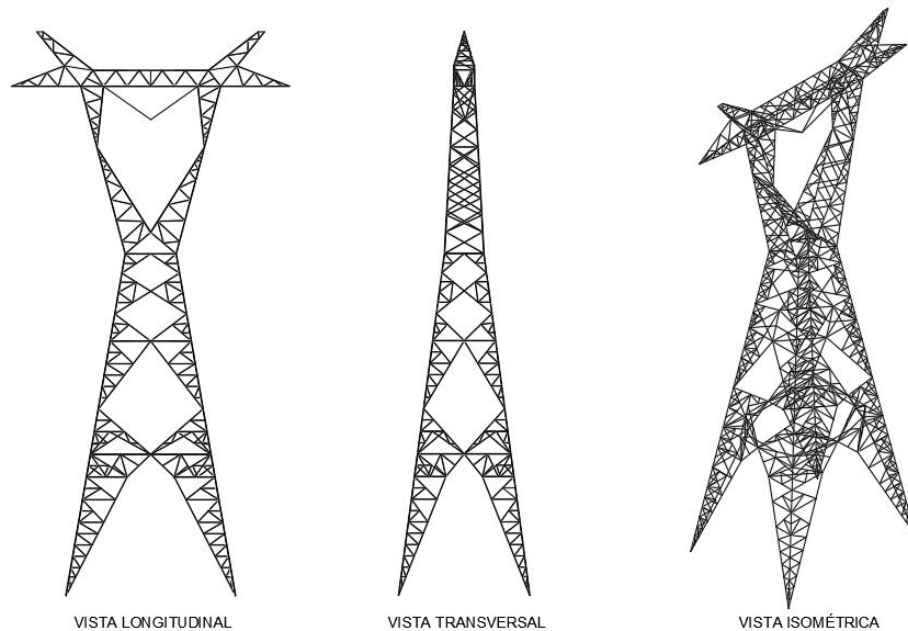
A modelagem inicial da estrutura foi realizada no software AutoCAD, com o objetivo de construir uma representação tridimensional da torre que servisse como base para a análise estrutural no SAP2000. Esse processo envolveu a definição do sistema de coordenadas, organização em camadas, desenho dos elementos estruturais (diafragmas, montantes, diagonais e barras redundantes), e preparação do modelo para exportação em formato DXF. Para facilitar a compreensão, a Figura 3.3 apresenta um esquema com os procedimentos adotados, e a Figura 3.4, o resultado da modelagem.

Figura 3.3 – Esquema de Modelagem no AutoCAD.



Fonte: Autor.

Figura 3.4 – Modelo Inicial no AutoCAD.



Fonte: Autor.

3.3.2 OBTENÇÃO DAS AÇÕES E CARREGAMENTOS

A determinação das ações e dos carregamentos foi executada conforme as equações descritas no item 2.7, utilizando como referência os critérios estabelecidos pela NBR 5422 (ABNT, 2024). A norma orienta o cálculo das ações de vento incidentes sobre a torre, os cabos condutores, os para-raios e as cadeias de isoladores. Em consonância com a NBR 5422:2024, cada hipótese de carregamento foi analisada isoladamente, observando os parâmetros normativos mais atualizados para garantir precisão e conformidade técnica.

3.3.2.1 HIPÓTESES DE CARREGAMENTO

Hipótese 1 – Vento Transversal com Carga Vertical Máxima

- **Denominação:** Vento de projeto de 10 min transversal com componente vertical máxima da tração dos cabos.
- **Formulação:** $H1 = F_{VT} + AIV_{T10} + ACV_{T10} + 1,15 \cdot PP_c + 1,15 \cdot PP_r + 1,15 \cdot PP_t$
- **Característica:** Representa as condições operacionais mais severas com carregamento vertical máximo.

Hipótese 1R – Vento Transversal com Carga Vertical Reduzida

- **Denominação:** Vento de 10 min transversal com carga vertical reduzida.
- **Formulação:** $H1R = F_{VT} + AIV_{T10} + ACV_{T10} + 0,87 \cdot PP_c + 0,87 \cdot PP_r + 1,15 \cdot PP_t$
- **Característica:** Variante da Hipótese 1 com redução dos pesos dos cabos para análise de condições específicas.

Hipótese 2 – Vento Oblíquo com Carga Vertical Máxima

- **Denominação:** Vento de 10 min oblíquo com carga vertical máxima.
- **Formulação:** $H2 = F_{VO} + AIV_{O10} + ACV_{O10} + 1,15 \cdot PP_c + 1,15 \cdot PP_r + 1,15 \cdot PP_t$
- **Característica:** Avalia o comportamento estrutural sob incidência diagonal do vento.

Hipótese 2R – Vento Oblíquo com Carga Vertical Reduzida

- **Denominação:** Vento de 10 min oblíquo com carga vertical reduzida.
- **Formulação:** $H2R = F_{VO} + AIV_{O10} + ACV_{O10} + 0,87 \cdot PP_c + 0,87 \cdot PP_r + 1,15 \cdot PP_t$
- **Característica:** Combinação otimizada para análise de rajadas em condições de menor peso.

Hipótese 3 – Rajadas Transversais Intensas

- **Denominação:** Vento de 3 segundos transversal.
- **Formulação:** $H3 = F_{VT3S} + AIV_{T03} + ACV_{T03} + 1,15 \cdot PP_c + 1,15 \cdot PP_r + 1,15 \cdot PP_t$
- **Característica:** Análise de eventos meteorológicos extremos de curta duração.

Hipótese 4 – Rajadas Oblíquas Intensas

- **Denominação:** Vento de 3 segundos oblíquo.
- **Formulação:** $H4 = F_{VO3S} + AIV_{O03} + ACV_{O03} + 1,15 \cdot PP_c + 1,15 \cdot PP_r + 1,15 \cdot PP_t$
- **Característica:** Combinação crítica de rajadas intensas com incidência diagonal.

Hipóteses Especiais de Contingência

Hipóteses de Contenção

Estas hipóteses abordam cenários de falha com desequilíbrio longitudinal, fundamentais para análise de segurança:

H5A: Rompimento do cabo para – raios A

H5B: Rompimento do cabo para – raios B

H5C: Rompimento do cabo condutor C

H5D: Rompimento do cabo para – raios D

H5E: Rompimento do cabo para – raios E

H5: Contenção em cascata (análise de propagação de falhas)

Hipótese 6 – Condições de Montagem

- **Denominação:** Construção e manutenção.
- **Formulação:** $H6 = 1,5 \cdot PP_c + 1,5 \cdot PP_r + 1,5 \cdot PP_t$
- **Característica:** Majoração de segurança para fases transitórias.

Hipótese 7 – Estado Limite de Utilização

- **Formulação:** $H7 = PP_c + PP_r + PP_t + F_{VT} + AIV_{T10} + ACV_{T10}$
- **Característica:** hipótese usada para avaliar os deslocamentos a torre.

Nomenclaturas dos Parâmetros Utilizados na Obtenção das Ações e Carregamentos

- Forças de Vento:

F_{VT} : Força do vento transversal de projeto (10 min) sobre a torre;

F_{VO} : Força do vento oblíquo de projeto (10 min) sobre a torre;

F_{VT3S} : Força do vento transversal (3 s) sobre a torre;

F_{VO3S} : Força do vento oblíquo (3 s) sobre a torre.

- Ações nos Isoladores pelo Vento (AIV):

AIV_{T10} : Vento transversal (10 min) nos isoladores;

AIV_{O10} : Vento oblíquo (10 min) nos isoladores;

AIV_{T03} : Vento transversal (3 s) nos isoladores;

AIV_{O03} : Vento oblíquo (3 s) nos isoladores.

- Ações nos Cabos pelo Vento (ACV):

ACV_{T10} : Vento transversal (10 min) nos cabos;

ACV_{O10} : Vento oblíquo (10 min) nos cabos;

ACV_{T03} : Vento transversal (3 s) nos cabos;

ACV_{O03} : Vento oblíquo (3 s) nos cabos.

- Pesos Próprios:

PP_c : Peso próprio dos cabos condutores;

PP_r : Peso próprio dos cabos para-raios;

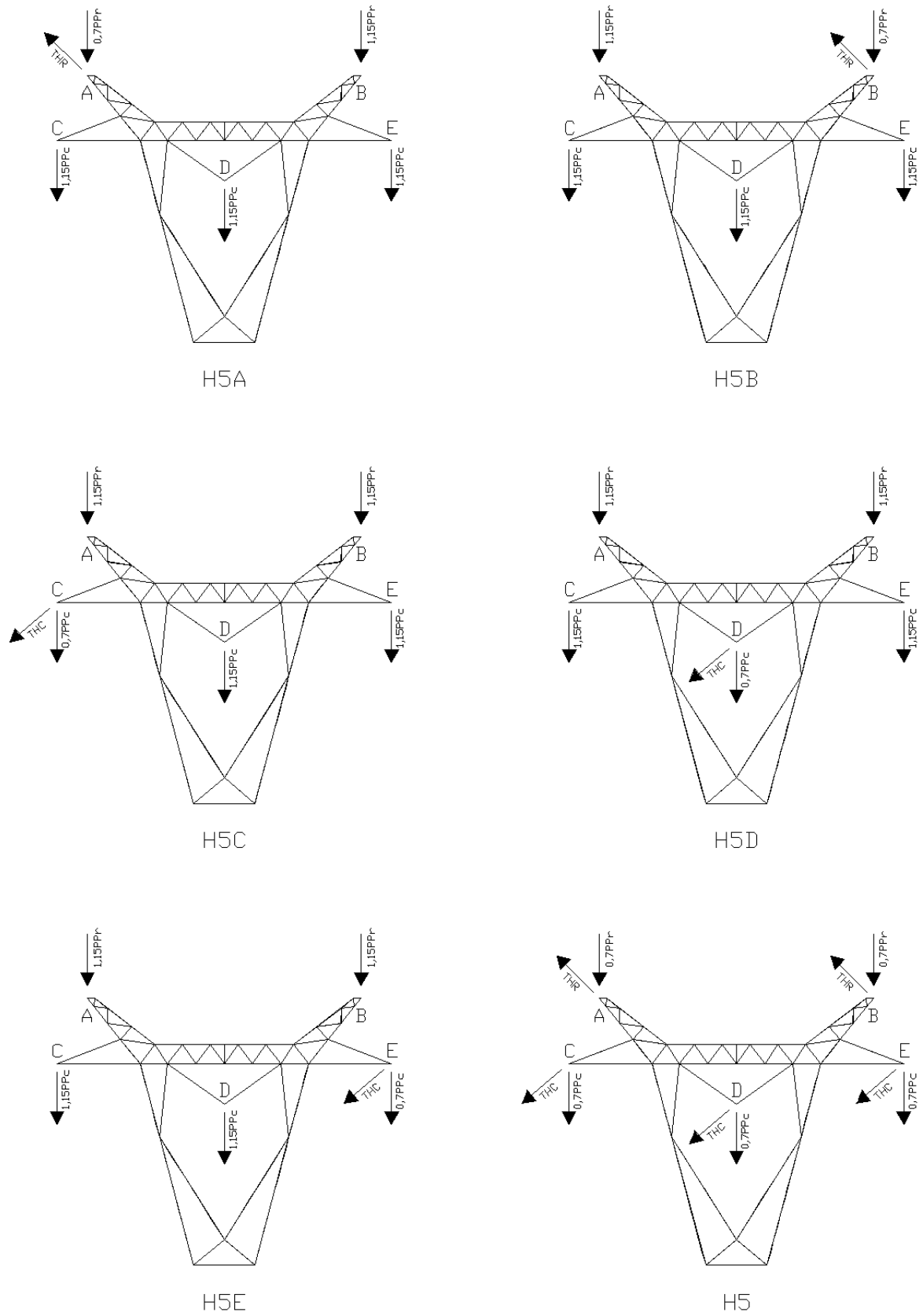
PP_t : Peso próprio da torre.

- Ações devido ao rompimento de cabos:

THR : Tração horizontal causado pelo rompimento de um cabo Para-raios;

THC : Tração horizontal causado pelo rompimento de um cabo Condutor.

Figura 3.5 – Hipóteses de Contenção.



Fonte: Autor.

3.3.3 MODELAGEM E ANÁLISE DA ESTRUTURA DE TORRES NO SAP2000

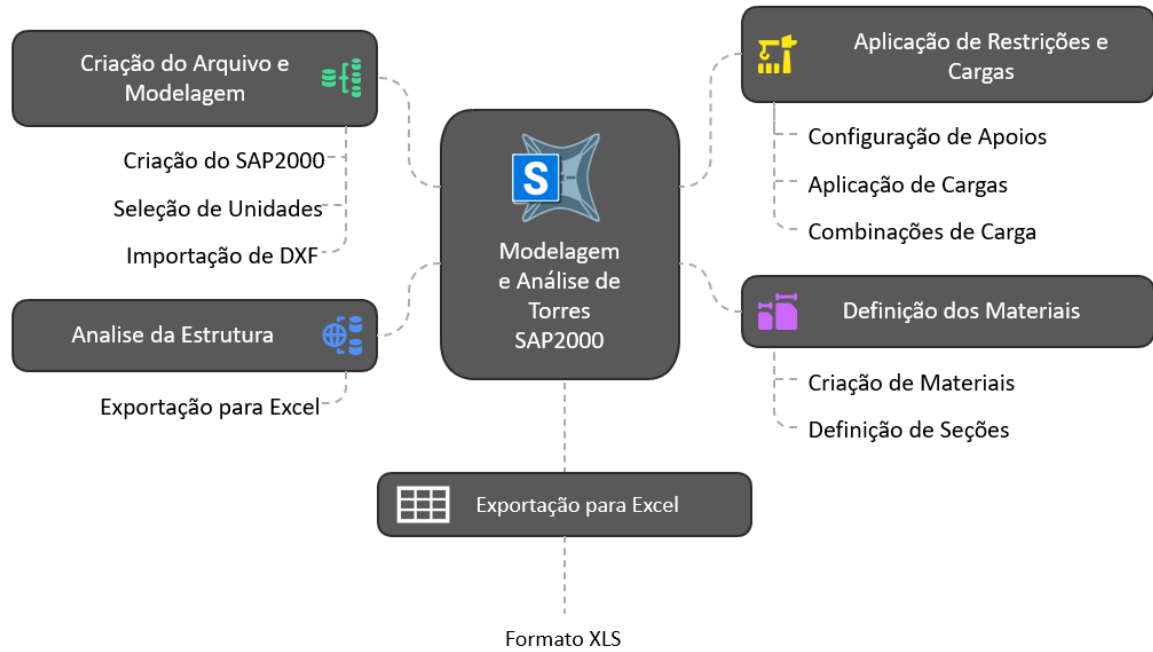
A modelagem da estrutura no *SAP2000* foi iniciada com a criação de um novo modelo, adotando o sistema de unidades N-mm-°C (newton, milímetro, grau Celsius), para assegurar compatibilidade com os dados normativos utilizados. Selecionou-se a configuração tridimensional para torres, adequada à representação espacial da torre de transmissão de energia. O arquivo em formato DXF, previamente gerado no *AutoCAD*, foi importado por meio da opção “Importar arquivo *AutoCAD* DXF”, restringindo-se à camada de pontos, o que permitiu maior precisão no lançamento dos elementos estruturais.

