

FABIANO DIAS DA SILVA

**Implementação de uma Planilha Excel Destinada a Análise de Estabilidade de Torres de
Transmissão de Energia**

Guaratinguetá – SP
2018

Fabiano Dias da Silva

Implementação de uma Planilha Excel Destinada a Análise de Estabilidade de Torres de Transmissão de Energia

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

Orientador: Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá – SP
2018

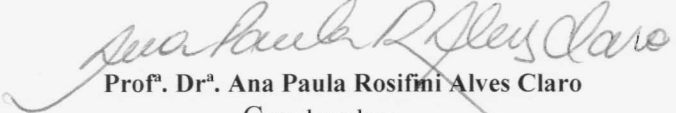
S586i	<p>Silva, Fabiano Dias da</p> <p>Implementação de uma planilha excel destinada à análise de estabilidade de torres de transmissão de energia / Fabiano Dias da Silva – Guaratinguetá, 2018.</p> <p>193 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 129-133</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva</p> <p>1. Energia - Transmissão. 2. Análise de elementos finitos. 3. Planilhas eletrônicas. I. Título.</p> <p>CDU 621.315(043)</p>
-------	--

FABIANO DIAS DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.^a. Dr.^a. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
UNESP/FEG


Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO
UNIFATEA

Dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES

FABIANO DIAS DA SILVA

NASCIMENTO 17.10.1978 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO Valdemar Lima da Silva
Rosilda Pereira Dias

1997/2002 Curso de Graduação – Engenharia Civil
Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP/FEG

2008/2009 Curso de Pós-Graduação – Especialização em Cálculo Estrutural
Universidade de São Paulo – USP / POLI / PECE

2013/2013 Curso de Pós-Graduação – Especialização em Georreferenciamento de Imóveis
Faculdade de Agrimensura de Pirassununga

Aos meus pais, irmãos, minha filha e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Valdemar Lima da Silva e Rosilda Pereira Dias* sempre incentivaram meus estudos.

à minha filha *Louise Mara Sampaio Dias*.

aos meus companheiros de trabalho *Eliane Moreira da Silva Araujo e Gustavo Mauro Baldim*.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Porque, onde estiver o teu tesouro, aí também estará o teu coração.”

(Matheus 6:21)

RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é a análise de estabilidade global de torres metálicas treliçadas de transmissão de energia utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Todo estudo foi baseado nas normativas da NBR-8800/2007 em que sugere-se uma análise de deslocabilidade da estrutura por meio dos parâmetros B_2 e conseqüentemente a aplicação do MAES (método de amplificação de esforços), processo simplificado para análise dos efeitos globais de segunda ordem. Abordou-se o sistema elétrico brasileiro, descrição bem detalhada sobre tipos e modelos de torres, acidentes envolvendo torres de transmissão, treliças espaciais, método de análise estrutural, MEF, análise de estabilidade de estruturas, MAES e abordagem atualizada sobre o estado da arte em diversas universidades do mundo, em especial da China e Canadá, em que a grande preocupação é como simular nos projetos de torres de transmissão sobre efeitos climáticos como terremotos, tornados e furações por meio de modelos reduzidos em laboratório. Visando oferecer uma contribuição científica para o setor, desenvolveu-se uma planilha eletrônica no software Excel, devido a sua facilidade de utilização, acesso e capacidade de resolver cálculos matriciais facilitando a aplicação do MEF. A mesma foi validada com um software específico e consagrado na área de MEF, o SAP2000 e um software comercial de dimensionamento de estruturas metálicas usado em vários escritórios de projeto e consultoria estrutural, o METÁLICA 3D. A planilha contempla pré-dimensionamentos de cabos condutores e para-raios, visualização do modelo 3D, concepção estrutural, análise estrutural por meio de cálculo matricial, análise de deslocabilidade, aplicação dos efeitos de segunda ordem utilizando o MAES e pré dimensionamento das barras segundo NBR8800/2007. A verdadeira contribuição se dá pelo fato de vários softwares educacionais freeware não analisarem a estabilidade da estrutura e nem fazerem simulações de modo a obter uma estrutura economicamente estável, além de poder simular a torre em qualquer região do país, com diferentes tipos de materiais e simular o efeito de cabos rompendo.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Estabilidade Global; Torres de Transmissão; Método dos Elementos Finitos, Treliças Espaciais.