A inserção das barras foi realizada conectando os nós definidos por meio do comando “Desenhar elemento estrutural (barra)”. Em seguida, os materiais e perfis metálicos foram definidos e atribuídos aos elementos, conforme as especificações do projeto. As propriedades geométricas e mecânicas das seções em cantoneiras foram configuradas conforme os parâmetros normativos vigentes.

As condições de contorno foram implementadas na base da torre como engastes, simulando a fixação rígida à fundação. As ações aplicadas nos nós da estrutura seguiram os valores definidos previamente, e as combinações de carga foram estabelecidas conforme os coeficientes da norma ABNT NBR 5422:2024. Como discretização inicial, adotou-se a modelo de pórtico espacial, com os montantes e barras principais ligadas por meio de ligação rígida, transmitindo esforços de momento entre si, e as demais barras (barras redundantes) foram rotuladas nos montantes simulando a ligação por meio de um parafuso, onde não a transferência de momentos. Após a definição completa do modelo, procedeu-se à análise estrutural, obtendo-se os esforços internos e os deslocamentos dos elementos.

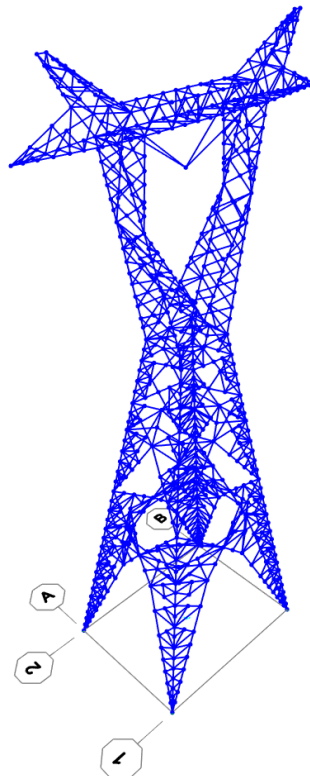
Os dados extraídos do *SAP2000* foram exportados para uma planilha de *Excel*, onde os dados foram ajustados para o formato compatível com o dimensionamento. A Figura 3.3 ilustra esquema de modelagem e análise no *SAP2000*, enquanto a Figura 3.6 mostra o modelo após o lançamento no programa.

Figura 3.6 – Esquema de Modelagem no SAP2000.



Fonte: Autor.

Figura 3.7 – Modelo 3D da Torre no SAP2000



Fonte: Autor.

3.3.4 DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA PARA DIMENSIONAR A TORRE

O desenvolvimento do software para dimensionamento de torres de transmissão segundo a NBR 17184 (ABNT, 2024) pautou-se em nas práticas de engenharia de software e guiado por interações constantes entre a equipe de desenvolvimento e ferramentas de inteligência artificial. Esta metodologia foi desenvolvida com o intuito de absorver a norma, garantindo uma confiabilidade ao produto e facilidade em seu uso, seja para fins, principalmente pedagógico.

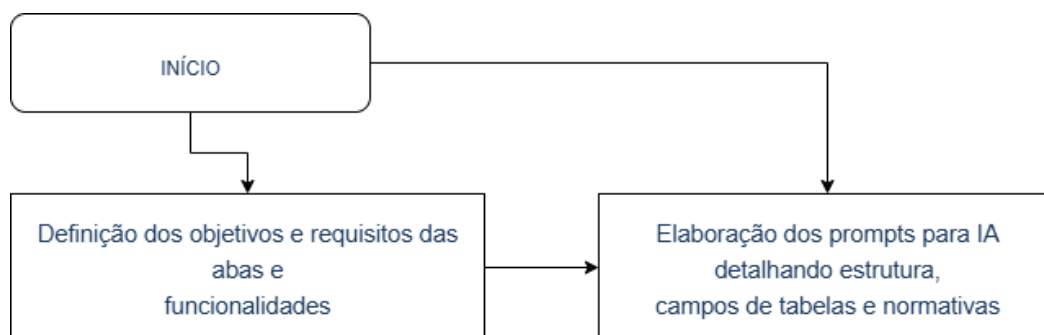
3.3.4.1 PLANEJAMENTO E ESPECIFICAÇÃO

A primeira fase envolveu a definição dos objetivos funcionais do sistema e sua estrutura modular, sendo:

- Cadastro e gestão de materiais e perfis metálicos utilizados no dimensionamento;
- Interfaces para entrada de dados de projeto e suas barras estruturais;
- Implementação automatizada dos cálculos normativos previstos na NBR 17184 (ABNT, 2024);
- Visualização clara dos resultados e geração de relatórios técnicos exportáveis;
- Opções de personalização visual adaptável (temas claro/escuro).

Para tanto, foram elaboradas especificações detalhadas para cada componente, garantindo a fluidez da interface e a rastreabilidade dos dados e das operações

Figura 3.8 – Fluxo de planejamento.



Fonte: Autor.

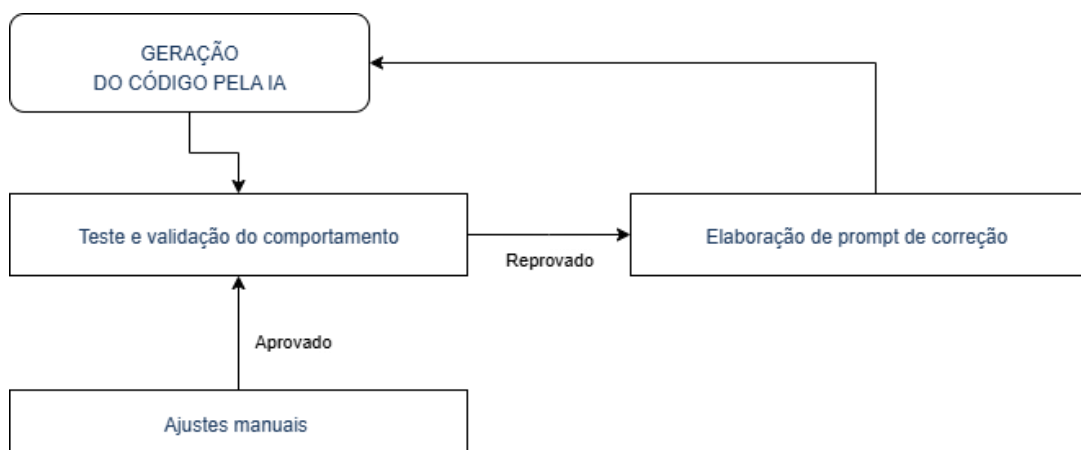
3.3.4.2 DESENVOLVIMENTO ITERATIVO ASSISTIDO POR IA

A etapa seguinte concentrou-se na produção e teste dos códigos. Aproveitou-se o potencial da IA Claude 4.0 Sonnet para acelerar etapas repetitivas e implementar rapidamente

rascunhos de módulos. Cada função ou interface gerada era avaliada, testada e, sempre que necessário, corrigida manualmente.

- Ciclo de trabalho prático:
 - Preparação do prompt técnico: Descrição clara do que se espera de cada módulo.
 - Geração de código pela IA: IA entrega classes, funções ou trechos de interface conforme solicitado.
 - Testes manuais e automáticos: Execução do código com casos teste representativos; checagem visual da interface.
 - Correções e ajustes: Sempre que necessário, refino do prompt e reaproveitamento dos códigos válidos.

Figura 3.9 – Geração de código.



Fonte: Autor.

3.3.4.3 INTEGRAÇÃO, COMPATIBILIZAÇÃO E TESTES GLOBAIS

Com a conclusão individual de cada módulo, o sistema foi integrado em camadas: dados, núcleo de cálculo, interface, relatórios.

- Aplicou-se padronização nos nomes de variáveis, estilos de código e na comunicação entre componentes.
- Realizou-se o teste integrado de todos os fluxos (do cadastro do material à geração do relatório final).
- Comprovou-se o funcionamento robusto do sistema com projetos de diferentes portes, sempre buscando identificar pontos de falha ou inconsistência nos resultados.

3.3.4.4 PADRONIZAÇÃO VISUAL E ACESSIBILIDADE

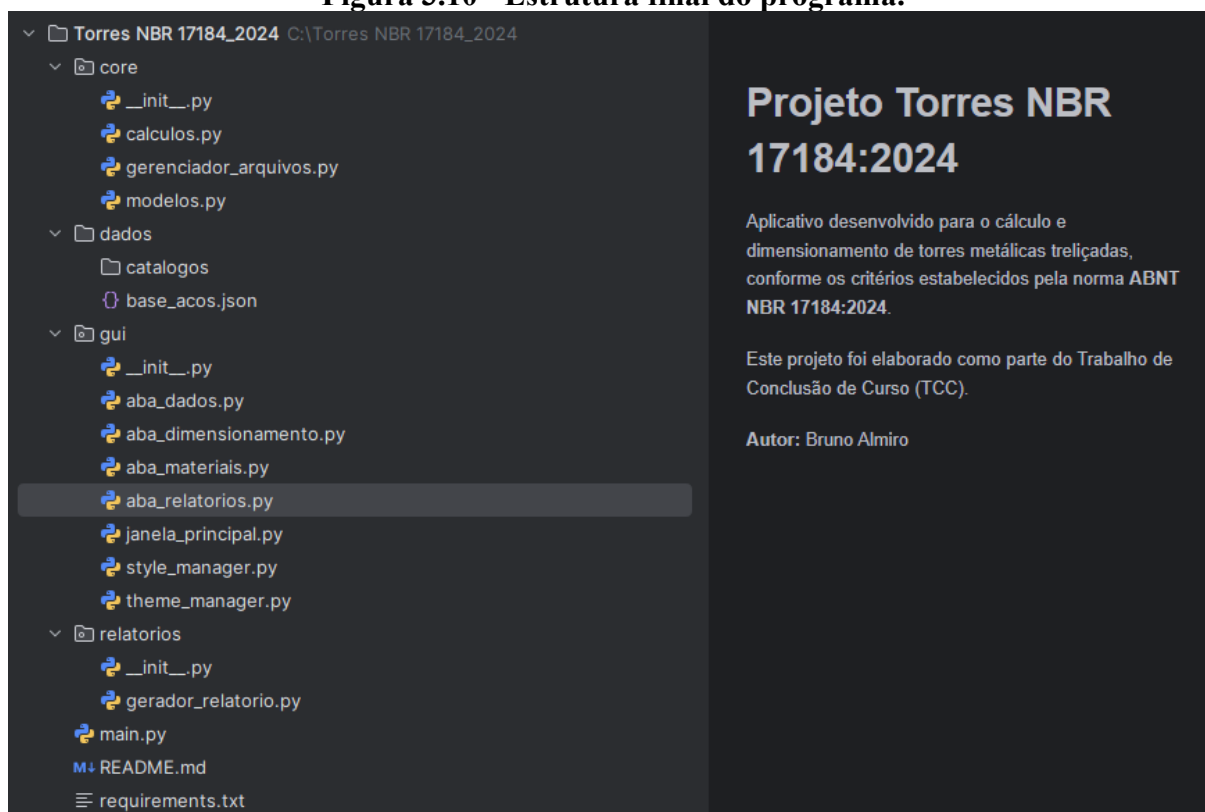
Após garantir o funcionamento técnico, seguiu-se para etapa de padronização visual. Adotou-se uma paleta de cores acessível, pensada para ambientes claros e escuros;

- Definiram-se regras rígidas para tamanhos de fonte, espaçamento de tabelas e destaque visual de erros/aprovações;
- Testou-se o software em diferentes resoluções de tela para garantir responsividade;
- Realizou-se ajustes finos na disposição dos elementos para favorecer a navegação intuitiva.

3.4.4.5 ESTRUTURA E PAPEL DOS ARQUIVOS

A estrutura final do programa, vista na Figura 2.1do foi definida de modo a isolar responsabilidades e facilitar futuras evoluções/modificações. O Quadro 3.2 descreve o papel de cada arquivo do programa.

Figura 3.10 - Estrutura final do programa.



Fonte: Autor.

Quadro 3.2 – funções dos módulos do programa.

Arquivo/Módulo	Função
main.py	Inicialização, configuração global, segurança de execução
core/modelos.py	Definição das entidades básicas: materiais, perfis, barras, projetos
core/calculos.py	Implementação das rotinas normativas: esbeltez, resistências, interações normativas
core/gerenciador_arquivos.py	Gerenciamento dos dados: importação/exportação, leitura e referência cruzada
relatorios/gerador_relatorio.py	Geração de relatórios técnicos detalhados com rastreo das variáveis e etapas do cálculo
gui/janela_principal.py	Estrutura e integração das abas principais do aplicativo
gui/aba_materiais.py	Gestão de materiais e perfis, permitindo importação/exportação
gui/aba_dados.py	Entrada e validação dos dados de projeto
gui/aba_dimensionamento.py	Execução dos cálculos estruturais e apresentação visual dos resultados
gui/aba_relatorios.py	Relatórios configuráveis pelo usuário, prontos para exportação
gui/theme_manager.py gui/style_manager.py	Alternância de temas, padronização e estilos

3.3.4.6 DESCRIÇÃO DA INTERFACE DO PROGRAMA

A interface gráfica do Torres NBR 17184:2024 foi estruturada em abas funcionais, cada uma dedicada a uma etapa específica do processo de dimensionamento, priorizando fluidez operacional, clareza visual e praticidade no preenchimento e análise dos dados.

3.3.4.7 JANELA PRINCIPAL

Ao iniciar o programa a janela principal, é exibida com uma barra de abas na parte superior e um menu completo de operações básicas (novo, abrir, salvar projeto, ajuda). O layout adapta-se automaticamente ao tema claro ou escuro, garantindo leitura confortável e ressaltando apenas os elementos essenciais para a navegação.

3.3.4.8 ABA MATERIAIS

Nesta aba, são gerenciados os materiais de aço e os perfis estruturais, por meio de listas editáveis e controles para inclusão, remoção, importação e exportação de catálogos nos formatos JSON ou Excel. Cada coluna, como nome, limite de escoamento (f_y), resistência última (f_u) e módulo de elasticidade (E), possui validação em tempo real, impedindo entradas fora dos padrões normativos. A Figura 3.11 ilustra a disposição clara dos botões de ação e dos filtros de pesquisa aplicados aos registros.

Figura 3.11 – Aba Materiais.

Fonte: Autor.

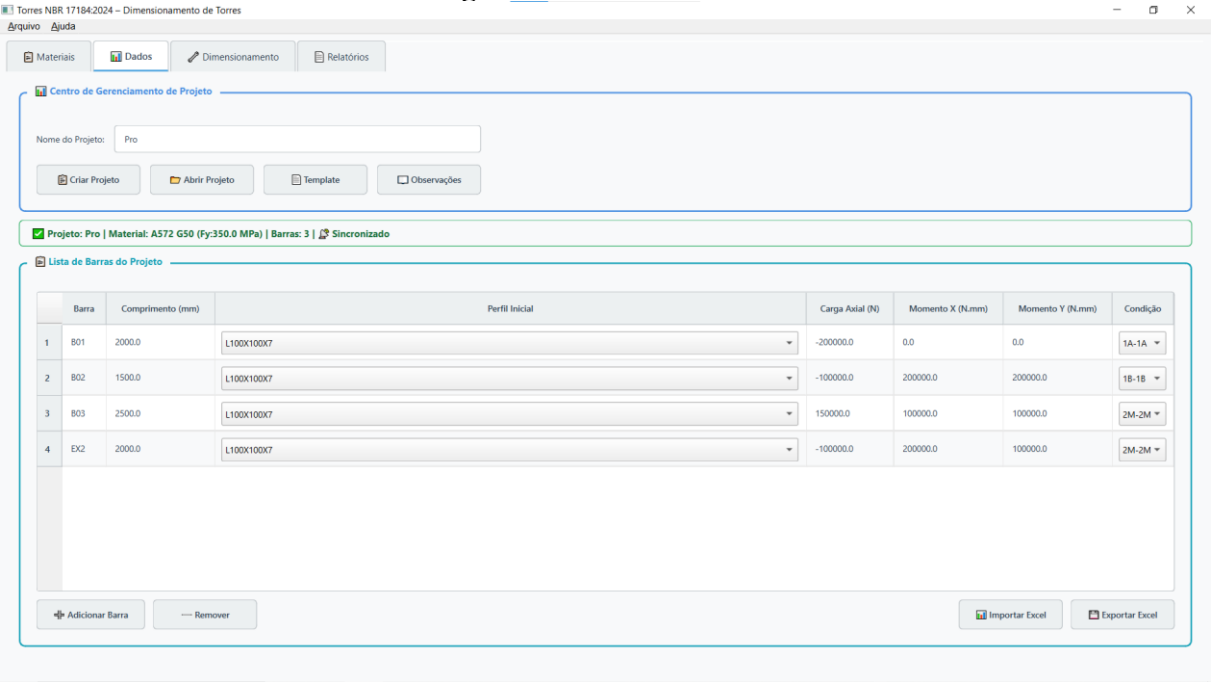
Figura 3.12 – Aba Materiais (sub-abas).

Fonte: Autor.

3.3.4.9 ABA DADOS

A aba de dados permite descrever individualmente cada barra da torre, informando nome, comprimento em milímetros, perfil inicial, cargas axiais, momentos fletores e condição de contorno. A tabela é aprimorada com widgets de seleção, como listas suspensas para perfis e condições, e cada modificação aciona automaticamente o salvamento do estado do projeto. A validação embutida sinaliza imediatamente quaisquer valores inconsistentes, conforme ilustrado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Aba Dados.

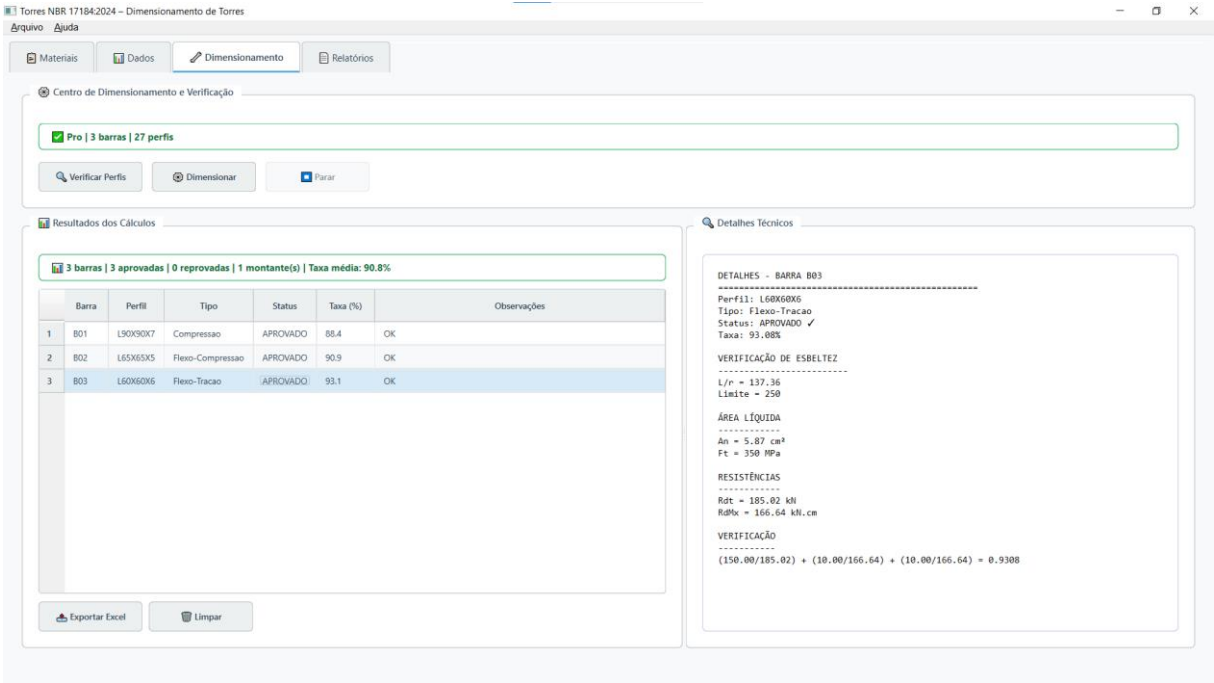


Fonte: Autor.

3.3.4.10 ABA DIMENSIONAMENTO

Após a configuração dos materiais e dados, a aba de dimensionamento concentra a execução dos cálculos conforme as exigências da norma. Dois botões permitem escolher entre a verificação pontual e a otimização de perfis, enquanto um indicador de progresso exibe a evolução do processo em tempo real. Os resultados são organizados em uma tabela por barra, perfil adotado, tipo de solicitação, taxa de utilização e observações. A interface utiliza cores suaves para realçar os resultados, com aprovações em verde e reprovações em vermelho. Esses elementos estão representados de forma uniforme na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Aba Dimensionamento.

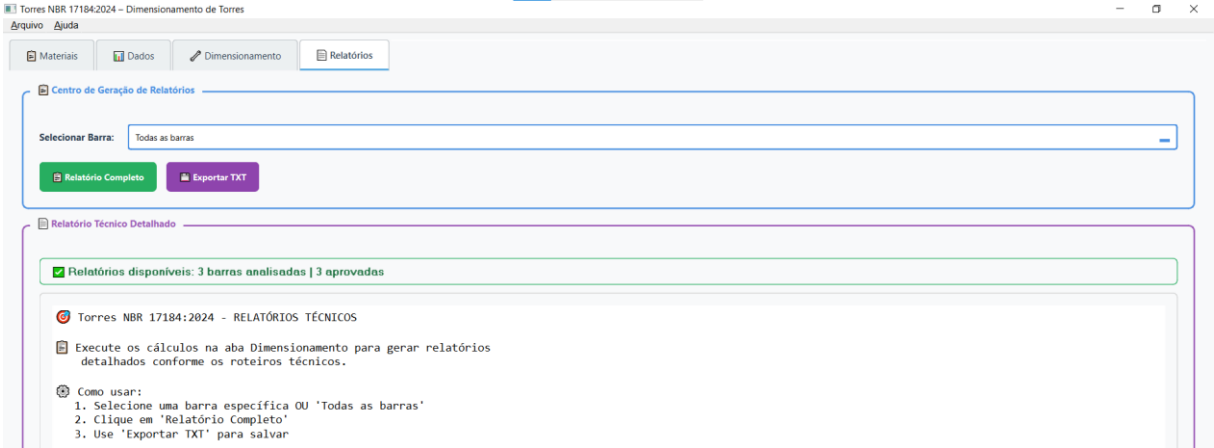


Fonte: Autor.

3.3.4.11 ABA RELATÓRIOS

Na aba de relatórios, o usuário define o escopo do documento, podendo escolher entre a versão completa, que apresenta um resumo de todas as barras dimensionadas, ou a versão detalhada, que exibe os procedimentos de cálculo passo a passo para cada barra, possibilitando a validação dos resultados. O conteúdo é exibido em um painel de pré-visualização antes da exportação, sendo que o relatório pode ser salvo no formato “.txt”. A Figura 3.15 ilustra a interface da aba, enquanto as Figuras 3.16 e 3.17 apresentam exemplos de relatórios extraídos do programa.

Figura 3.15 – Aba Relatórios.



Fonte: Autor.

Figura 3.16 – Exemplo de um relatório completo

=====

TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

=====

Projeto: Pro
 Data/Hora: 10/07/2025 20:32:27
 Material: A572 G50
 Tipo de Torre: SUSPENSAO

RESUMO ESTATÍSTICO

Total de barras analisadas: 3
 Barras aprovadas: 3
 Barras reprovadas: 0
 Taxa de aprovação: 100.0%
 Taxa de utilização média: 90.8%

RESULTADOS POR BARRA

Barra	Perfil	Tipo	Status	Taxa %	Observações
B01	L90X90X7	compressao	APROVADO	88.4	OK
B02	L65X65X5	flexo-compress	APROVADO	90.9	OK
B03	L60X60X6	flexo-tracao	APROVADO	93.1	OK

RECOMENDAÇÕES

- 2 barras com alta utilização (>90%)
- Avaliar otimização dos perfis para economia
- Todos os perfis foram aprovados
- Verificar possibilidade de otimização para redução de peso

Fonte: Autor.

Figura 3.17 – Exemplo de um relatório de barra.

=====

RELATÓRIO DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

=====

Data/Hora: 10/07/2025 20:32:55
 Barra Analisada: B02

PROPRIEDADES DO MATERIAL

Material: A572 G50
 Tensão de Escoamento (Fy): 350 MPa
 Tensão de Ruptura (Fu): 450 MPa
 Módulo de Elasticidade (E): 200000 MPa

continua

continuação.

CONFIGURAÇÃO DA TORRE

 Tipo de Torre: SUSPENSAO
 Fator de Minoração (ΦR): 0.90

DADOS DA BARRA

 Nome: B02
 Comprimento: 1500 mm = 150.0 cm
 Perfil Analisado: L65X65X5
 Condição de Contorno: 1B-1B
 Tipo de Barra: Diagonal/Montante

SOLICITAÇÕES DE PROJETO

 Carga Axial: -100000 N = -100 kN
 Momento em X: 200000 N.mm = 20.0 kN.cm
 Momento em Y: 200000 N.mm = 20.0 kN.cm
 Tipo de Solicitação: Flexo-Compressao

VERIFICAÇÃO DE ESBELTEZ LIMITE

 Esbeltez $L/r = 74.63$
 Limite permitido: 200 (200 (demais barras))
 Verificação: $74.63 \leq 200 \rightarrow OK$

CÁLCULO DA ESBELTEZ EFETIVA

 Condição: 1B-1B
 Equação aplicada: $(k.L)/r = L/r$
 Esbeltez Efetiva $(k.L)/r = 74.63$

ANÁLISE LOCAL DA SEÇÃO TRANSVERSAL

 Razão $w/t = 11.00$
 $(w/t)_{limite} = 0,470 \times \sqrt{E/F_y} = 11.24$
 Tensão Limite $F_{cr} = 350.00$ MPa
 Tensão de Compressão $F_c = 263.60$ MPa

continua

RESISTÊNCIAS DE CÁLCULO

Resistência à Compressão:

$$R_{dc} = 0,1 \times \phi_R \times F_c \times A_g$$

$$R_{dc} = 0,1 \times 0,90 \times 263,60 \times A_g$$

$$R_{dc} = 150,41 \text{ kN}$$

Resistência à Flexão:

$$R_{dMx} = R_{dMy} = 0,1 \times \phi_R \times F_y \times W_x$$

$$R_{dMx} = R_{dMy} = 163,80 \text{ kN.cm}$$

VERIFICAÇÃO FINAL

Critério de verificação:

$$(S_{dc}/R_{dc}) + (S_{dMx}/R_{dMx}) + (S_{dMy}/R_{dMy}) \leq 1,0$$

$$\text{Cálculo: } (100,00/150,41) + (20,00/163,80) + (20,00/163,80) = 0,9091$$

Taxa de Utilização: 90,91%

Resultado: APROVADO ✓

FIM DO RELATÓRIO

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AÇÕES DE PROJETO

As ações consideradas neste projeto foram determinadas a partir dos critérios para os carregamentos permanentes e variáveis aplicados no cálculo estrutural da norma NBR 5422 (ABNT, 2024).

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE INSTALAÇÃO

A região de instalação escolhida foi Serra do Mel, situada no estado do Rio Grande do Norte, aproximadamente 280 km da capital Natal. Trata-se de uma área caracterizada por terreno suavemente ondulado, classificado na categoria B, que compreende terrenos abertos com poucos obstáculos, fato que influencia diretamente na intensidade e comportamento dos ventos predominantes. O clima local é tropical, moderadamente temperado, com temperatura mínima média anual ao redor de 22°C, conforme dados do INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET) para a última década, e altitude nas casas dos 218 metros. Esses

dados são relevantes para o cálculo das propriedades do ar e as características mecânicas dos materiais.

4.1.2 AÇÃO DO VENTO

O primeiro parâmetro de cálculo é a pressão dinâmica de vento, como a versão de 2024 da NBR 5422 não oferece mais as isopletras de vento básico, optou-se por partir dos ventos com período de integração de 3 segundos (rajadas) dados pela NBR 6123 (ABNT, 2023), cuja o valor para a região nordeste do brasil é de 30 m/s, com através dos procedimentos de cálculo do tópico 2.7, foi possível chegar nas pressões dinâmicas de vento para o projeto, cujo valores são apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Pressão Dinâmica de Vento (q).