ABSTRACT

The main objective of this project is the analysis of the global stability of the lattice towers of energy transmission using the FEM (finite element method). The whole study was based on NBR-8800/2007, normative where suggest a displaceability's analysis of the structures thought the B2 parameters and consequently the application of MAES' method, a simplified procedure for the analysis of second-order's global effects. In this project was approached the Brazilian electric system, a detail description of types and model of towers, accident involving transmission towers, space trusses, structural analysis' method, FEM, structure stability analysis, MAES' method. Also in this project, an updated approach the increase knowledge at this area in several universities all around the world, in special China and Canada, where the major concern is how to simulate at The transmission tower's project some climate effects such as earthquakes, tornadoes and hurricanes through reduced laboratory models. In order to offer a scientific contribution to this sector, a spreadsheet was developed in Excel software due to it facility of use, access and ability to solve matrix calculations, which facilitates the use of FEM. The same one was valid with a specific and consecrated software in the FEM area: The SAP2000; and commercial metal structural design software used in various design and structural consulting offices: the METÁLICA 3D. The spreadsheet contemplates pre-dimensioning of conductor cables and lightning rods, visualization of the 3D model, structural design, structural analysis through matrix calculations, displacement analysis, application of second order effects using MAES and dimensioning of towers according to NBR8800/2007. The real contribution was made by the fact that several freeware educational software do not analyze the stability of the structure nor make simulations in order to obtain an economically stable structure, besides being able to simulate the tower in any region of the country with different types of materials and to simulate the effect of breaking cables.

KEYWORDS: Global stability analysis; Transmission towers; Finite element method; Space trusses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Protótipo da linha de transmissão e protótipo da torre estaiada.....	21
Figura 2 – Modelo idealizado para construção do protótipo.	22
Figura 3 – Protótipos das torres.....	23
Figura 4 – Layout torres estaiadas.....	24
Figura 5 – Layout torres autoportante.	24
Figura 6 – (A) Esboço esquemático da torre com sensores de aceleração; (B) Modelo em escala reduzida com sensores de aceleração.....	26
Figura 7 – Torre reforçada (A) e região com ruína por flambagem (B).....	27
Figura 8 – Gerenciamento do sistema de geração, transmissão e distribuição.....	30
Figura 9 – Linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro.	32
Figura 10 – Tipos de torres de transmissão.	33
Figura 11 – Torre metálica treliçada do tipo estaiada.	34
Figura 12 – Torre metálica treliçada do tipo autoportante.	35
Figura 13 – Torre treliçada de madeira tipo autoportante.	36
Figura 14 – Torre de concreto armado tipo autoportante.	36
Figura 15 – Torre metálica.	37
Figura 16 – Elementos das torres de transmissão de energia.	38
Figura 17 – Principais elementos das linhas de transmissão.	38
Figura 18 – Condutor de alumínio – tipo ACAR	39
Figura 19 – Isoladores e acessórios.	40
Figura 20 – Torres retorcidas e deformadas após a chuva e consequências.....	41
Figura 21 – Estruturas caídas sobre a BR-262.	41
Figura 22 – Torre retorcida e deformada em Santa Helena de Goiás.....	42
Figura 23 – Torre caída na projeção horizontal sob análise dos técnicos da COPEL.....	42
Figura 24 – Vista aérea do local atingido.	43
Figura 25 – Treliça com descrição das peças.	43
Figura 26 – União soldada e união parafusada.....	44
Figura 27 – Galpão executado com treliça espacial.	45
Figura 28 – Articulações de treliças espaciais.....	45
Figura 29 – Elemento discretizado.	49
Figura 30 – Equilíbrio estável em relação ao equilíbrio instável.	50
Figura 31 – Estrutura deformada / não deformada em relação ao vento adotado.	50