10min							30s		3s	
VR	K _{tur}	V _p	μ	t	alt	q0 (Pa)	V _{p30s}	q0 (Pa)	V _{p3s}	q0 (Pa)
21,28	1,16	24,68	1,17	22	218	355	30,12	529	34,63	699

Fonte: Autor (2025).

Em posse da pressão da pressão dinâmica de vento, foi possível aplicar todos os procedimentos do item 2.7, o obter as ações sobre cada elemento que influem ou compõe a torre, tais cargas encontra-se em detalhes no APÊNDICE A – TABELAS DE AÇÕES DE PROJETO.

4.1.3 APLICAÇÃO DAS AÇÕES DE VENTO NA TORRE

As primeiras ações aplicadas no modelo estrutural da torre foram as ações de vento sobre os isoladores, cujos códigos de nomenclatura adotados iniciam com AIV. Conforme demonstrado nas Figuras 5.1 e 5.2, essas ações foram lançadas no SAP2000 para as três direções principais de vento (longitudinal, transversal e oblíqua), especificamente nos pontos de ancoragem dos cabos condutores principais, ancorados nos braços e no centro da torre.

Figura 4.1 – Ações de vento de 10 min nos isoladores.

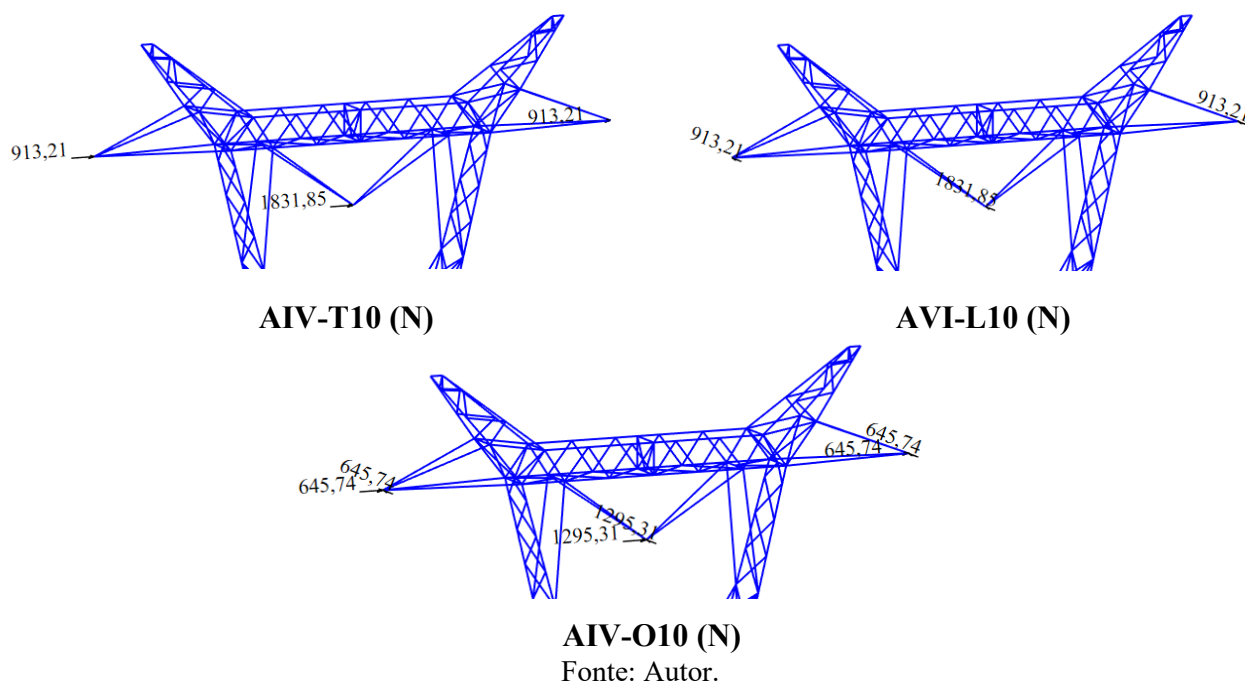
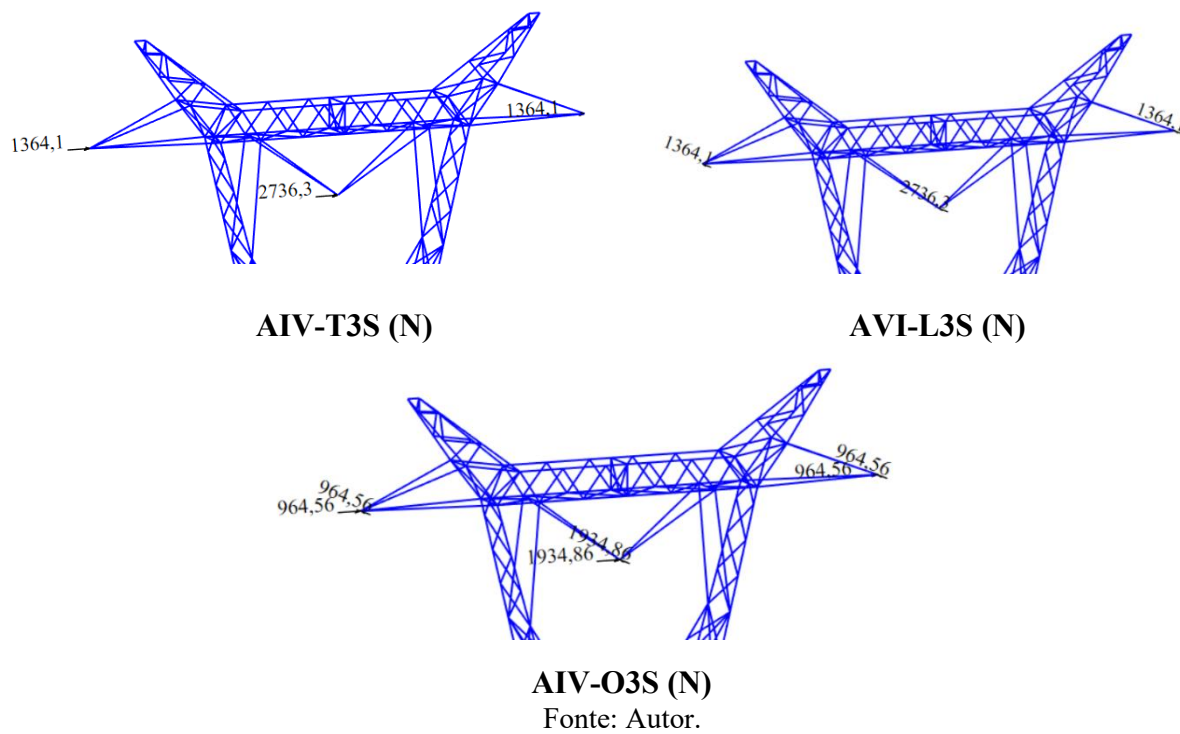


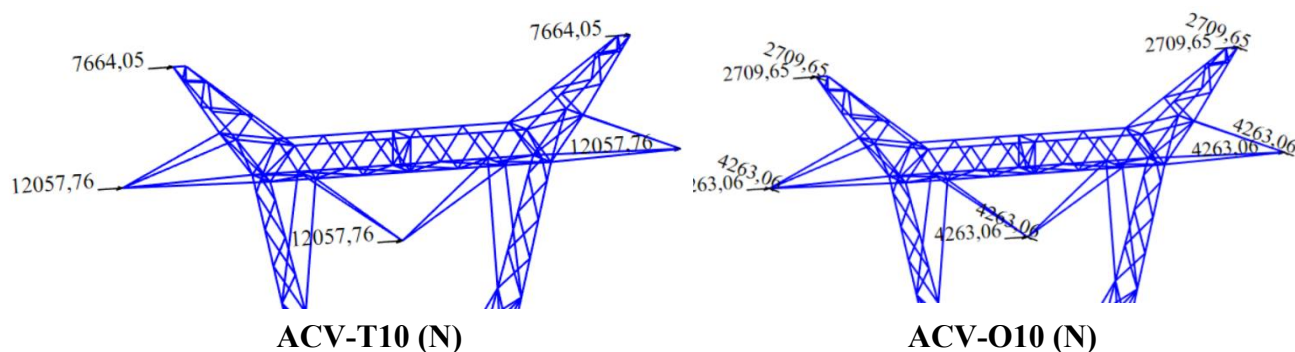
Figura 4.2 – Ações de vento de 3s min nos isoladores.



Depois, foram inseridas as ações provenientes do efeito do vento sobre os cabos, identificadas pelo prefixo **ACV** nas tabelas e modelos. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram a aplicação

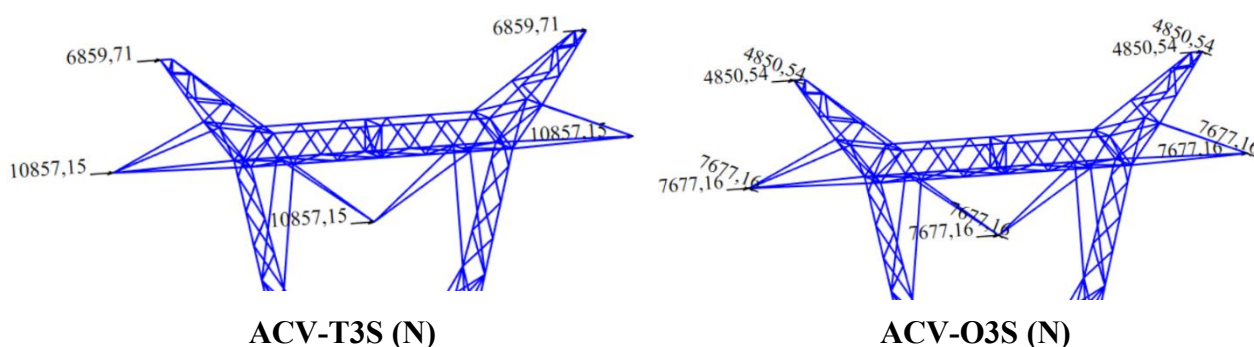
dessas forças, que segue o mesmo raciocínio adotado para os isoladores, porém aqui os ventos longitudinais não causam efeito nos cabos.

Figura 4.3 – Ações de vento de 10 min nos cabos.



Fonte: Autor.

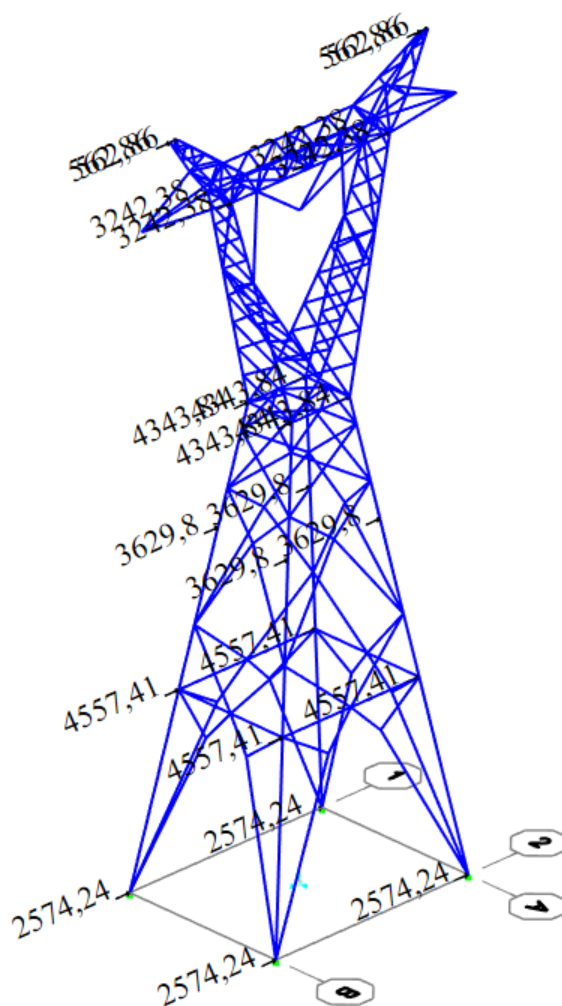
Figura 4.4 – Ações de vento de 3s min nos cabos.



Fonte: Autor.

Foram aplicadas as ações do vento sobre a estrutura da torre. Para tanto, a torre foi dividida em seis seções, estabelecendo áreas de influência para uma simulação mais precisa dos esforços distribuídos ao longo da altura total. Assim, as cargas calculadas e apresentadas nas Tabelas A.12 a A.17 do Apêndice A foram subdivididas em quatro pontos principais por seção. Como a visualização destas cargas não são entendíveis sem aproximar do ponto lançando, a Figura 4.5 apresenta com um exemplo de lançamento das cargas de vento sobre a torre e o Quadro 4.1 apresenta um resumo destas cargas, para os dois períodos de integração avaliados e todas as direções.

Figura 4.5 – Exemplo de lançamento das ações de vento sobre a torre no SAP2000.



Fonte: Autor.

Quadro 4.1 – Ações de vento sobre a Torre.

VENTO TRANSVERSAL (10 min)					VENTO TRANSVERSAL (3 s)				
PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)	PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)
FV1	49,8		2251,436	2251,436	FV1	49,8		1738,125	1738,125
FV2	45			12969,54	FV2	45			10129,84
FV3	30,2			17375,34	FV3	30,2			13980,85
FV2	22,5			14519,21	FV2	22,5			12678,92
FV5	12,5			18229,65	FV5	12,5			17180,29
FV6	0	0	10296,95	10296,95	FV6	0	0	10171,75	10171,75
VENTO OBLIQUO (10 min)					VENTO OBLIQUO (3 s)				
PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)	PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)
FV1	49,80		5896,32	5896,32	FV1	49,80		4552,00	4552,00
FV2	45,00			22909,65	FV2	45,00			17855,75

continua

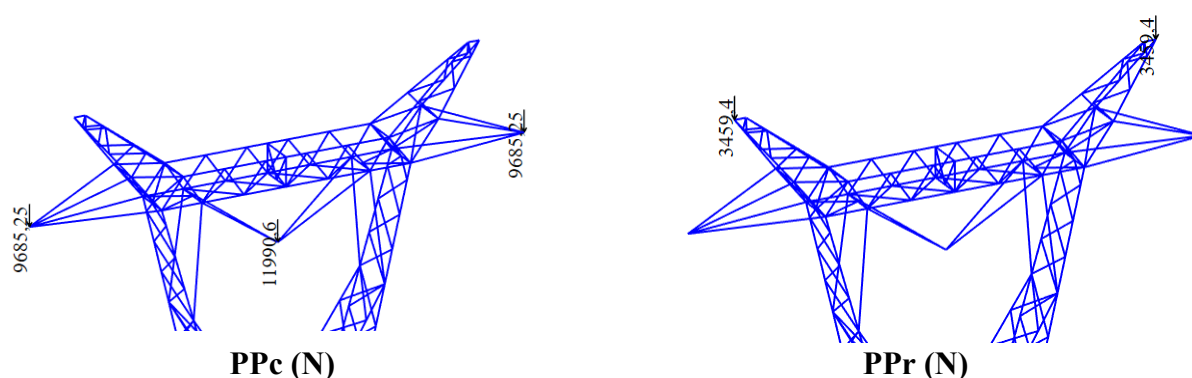
continuação

FV3	30,20			24656,64	FV3	30,20			19821,64
FV2	22,50			20002,06	FV2	22,50			17470,13
FV5	12,50			24511,83	FV5	12,50			23066,56
FV6	0,00	0,00	13427,18	13427,18	FV6	0,00	0,00	13263,92	13263,92
VENTO LOGITUDINAL (10 min)					VENTO LOGITUDINAL (3 s)				
PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)	PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)
FV1	49,80		7575,77	7575,77	FV1	49,80		5848,55	5848,55
FV2	45,00			25213,21	FV2	45,00			19629,74
FV3	30,20			23719,06	FV3	30,20			
FV2	22,50			18817,56	FV2	22,50			
FV5	12,50			22623,41	FV5	12,50			21263,98
FV6	0,00	0,00	12081,68	12081,68	FV6	0,00	0,00	11934,78	11934,78

Fonte: Autor.

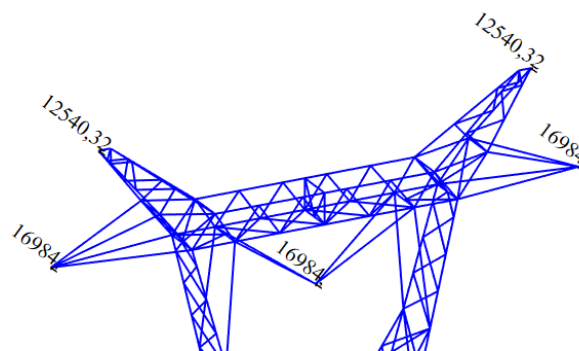
Além das ações do vento, também foi considerada a tração aplicada pelos cabos. Esse carregamento tem duas componentes principais: a vertical (associada ao peso próprio dos cabos somado ao peso dos isoladores) e a horizontal (relacionada ao desequilíbrio provocado pela eventual ruptura de um dos cabos). Tais componentes foram aplicadas nos pontos de ancoragem conforme ilustrado nas Figuras 5.6 e 5.7, com detalhamento numérico apresentado nas Tabelas A.10 e A.11 do Apêndice A.

Figura 4.6 – Tração nos cabos – Componente vertical.



Fonte: Autor.

Figura 5.8 – Tração nos cabos – Componente horizontal.



THR (N)

Fonte: Autor.

A carga referente ao peso próprio da torre não necessitou de cálculo manual, uma vez que o software SAP2000 considera automaticamente o peso dos perfis estruturais inseridos no modelo, no entanto, foi necessário definir as combinações das hipóteses de carregamento conforme normativas vigentes, para inserir no mesmo.

Em termos de magnitude, as ações do vento aplicadas diretamente na estrutura quanto sobre os cabos e isoladores configuram as solicitações mais influentes e críticas para o dimensionamento da torre. Essa predominância das cargas de vento é amplamente reconhecida na literatura; Ramos *et al.* (2018) destaca que rajadas de curta duração (3 segundos) é essencial para captar os picos de esforço que podem comprometer a segurança e a estabilidade da torre. Silva e Carneiro (2020) complementam que a subdivisão detalhada da estrutura em seções para aplicação das cargas de vento possibilita uma análise mais precisa dos esforços locais, evitando subdimensionamentos e garantindo maior eficiência estrutural.

4.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA

4.2.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DISCRETO

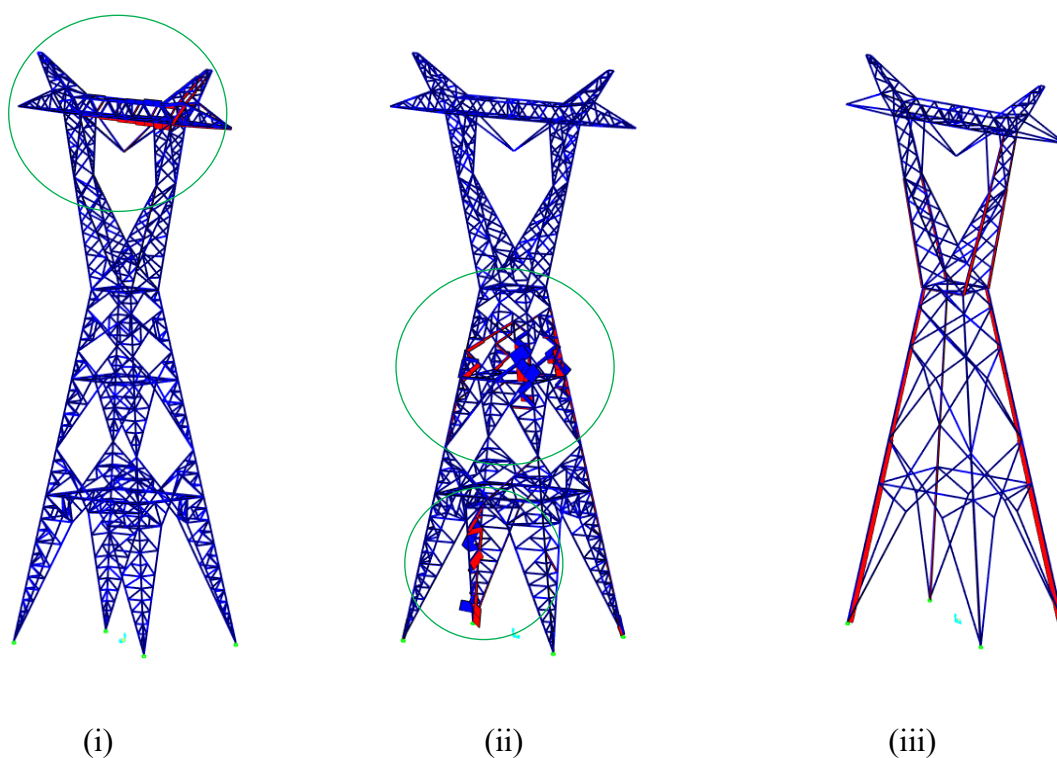
Para avaliar o comportamento estrutural da torre sob seu próprio peso, foram comparados três modelos com diferentes estratégias de discretização:

- i. modelo totalmente rotulado, com todas as ligações idealizadas como articulações;
- ii. modelo com barras redundantes rotuladas, mas com continuidade entre os elementos principais, permitindo transmissão parcial de momentos;
- iii. modelo sem barras redundantes, no qual os efeitos de seu peso foram aplicados diretamente como cargas nodais.

As análises foram conduzidas por meio de modelo não linear, incluindo os efeitos geométricos e materiais. Esse tipo de abordagem é recomendado por diversos autores (Albermani *et al.*, 2009; Rao *et al.*, 2012) para estruturas esbeltas sujeitas a instabilidades, como torres treliçadas, pois permite captar redistribuições de esforços, plastificações localizadas e perda de rigidez com o carregamento crescente

A Figura 4.7 apresenta a comparação dos esforços axiais nos elementos principais. Observa-se que apenas o modelo sem barras redundantes resultou em uma distribuição compatível com o comportamento físico de treliças reais. Os demais apresentaram concentração excessiva de esforços em poucos elementos. Segundo Albermani *et al.* (2009), é típico de modelagens simplificadas baseadas em articulações, que não representam adequadamente a rigidez e a interação entre os membros.

Figura 4.7 – Comparação entre modelos para esforços axiais.



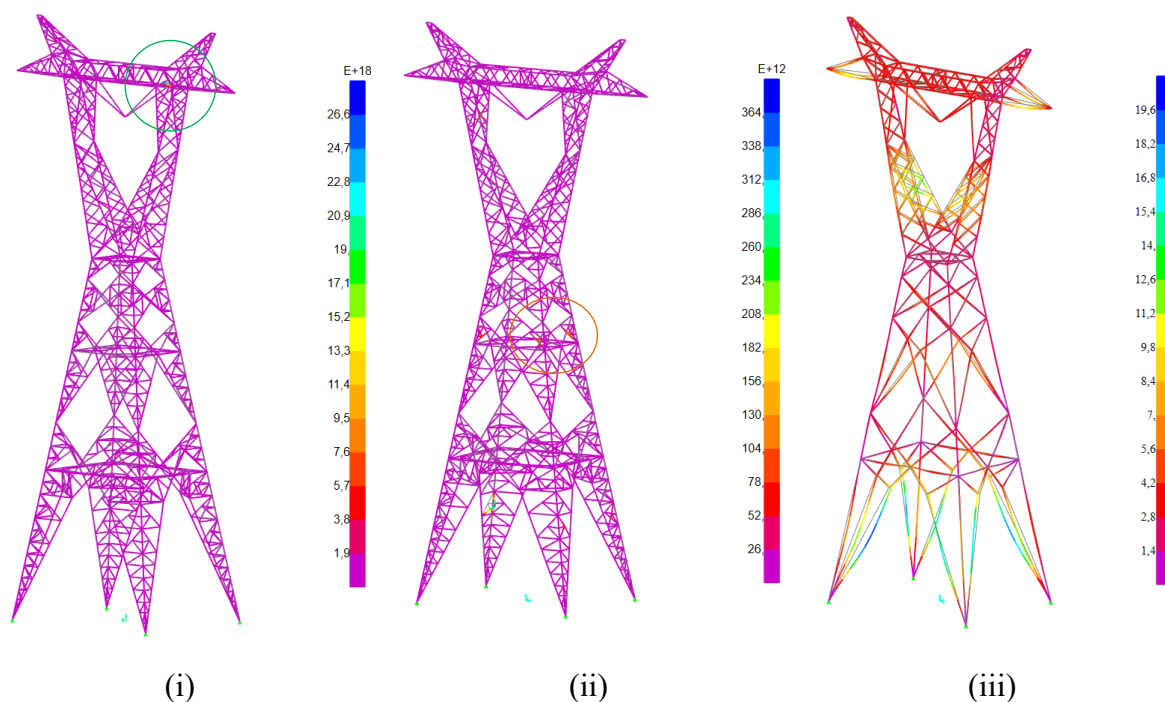
Fonte: Autor.

Já na Figura 4.8, são apresentadas as deformações. Verifica-se que o modelo sem barras redundantes também forneceu os deslocamentos mais consistentes com a rigidez global esperada da estrutura. Modelos com ligações puramente rotuladas, além de irrealistas, tendem a superestimar deslocamentos, conforme demonstrado por Rao *et al.* (2010) em estudos comparativos de torres reais e simuladas.

Além disso, Heathcote (2001) destaca que a adoção de modelos mal calibrados ou com idealizações excessivas pode comprometer significativamente a confiabilidade de sistemas estruturais. Isso reforça a necessidade de critérios rigorosos na definição da discretização, especialmente quando o modelo servirá de base para o dimensionamento final.

Dessa forma, com base na análise comparativa dos esforços e deslocamentos, na coerência física com estruturas reais e no embasamento técnico presente na literatura, infere-se se que o modelo sem barras redundantes, com aplicação de cargas equivalentes, é o mais adequado para representar a torre analisada e foi adotado nas etapas seguintes de análise e dimensionamento.

Figura 4.8 – Comparação entre modelos para deslocamentos.



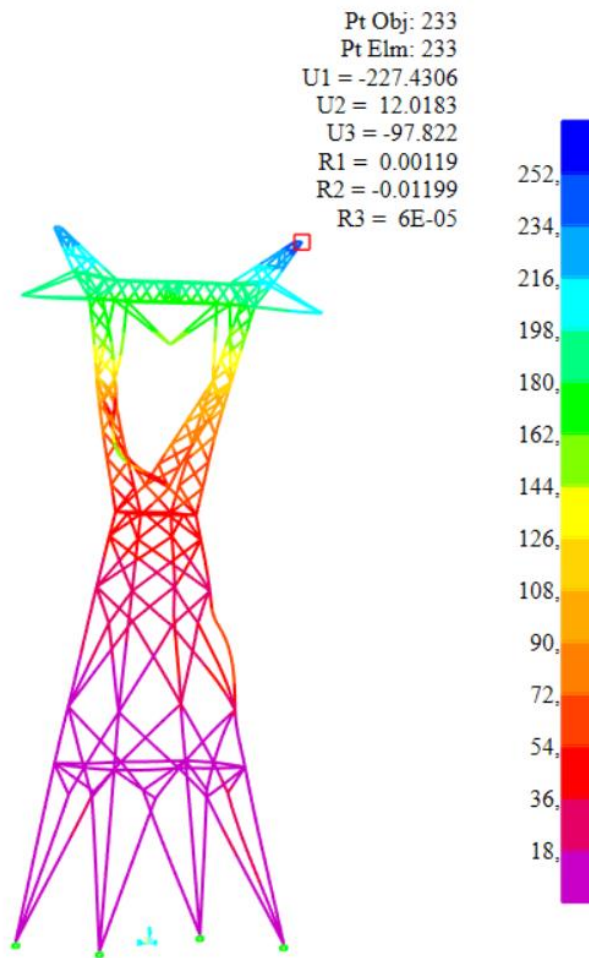
Fonte: Autor.

4.2.2 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

A verificação dos deslocamentos da torre foi realizada com base na hipótese de estado limite de utilização, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 5422 (ABNT, 2024). Essa verificação tem como objetivo assegurar que as deformações sob ação das cargas permanentes e variáveis não comprometam o desempenho funcional da estrutura. A combinação de ações considerada para esta análise está descrita no 3.3.2.1 da seção Materiais e Métodos.

A análise foi conduzida por meio do modelo não linear desenvolvido na etapa anterior, de modo a incorporar os efeitos de segunda ordem e representar com maior confiabilidade o comportamento global da estrutura. O deslocamento máximo foi extraído diretamente da simulação realizada no software SAP2000 e encontra-se representado na Figura 4.9, que ilustra a configuração deformada da torre sob a ação do carregamento.

Figura 4.9 – Deslocamento máximos ELS (mm).



Fonte: Autor.

O valor obtido para o deslocamento vertical máximo de aproximadamente 22,7 mm foi confrontado com o limite admissível estabelecido pela NBR 17184 (ABNT, 2024) que é $H/100$, que estabelece critérios de desempenho para estruturas metálicas de torres treliçadas. Nesse caso, o deslocamento verificado consideravelmente menor que valor limite permitido pela norma:

$$\delta_{\text{máx}} \leq \delta_{\text{adm}} \rightarrow 22,7 \text{ cm} \leq 49,8 \text{ cm}$$

Dessa forma, identificou-se que a estrutura atende integralmente às exigências normativas relacionadas à rigidez e estabilidade em serviço. O resultado válido a conformidade do modelo adotado e permite sua utilização nas etapas seguintes de análise e dimensionamento.

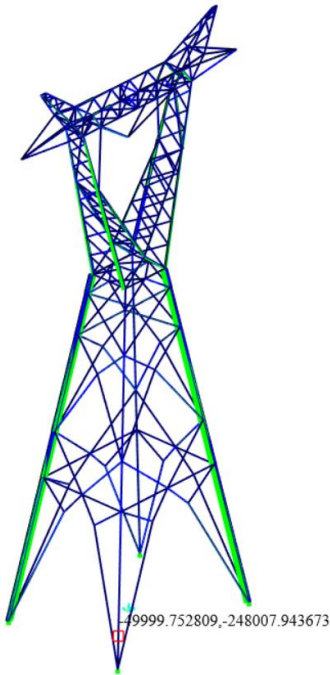
4.2.3 ESFORÇOS DE PROJETO

Com o objetivo de determinar os esforços máximos atuantes na estrutura para fins de dimensionamento, foram geradas as envoltórias de esforços a partir de todas as hipóteses de carregamento consideradas no tópico de matérias e métodos. As envoltórias representam os valores máximos de esforços internos (tração, compressão, momento fletor e torção) obtidos em cada barra da torre ao longo das diferentes combinações analisadas. Dessa forma, garantem que o dimensionamento contemple a condição mais desfavorável em cada elemento estrutural.

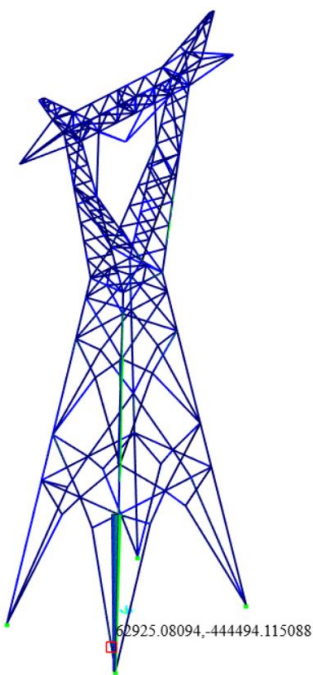
A Figura 4.10 apresenta as envoltórias dos esforços atuantes nas barras principais da torre. A envoltória "a" exibe os esforços axiais máximos de tração e compressão ao longo de toda a estrutura. A envoltória "b" representa os momentos fletores em torno do eixo x, enquanto a envoltória "c" mostra os momentos em torno do eixo y. Por fim, a envoltória "d" ilustra os esforços de torção. Observa-se que os valores de torção obtidos são de baixa magnitude, não exercendo influência estrutural significativa neste tipo de estrutura. Ademais, a NBR 17184 (ABNT, 2024), que estabelece os critérios de dimensionamento para torres treliçadas em sistemas de transmissão de energia elétrica, não exige verificações específicas para esforços de torção. Portanto, tais esforços serão desconsiderados nas etapas de dimensionamento da estrutura.

Complementando a análise, a Figura 4.10 apresenta os esforços máximos de tração, compressão e momentos fletores extraídos diretamente do software SAP2000, listando os valores correspondentes às barras mais relevantes para o dimensionamento. Destaca-se a barra B22, evidenciada em amarelo, cujos esforços estão representados nas envoltórias do Quadro 4.2, enquanto o Quadro 4.3 apresentas os esforços que chegam para a fundação.

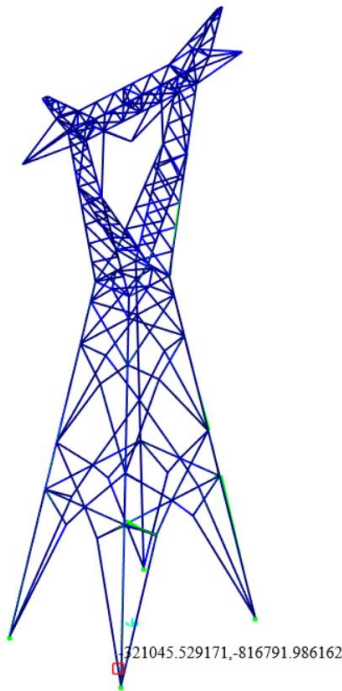
Figura 4.10 – Envoltórias de esforços da Torre.



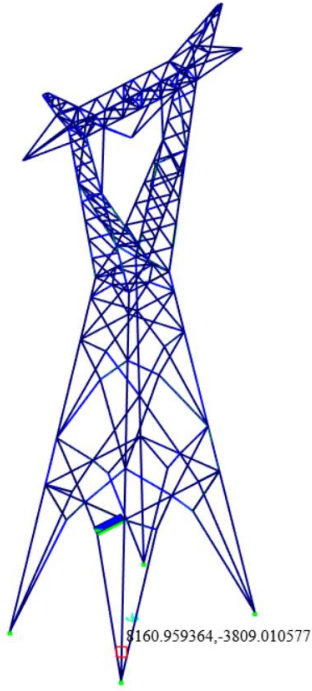
Esforços axiais (N)



Momentos em x (N.mm)



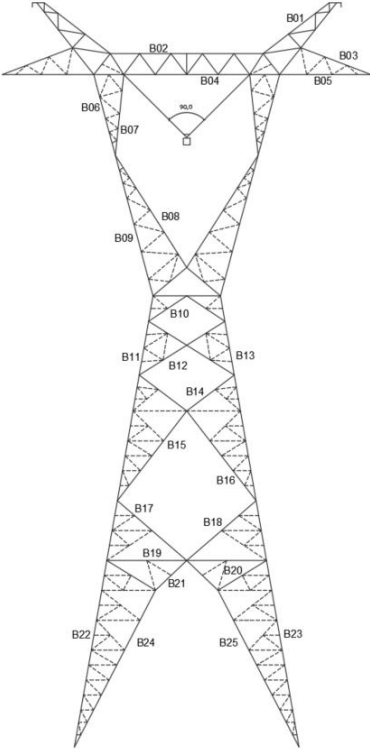
Momentos em x (N.mm)



Torção (N.mm)

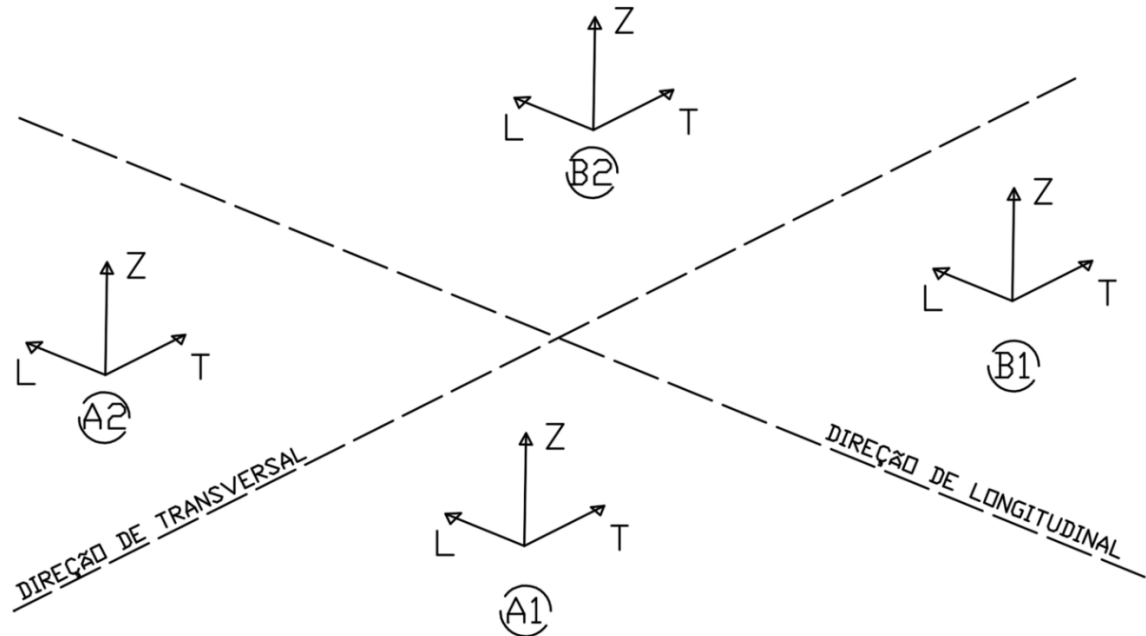
Fonte: Autor.

Quadro 4.2 – Barras de projeto.

POSIÇÃO	BARRA	Comprimento (mm)	Perfil inicial	Carga Axial (N)	Momento em X (N.mm)	Momento em Y (N.mm)	Condição de ligação
 ----- Barras Redundantes.	B01	2840	L60X60X4	23895	23827	43783	2B-2B
	B02	2100	L60X60X4	81377	29799	54758	2B-2B
	B03	2970	L60X60X4	28500	42598	78276	2M-2M
	B04	2100	L60X60X4	-53594	44026	80900	2M-2M
	B05	1810	L60X60X4	-52617	88018	161740	2M-2M
	B06	1610	L60X60X4	-128035	176724	324744	2M-2M
	B07	1810	L60X60X4	69832	27159	49907	2M-2M
	B08	1780	L60X60X4	-82846	40600	74605	2M-2M
	B09	1950	L60X60X4	-172627	365988	672531	2M-2M
	B10	3070	L60X60X4	-19622	9135	16786	2B-2B
	B11	920	L60X60X4	-157848	206113	378749	2M-2M
	B12	3760	L60X60X4	-16080	153902	282806	2B-2B
	B13	920	L60X60X4	209871	213915	393085	2M-2M
	B14	3070	L60X60X4	12944	244150	448644	1A-1A
	B15	2540	L60X60X4	15089	23514	43209	2A-1A
	B16	2540	L60X60X4	-17373	24561	45133	2B-2B
	B17	3070	L60X60X4	9310	13735	25239	2B-2B
	B18	3070	L60X60X4	-9294	15241	28007	2B-2B
	B19	2660	L60X60X4	-9872	12652	23249	2B-2B
	B20	3820	L60X60X4	5227	23251	42726	2B-2B
	B21	2900	L60X60X4	-19397	25169	46250	2B-2B
	B22	920	L60X60X4	-248008	444494	816792	2M-2M
	B23	920	L60X60X4	237352	442694	805645	2M-2M
	B24	2260	L60X60X4	-19765	253545	465908	2M-2M
	B25	2260	L60X60X4	18235	245654	451408	2M-2M

Fonte: Autor.

Quadro 4.3 – Esforços para a fundação



		COMPRESSÃO (N)	ARRANQUE (N)	TRANSVERSAL (N)	LONGITUDIAL (N)
A1	403	-273144,89	273144,89	54338,46	43292,07
A2	503	-105155,78	247065,45	53981,51	-32785,83
B1	250	-127767	196646,54	-34566,17	25755,53
B2	21	-235338,18	56856,26	36715,81	38902,63

O peso total em aço da torre foi estimado em aproximadamente **10.1 toneladas**, considerando os dados de perfis e comprimentos extraídos do modelo no SAP2000. Este valor contempla as barras principais e inclui uma estimativa para as barras redundantes não listados na tabela de dimensionamento.

Fonte: Autor.

4.3 DIMENSIONAMENTO COM O PROGRAMA TORRES NBR 17184:2024

A partir dos esforços obtidos na seção anterior, procedeu-se ao dimensionamento das barras mais solicitadas da torre por meio do programa implementado em *Python*, desenvolvido previamente no tópico 4.1.4. O foco deste tópico está na análise dos resultados obtidos, verificação do desempenho estrutural da torre segundo a norma NBR 17184 (ABNT, 2024) e avaliação da efetividade da automação do processo de verificação normativa.

O programa operou utilizando o catálogo de perfis cantoneira de abas iguais milimétricas da Gerdau, considerando os estados-limites de tração, compressão e flexo-compressão simples. O aço adotado para as verificações foi o ASTM A572 g50, com tensão de escoamento igual a 350 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa. Inicialmente, foram testados os perfis definidos com base em uma pré-estimativa sem muito critério, a ideia era verificar se o programa conseguia captar e lidar com barras que obviamente não atenderiam os esforços solicitantes. Os resultados dessas primeiras verificações são apresentados na Tabela 4.2.

Conforme previsto, as barras B06, B08, B09, B11, B12, B13, B22 e B23 foram reprovadas na verificação inicial, apresentando taxas de utilização consideravelmente elevadas, o que indica a necessidade de revisão dos perfis para atendimento à norma. Em contrapartida, as barras B15, B17 e B20 demonstraram desempenho muito superior ao necessário, com sobredimensionamento evidente. Apesar de aprovadas, suas taxas de utilização ficaram muito abaixo do ideal, indicando um superdimensionamento da estrutura.

Diante desses resultados, foi realizada o dimensionamento automático usando o programa desenvolvido no estudo, o qual selecionou, dentre os perfis disponíveis no catálogo, o mais eficiente que ainda atendesse às exigências normativas. Os novos resultados são apresentados na Tabela 4.3 e a Figura 4.11 apresenta um é o relatório completo extraído direto do programa.

Tabela 4.2 – Verificação inicial das barras.

Barra	Perfil	Tipo de Solicitação	Status	Taxa de Utilização (%)
B01	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	27,49
B02	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	81,1
B03	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	33,65
B04	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	91,88
B05	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	85,33
B06	L60X60X4	Flexo Compressão	REPROVADO	181,9
B07	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	63,64
B08	L60X60X4	Flexo Compressão	REPROVADO	108,61
B09	L60X60X4	Flexo Compressão	REPROVADO	320,01
B10	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	65,7
B11	L60X60X4	Flexo Compressão	REPROVADO	184,72
B12	L60X60X4	Flexo Compressão	REPROVADO	115,53
B13	L60X60X4	Flexo Tração	REPROVADO	223,51
B14	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	71,24
B15	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	19,42
B16	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	44,46
B17	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	11,79
B18	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	33,78
B19	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	27,06
B20	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	10,41
B21	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	62,13
B22	L60X60X4	Flexo Compressão	REPROVADO	319,63
B23	L60X60X4	Flexo Tração	REPROVADO	301,03
B24	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	96,44
B25	L60X60X4	Flexo Tração	APROVADO	96,44

Fonte: Autor.

Tabela 4.3 – Resultados do dimensionamento.

Barra	Perfil	Tipo de Solicitação	Status	Taxa de Utilização (%)
B01	L40X40X3	Flexo Tração	APROVADO	61,11
B02	L50X50X4	Flexo Tração	APROVADO	99,81
B03	L40X40X3	Flexo Tração	APROVADO	78,14
B04	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	91,88
B05	L50X50X6	Flexo Compressão	APROVADO	96,41
B06	L75X75X6	Flexo Compressão	APROVADO	79,4
B07	L45X45X4	Flexo Tração	APROVADO	88,91
B08	L65X65X4	Flexo Compressão	APROVADO	97,2
B09	L80X80X8	Flexo Compressão	APROVADO	85,22
B10	L50X50X5	Flexo Compressão	APROVADO	94,18
B11	L75X75X6	Flexo Compressão	APROVADO	85,11
B12	L65X65X4	Flexo Compressão	APROVADO	93,43

continua

continuação

B13	L75X75X7	Flexo Tração	APROVADO	98,82
B14	L50X50X5	Flexo Tração	APROVADO	84,51
B15	L40X40X3	Flexo Tração	APROVADO	44,83
B16	L50X50X3	Flexo Compressão	APROVADO	99,41
B17	L40X40X3	Flexo Tração	APROVADO	27,09
B18	L50X50X3	Flexo Compressão	APROVADO	75,85
B19	L45X45X3	Flexo Compressão	APROVADO	83,09
B20	L50X50X3	Flexo Tração	APROVADO	18,4
B21	L50X50X5	Flexo Compressão	APROVADO	88,2
B22	L90X90X7	Flexo Compressão	APROVADO	97,1
B23	L90X90X8	Flexo Tração	APROVADO	89,67
B24	L60X60X4	Flexo Compressão	APROVADO	96,44

Fonte: Autor.

O novo dimensionamento permitiu alcançar um melhor equilíbrio estrutural, reduzindo o uso de perfis robustos e garantindo segurança para os elementos solicitados. As barras inicialmente reprovadas foram todas adequadamente dimensionadas com novos perfis, respeitando os limites de esbeltez, resistência à tração, compressão e flexo-compressão simples.

A estrutura estudada apresentou comportamento global satisfatório, dentro dos padrões normativos. Isso se justifica também pelas características moderadas do projeto: uma torre de suspensão, instalada em região de planície, com baixa severidade de vento e clima relativamente estável. Em cenários mais exigentes, como regiões de alta altitude ou áreas litorâneas com velocidades básicas de vento superiores a 45 m/s (ABNT, 6123, 2023) haveria a necessidade de perfis mais robustos. Além disso, estruturas de ancoragem, por suportarem esforços horizontais mais intensos, exigiriam atenção redobrada quanto à instabilidade global e local das barras, como já destacado em estudos (Argenta, 2007; Tessari, 2016).

Do ponto de vista computacional, o programa demonstrou pleno funcionamento. A leitura dos esforços extraídos do SAP2000 foi realizada com sucesso, e as rotinas de verificação e otimização, com base nos critérios da NBR 17184 (ABNT, 2024), operaram de forma automatizada. Logo, o uso da inteligência artificial (Claude) mostrou-se relevante para o desenvolvimento de blocos repetitivos e verificação algorítmica da norma, corroborando estudos como os de Sá (2024) e Sarsa *et al.* (2022), que destacam o potencial dos LLMs em tarefas estruturadas de engenharia.

Por outro lado, é fundamental destacar as limitações do uso de modelos de linguagem (LLMs) sem a devida supervisão técnica, conforme alertado por Murr *et al.* (2023) e Nascimento *et al.* (2024). Ainda que esses modelos sejam capazes de gerar códigos precisos e

funcionais, o processo até se atingir uma versão confiável geralmente exige diversas correções e ajustes. O que requer do executor atenção para identificar falhas conceituais, validar os resultados e realizar intervenções pontuais de forma eficaz.

Figura 4.11 – Relatório extraído do programa desenvolvido.

```
=====
RELATÓRIO COMPLETO DE DIMENSIONAMENTO
TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
=====

Projeto: TCC 2 - Bruno
Data/Hora: 20/07/2025 19:19:28
Material: ASTM A572 G50
Tipo de Torre: SUSPENSÃO

RESUMO ESTATÍSTICO
Total de barras analisadas: 25
Barras aprovadas: 25
Barras reprovadas: 0
Taxa de aprovação: 100,0%
Taxa de utilização média: 81,9%

RESULTADOS POR BARRA

Barra      Perfil      Tipo      Status      Taxa %      Observações
B01        L40X40X3    Flexo-tração  APROVADO    61,1        OK
B02        L50X50X4    Flexo-tração  APROVADO    99,8        OK
B03        L40X40X3    Flexo-tração  APROVADO    78,1        OK
B04        L60X60X4    Flexo-compressão APROVADO    91,9        OK
B05        L50X50X6    Flexo-compressão APROVADO    96,4        OK
B06        L75X75X6    Flexo-compressão APROVADO    79,4        OK
B07        L45X45X4    Flexo-tração  APROVADO    88,9        OK
B08        L65X65X4    Flexo-compressão APROVADO    97,2        OK
B09        L80X80X8    Flexo-compressão APROVADO    85,2        OK
B10        L50X50X5    Flexo-compressão APROVADO    94,2        OK
B11        L75X75X6    Flexo-compressão APROVADO    85,1        OK
B12        L65X65X4    Flexo-compressão APROVADO    93,4        OK
B13        L75X75X7    Flexo-tração  APROVADO    98,8        OK
B14        L50X50X5    Flexo-tração  APROVADO    84,5        OK
B15        L40X40X3    Flexo-tração  APROVADO    44,8        OK
B16        L50X50X3    Flexo-compressão APROVADO    99,4        OK
B17        L40X40X3    Flexo-tração  APROVADO    27,1        OK
B18        L50X50X3    Flexo-compressão APROVADO    75,8        OK
B19        L45X45X3    Flexo-compressão APROVADO    83,1        OK
B20        L50X50X3    Flexo-tração  APROVADO    18,4        OK
B21        L50X50X5    Flexo-compressão APROVADO    88,2        OK
B22        L90X90X7    Flexo-compressão APROVADO    97,1        OK
B23        L90X90X8    Flexo-tração  APROVADO    89,7        OK
B24        L60X60X4    Flexo-compressão APROVADO    96,4        OK
B25        L50X50X5    Flexo-tração  APROVADO    88,0        OK

RECOMENDAÇÕES
• 10 barras com alta taxa de utilização (>90%)
• Avaliar otimização dos perfis para economia
• Todos os perfis foram aprovados
• Verificar possibilidade de otimização para redução de peso

=====
FIM DO RELATÓRIO COMPLETO
=====
```

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como propósito analisar estruturalmente uma torre treliçada do tipo delta, modelada no software SAP2000 segundo os critérios da ABNT NBR 5422:2024, e desenvolver um programa em Python para o dimensionamento das barras tipo cantoneira, com base na ABNT NBR 17184:2024. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade da metodologia adotada, tanto no que diz respeito à fidelidade da modelagem e análise estrutural, quanto à eficiência do uso de inteligência artificial no apoio à programação.

A análise estrutural realizada permite uma representação consistente do comportamento da torre sob diferentes hipóteses de carregamento normativo, incluindo a ação do vento, peso próprio e a ruptura de cabos. A aplicação do SAP2000 se mostra adequada ao objetivo proposto, desde que a discretização do modelo esteja adequada para simular seu comportamento real, oferecendo recursos valiosos para a avaliação dos esforços solicitantes nas barras, e a sua deformação conforme os parâmetros exigidos pelas normas técnicas vigentes.

O desenvolvimento do programa em Python, com o apoio de uma inteligência artificial, apresenta resultados coerentes e automatiza o processo de verificação das barras de forma eficaz. A utilização de inteligência artificial neste contexto se revela promissora, desde que acompanhada de análise técnica criteriosa. O desempenho da ferramenta Claude, na geração e interpretação de trechos de código estruturado, contribui significativamente para a produtividade, sem comprometer a confiabilidade dos resultados.

Os objetivos específicos definidos no início deste trabalho são plenamente atendidos: a fundamentação teórica é consolidada por meio de autores clássicos e atuais; a modelagem estrutural é executada com rigor técnico; e a implementação computacional alcança os critérios de precisão, clareza e aplicabilidade prática. Além disso, o trabalho evidencia o potencial das LLMs como aliadas no ambiente da engenharia estrutural, não como substitutas do engenheiro, mas como ferramentas complementares que ampliam sua capacidade de análise e desenvolvimento.

Conclui-se, portanto, que a integração entre modelagem estrutural conforme as normas técnicas brasileiras e o uso de tecnologias baseadas em inteligência artificial representa um caminho viável e produtivo para o avanço de soluções em engenharia. Como continuidade, recomenda-se a ampliação deste estudo para outros tipos de torres e a incorporação de rotinas de otimização estrutural, com vistas ao aprimoramento da eficiência e do desempenho dos projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422: projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.** Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: ações e segurança nas estruturas – procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8842: suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Resistência ao carregamento.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8850: execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7007: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural.** Rio de Janeiro, 2016.

GONTIJO, C. de P. **Contribuições para a análise de estruturas de torres de transmissão.** 1994. 150 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1994.

KAMINSKI Jr., J. **Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

MENDES, V. R. V. **Verificação estrutural de uma torre de suspensão treliçada conforme os critérios da norma IEC 60826.** 2020. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

ALVES, T. A. **Análise do efeito de ventos extremos sobre a estrutura de torres de transmissão por meio de simulação com o auxílio da ferramenta SAP2000.** 2015. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

ARGENTA, M. A. **Análise de torres de transmissão submetidas a cargas dinâmicas.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

TESSARI, R. K. **Projeto Baseado em Desempenho de torres metálicas sujeitas à ação do vento**. 2016. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

TORRES, F. C. **Análise estrutural e dimensionamento de um suporte de linhas de transmissão autoportantes**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, 2021.

BRAGA, P. H. R. M. **Otimização de torres autoportantes de aço para linhas de transmissão utilizando algoritmos genéticos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

OLIVEIRA, M. I. R. **Análise Estrutural de Torres de Transmissão de Energia Submetidas aos Efeitos Dinâmicos Induzidos pelo Vento**. Rio de Janeiro, 2006. 150p. (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

NAGEL, G. **Otimização dimensional, geométrica e topológica de torres de linhas de transmissão do tipo delta**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

KIRINUS, Diego Armando. **Uso de tecnologia BIM para o detalhamento de estruturas: um estudo de caso**. 2024. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2024.

RODRIGUES, J. P. P. **BIM no projeto e construção de estruturas metálicas: estabelecimento de manual de implementação e execução**. 2016. 119 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, 2016.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992.

ENGETOWER. **Vão gravante x vão médio**. Disponível em: <https://engetower.com.br/vao-gravante-x-vao-medio/#single-post-content>. Acesso em: 16 fev. 2024

ALBERMANI, F.; KITIPORNCHAI, S.; CHAN, R. W. K. **Failure analysis of transmission towers**. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, p. 1922–1928, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.10.001>.

RAO, R. N.; RAO, D. S.; KISHORE, P. V. V. **Failure of transmission line tower—a case study**. *Engineering Failure Analysis*, v. 17, n. 3, p. 891–896, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.01.008>.

RAO, R. N. et al. **Prediction of collapse load of transmission towers using nonlinear analysis**. *Engineering Structures*, v. 34, p. 400–407, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.017>.

MURR, L.; GRAINGER, M.; GAO, D. **Testing LLMs on code generation with varying levels of prompt specificity.** arXiv preprint arXiv:2311.07599, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.07599>.

NASCIMENTO, N. et al. **LLM4DS: Evaluating large language models for data science code generation.** arXiv preprint arXiv:2411.11908, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.11908>.

SARSA, S. et al. **Automatic generation of programming exercises and code explanations with large language models.** Proceedings of the 2022 ACM Conference on International Computing Education Research V.1, p. 27–39, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3501385.3543959>.

LUTZ, Mark. **Learning Python.** 5. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2013.

JIANG, Zhengyuan et al. **How Good Are Commercial APIs for Code Generation? An Empirical Study.** In: ACM JOINT EUROPEAN SOFTWARE ENGINEERING CONFERENCE AND SYMPOSIUM ON THE FOUNDATIONS OF SOFTWARE ENGINEERING (ESEC/FSE), 32., 2024, Porto de Galinhas. Proceedings... New York: Association for Computing Machinery, 2024.

HEATHCOTE, J. A. **The role of engineering failure analysis in the context of the law and public safety: a personal view.** *Engineering Failure Analysis*, v. 8, p. 185–190, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(00\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(00)00028-9).

BOMMASANI, R. et al. **On the opportunities and risks of foundation models.** Stanford: Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2108.07258>. Acesso em: 26 jul. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Relatório Anual 2022: Coordenação e controle da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).** Rio de Janeiro: ONS, 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/relatorio_anual/index2022.html. Acesso em: 23 ago. 2025.

OLIVEIRA, L. M. de. **Análise estática e dinâmica de uma torre autoportante de linha de transmissão.** 2017. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BRAMETAL. **Infraestrutura de Transmissões Elétricas: Torres e estruturas metálicas em aço galvanizado.** 2021.

CARVALHO, M. L. **Análise de fadiga em torres autoportantes de telecomunicações utilizando o método dos elementos finitos e monitoramento em tempo real.** 2015. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OGATA, M. W. **Otimização estrutural de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

OLIVEIRA, A. A. O. TorresNBR17184: **programa em Python para análise de torres metálicas**. Disponível em: <https://github.com/brunoalmiro-code/TorresNBR17184>. Acesso em: 24 ago. 2025.

APÊNDICE A – TABELAS DE AÇÕES DE PROJETO

Tabela A. 1 - Pressão Dinâmica de Vento.

10m							30s		3s	
VR	K _{tur}	V _p	μ	t	alt	q ₀ (Pa)	V _{p30s}	q ₀ (Pa)	V _{p3s}	q ₀ (Pa)
21,28	1,16	24,68	1,17	22	218	355	30,12	529	34,63	699

Tabela A. 2 - Ação do Vento nos Cabos (10 min, 45°)

condutor							
q ₀ (Pa)	C _x	G _c	G _l	d (m)	L (m)	Ω (rad)	ACV-O10 (N)
355	1	2,436558	0,897476	0,02678	580	0,785398	6028,88
Para-raios							
q ₀ (Pa)	C _x	G _c	G _l	d (m)	L (m)	Ω (rad)	ACV-O10 (N)
355	1,2	2,451199	0,897476	0,0141	580	0,785398	3832,02

Tabela A. 3

AÇÃO DO VENTO NOS CABOS (vento de 3 s para projeto a 45°)					
condutor					
q0 (Pa)	Cx	Gl3s	d (m)	L (m)	ACV-O03 (N)
699	1	1	0,02678	580	10857,15
Para-raios					
q0 (Pa)	Cx	Gl3s	d (m)	L (m)	ACV-O03 (N)
699	1,2	1	0,0141	580	6859,71

Tabela A. 4

Força exercida sobre os cabos pelo vento de 10 min para projeto a 0°							
condutor							
q ₀ (Pa)	C _x	G _c	G _l	d (m)	L (m)	Ω (rad)	ACV-L10 (N)
355	1	2,436558	0,897476	0,02678	580	0	0
Para-raios							
q ₀ (Pa)	C _x	G _c	G _l	d (m)	L (m)	Ω (rad)	ACV-L10 (N)
355	1,2	2,451199	0,897476	0,0141	580	0	0

Tabela A. 5

Força exercida sobre os cabos pelo vento de 3 s para projeto a 0°					
condutor					
q0 (Pa)	Cx	Gl3s	d (m)	L (m)	ACV-L03 (N)
699	1	1	0,02678	580	10857,15
Para-raios					
q0 (Pa)	Cx	Gl3s	d (m)	L (m)	ACV-L03 (N)
699	1,2	1	0,0141	580	6859,76

Tabela A. 6

Força exercida sobre os cabos pelo vento de 10 min para projeto a 90°							
condutor							
q0 (Pa)	Cx	Gc	Gl	d (m)	L (m)	Ω (rad)	ACV-T10 (N)
355	1	2,436558	0,897476	0,02678	580	1,570796	12057,76
Para-raios							
q0 (Pa)	Cx	Gc	Gl	d (m)	L (m)	Ω (rad)	ACV-T10 (N)
355	1,2	2,451199	0,897476	0,0141	580	1,570796	7664,05

Tabela A. 7

Força exercida sobre os cabos pelo vento de 3 s para projeto a 90°					
condutor					
q0 (Pa)	Cx	Gl3s	d (m)	L (m)	ACV-T03 (N)
699	1	1	0,02678	580	10857,15
Para-raios					
q0 (Pa)	Cx	Gl3s	d (m)	L (m)	ACV-T03 (N)
699	1,2	1	0,0141	580	6859,71

Tabela A. 8

Ação do vento sobre cadeias de isoladores para ventos de 10min										
Cadeia I					Trasversal AIV - T10 (N)		Oblíquo AIV - O10 (N)		Longitudinal AIV - L10 (N)	
q0 (Pa)	Cx	Gt	Si	AIV (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)
355,00	1,20	2,55	1,68	1826,42	0,00	913,21	645,74	645,74	913,21	0,00
Cadeia V					Trasversal AIV - T10 (N)		Oblíquo AIV - O10 (N)		Longitudinal AIV - L10 (N)	
q0 (Pa)	Cx	Gt	Si	Ai (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)
355,00	1,20	2,55	3,37	3663,70	0,00	1831,85	1295,31	1295,31	1831,85	0,00

Tabela A. 9

Ação do vento sobre cadeias de isoladores para ventos de 3 s										
Cadeia I					Trasversal AIV - T3S (N)		Oblíquo AIV - O3S (N)		Longitudinal AIV - L3S (N)	
q0 (Pa)	Cx	Gt	Si	Ai (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)
699,00	1,20	1,94	1,68	2728,18	0,00	1364,09	964,56	964,56	1364,09	0,00

Cadeia V					Trasversal AIV - T3S (N)		Oblíquo AIV - O3S (N)		Longitudinal AIV - L3S (N)	
q0 (Pa)	Cx	Gt	Si	Ai (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)	Aiy (N)	Aix (N)
699,00	1,20	1,94	3,37	5472,60	0,00	2736,30	1934,86	1934,86	2736,30	0,00

Tabela A. 10

Peso próprio dos cabos			
Condutor com Isolador Cadeia V			
Vao gravante adotado	Peso linear (N/m)	Isolador CV (N)	PPc (N)
580	11,54	5297,40	11990,60

Condutor com Isolador Cadeia I			
Vao gravante adotado	Peso linear (N/m)	Isolador CI (N)	PPc (N)
580	11,54	2992,05	9685,25

Para-Raios			
Vao gravante adotado	Peso linear (N/m)	Isolador (N)	PPr (N)
580	5,96	0	3459,40

Tabela A. 11

Tração Nos Cabos				
Condutor				
Vao gravante adotado	Peso linear (N/m)	Flecha (m)	To (N)	THC (N)
580	11,54	20	24262,85	16984,00

Para-Raios				
Vao gravante adotado	Peso linear (N/m)	Flecha (m)	To (N)	THR (H)
580	5,96448	20	12540,3192	12540,32

Cargas de vento sobre a torre

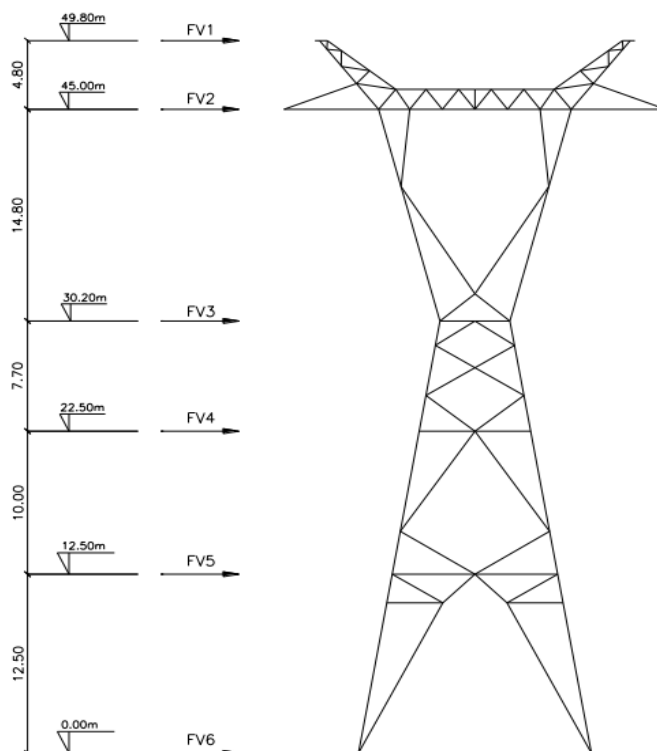


Tabela A. 12

NIVEL	H (m)	ABA (mm)	TRANSVERSAL - COMPR. (m)	TRANSVERSAL - AREA (m²)	LONGITUDINAL - COMPR. (m)	LONGITUDINAL - AREA (m²)
1	49,8	40	13,44	0,537	17,08	0,683
1	49,8	45	3,27	0,147	11,37	0,512
1	49,8	50	8,83	0,442	11,12	0,556
1	49,8	60	11,36	0,681	9,05	0,543
1	49,8	65	5,82	0,379	13,58	0,883
1	49,8	75	3,6	0,27	23,7	1,778
1	49,8	90	1,8	0,162	39,13	3,522
Total 1				2,618		8,477
2	45	40	10,78	0,431	26,4	1,056
2	45	45	0	0	10,29	0,463
2	45	50	32,13	1,606	12,07	0,604
2	45	60	53,3	3,198	10,15	0,609
2	45	65	3,48	0,226	0	0
2	45	75	0	0	5,89	0,442
2	45	90	21,63	1,947	22,04	1,983
2	45	100	33,85	3,385	41,72	4,172

continua

continuação.

Total 2				10,793		9,329
3	30,2	40	20,21	0,808	14,24	0,57
3	30,2	45	3,16	0,142	10,28	0,462
3	30,2	50	3,63	0,182	14,58	0,729
3	30,2	60	5,55	0,333	0	0
3	30,2	65	23,47	1,525	0	0
3	30,2	90	0	0	27,59	2,483
3	30,2	100	15,54	1,554	15,63	1,563
Total 3				4,544		5,807
4	22,5	40	16,08	0,643	13,48	0,539
4	22,5	45	11,97	0,538	5,92	0,266
4	22,5	50	19,06	0,953	20,12	1,006
4	22,5	60	18,98	1,139	17,34	1,04
4	22,5	65	13,98	0,908	0	0
4	22,5	75	0	0	10,65	0,799
4	22,5	90			27,4	2,466
4	22,5	100	20,18	2,018	20,3	2,03
Total 4				6,199		8,146
5	12,5	40	20,1	0,804	17,84	0,714
5	12,5	45	28,11	1,265	16,43	0,739
5	12,5	50	29,63	1,481	45,63	2,281
5	12,5	60	0	0	11,36	0,682
5	12,5	65	22,61	1,47	0	0
5	12,5	75	0	0	23,63	1,772
5	12,5	100	25,22	2,522	25,37	2,537
Total 5				7,542		8,725
6	0	0	0	0	0	0

Tabela A. 13[illegible]

Tabela A. 14

3s							
NIVEL H (m)	Cxt 90°	Cxt 0°	Gt	At (0°)	At (45°)	At (90°)	
1,00	49,80	2,45	2,55	1,00	4485,48	11747,11	15093,03
2,00	45,00	2,19	3,57	1,00	16554,66	23905,70	23288,17
3,00	30,20	3,28	3,29	1,00	10430,08	14264,72	13344,45
4,00	22,50	3,50	3,48	1,00	15144,87	20991,43	19840,84
5,00	12,50	3,65	3,71	1,00	19264,68	25121,06	22603,75
6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A. 15

VENTO TRANSVERSAL (10 min)				
PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)
FV1	49,8		2251,436	2251,436
AC5	46,86	5810,158		
FV2S	45		3558,722	
FV2I	45		9410,819	
FV2	45			12969,54
AC4	36,8	21103,05		
FV3S	30,2		11692,23	
FV3I	30,2		5683,115	
FV3	30,2			17375,34
AC3	26,05	12326,76		
FV4S	22,5		6643,641	
FV4I	22,5		7875,572	
FV2	22,5			14519,21
AC2	17,16	16900,37		
FV5S	12,5		9024,797	
FV5I	12,5		9204,851	
FV5	12,5			18229,65
AC1	5,9	19501,8		
FV6	0	0	10296,95	10296,95

VENTO TRANSVERSAL (3 s)				
PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)
FV1	49,8		1738,125	1738,125
AC5	46,86	4485,485		
FV2S	45		2747,359	
FV2I	45		7382,484	
FV2	45			10129,84
AC4	36,8	16554,66		
FV3S	30,2		9172,178	
FV3I	30,2		4808,675	
FV3	30,2			13980,85
AC3	26,05	10430,08		
FV4S	22,5		5621,409	
FV4I	22,5		7057,509	
FV2	22,5			12678,92
AC2	17,16	15144,87		
FV5S	12,5		8087,36	
FV5I	12,5		9092,93	
FV5	12,5			17180,29
AC1	5,9	19264,68		
FV6	0	0	10171,75	10171,75

Tabela A. 16

VENTO OBLIQUO (10 min)					VENTO OBLIQUO (3 s)				
PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)	PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)
FV1	49,80		5896,32	5896,32	FV1	49,80		4552,00	4552,00
AC5	46,86	15216,31			AC5	46,86	11747,11		
FV2S	45,00		9319,99		FV2S	45,00		7195,10	
FV2I	45,00		13589,66		FV2I	45,00		10660,65	
FV2	45,00			22909,65	FV2	45,00			17855,75
AC4	36,80	30473,78			AC4	36,80	23905,70		
FV3S	30,20		16884,12		FV3S	30,20		13245,05	
FV3I	30,20		7772,52		FV3I	30,20		6576,59	
FV3	30,20			24656,64	FV3	30,20			19821,64
AC3	26,05	16858,71			AC3	26,05	14264,72		
FV4S	22,50		9086,19		FV4S	22,50		7688,13	
FV4I	22,50		10915,87		FV4I	22,50		9782,00	
FV2	22,50			20002,06	FV2	22,50			17470,13
AC2	17,16	23424,62			AC2	17,16	20991,43		
FV5S	12,50		12508,75		FV5S	12,50		11209,42	
FV5I	12,50		12003,08		FV5I	12,50		11857,14	
FV5	12,50			24511,83	FV5	12,50			23066,56
AC1	5,90	25430,26			AC1	5,90	25121,06		
FV6	0,00	0,00	13427,18	13427,18	FV6	0,00	0,00	13263,92	13263,92

Tabela A. 17

VENTO LOGITUDINAL (10 min)					VENTO LOGITUDINAL (3 s)				
PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)	PONTO	H(m)	At (N)	FVinT (N)	FV (N)
FV1	49,80		7575,77	7575,77	FV1	49,80		5848,55	5848,55
AC5	46,86	19550,37			AC5	46,86	15093,03		
FV2S	45,00		11974,60		FV2S	45,00		9244,48	
FV2I	45,00		13238,61		FV2I	45,00		10385,26	
FV2	45,00			25213,21	FV2	45,00			19629,74
AC4	36,80	29686,59			AC4	36,80	23288,17		
FV3S	30,20		16447,97		FV3S	30,20		12902,90	
FV3I	30,20		7271,09		FV3I	30,20		6152,31	19055,22
FV3	30,20			23719,06	FV3	30,20			
AC3	26,05	15771,09			AC3	26,05	13344,45		
FV4S	22,50		8500,00		FV4S	22,50		7192,14	
FV4I	22,50		10317,55		FV4I	22,50		9245,83	16437,97
FV2	22,50			18817,56	FV2	22,50			
AC2	17,16	22140,67			AC2	17,16	19840,84		
FV5S	12,50		11823,12		FV5S	12,50		10595,01	
FV5I	12,50		10800,29		FV5I	12,50		10668,97	
FV5	12,50			22623,41	FV5	12,50			21263,98
AC1	5,90	22881,97			AC1	5,90	22603,75		
FV6	0,00	0,00	12081,68	12081,68	FV6	0,00	0,00	11934,78	11934,78