Figura 32 – Efeito de 2ª ordem global P- Δ (A) e efeito de 2ª ordem local P- δ (B).....	51
Figura 33 – Fases de um projeto de engenharia de estruturas típico.....	54
Figura 34 – Soluções em análise estrutural.....	56
Figura 35 – Estrutura treliçada.....	57
Figura 36 – Elemento barra no sistema de coordenadas globais.....	57
Figura 37 – Elemento barra em um sistema de coordenadas global 3D.....	60
Figura 38 – Classificação da pesquisa adotada no projeto.....	62
Figura 39 – Tela principal do projeto de pesquisa.....	64
Figura 40 – <i>Input</i> de dados para dimensionamento.....	66
Figura 41 – Cargas de vento.....	67
Figura 42 – Cargas nos cabos.....	68
Figura 43 – Esboço 3D torre.....	69
Figura 44 – Campo de inserção de dados.....	70
Figura 45 – Seções das barras tipo cantoneira.....	70
Figura 46 – Descrição das barras.....	71
Figura 47 – Incidência de ventos nos nós.....	72
Figura 48 – Tela de <i>output</i> modelo 3D.....	72
Figura 49 – Ações agindo na estrutura.....	73
Figura 50 – Tela hipóteses de carregamento.....	74
Figura 51 – Tela “CALCULAR HIPÓTESES” – efeito 1ª ordem.....	75
Figura 52 – Tela de escolha para análise dos descolamentos.....	76
Figura 53 – Tela de ponderações e redução de ações.....	77
Figura 54 – Tela de escolha para análise dos deslocamentos.....	78
Figura 55 – Tela de escolha para análise dos deslocamentos.....	78
Figura 56 – Efeito de 2ª ordem – <i>nt</i> – <i>no translation</i>	79
Figura 57 – Tecla de acionamento – <i>lt</i> – <i>lateral translation</i>	80
Figura 58 – Tela com cargas referentes a fase – <i>lt</i> – <i>lateral translation</i>	80
Figura 59 – Aba dimensionamento das barras.....	81
Figura 60 – Tipo de aço.....	82
Figura 61 – Modelo 3D – Planilha Excel.....	83
Figura 62 – Modelo 3D – software METÁLICA 3D.....	86
Figura 63 – Modelo 3D – software SAP2000.....	87
Figura 64 – Comparativo N26 entre METÁLICA 3D x Excel.....	92
Figura 65 - Comparativo N26 entre SAP2000 x Excel.....	93

Figura 66 - Comparativo nó N1 entre METÁLICA 3D x Excel x SAP2000.....	95
Figura 67 – Comparativo barra 01 entre METÁLICA 3D x Excel x SAP2000.....	99
Figura 68 – Pré-dimensionamento de cabos.....	100
Figura 69 – Condições climáticas.....	100
Figura 70 – Distância entre as torres.	100
Figura 71 – Modelo 3D Excel	103
Figura 72 – Mísula de suporte de cabos.	103
Figura 73 – Formulário simulação de cabos rompendo.	104
Figura 74 – Tabela de majorações de esforços solicitantes da planilha Excel.....	104
Figura 75 – Tabela de hipóteses – Excel.....	105
Figura 76 – Hipótese 1 vento 0°.....	106
Figura 77– Tela de decisão para análise de sensibilidade da estrutura.	106
Figura 78 – Tela aba “SENSIBILIDADE AO DELOCAMENTO” vento 0°.....	107
Figura 79 – Valor do parâmetro B_2 para vento 0°.....	107
Figura 80 – Hipótese 1 vento 90°.....	108
Figura 81 – Tela aba “SENSIBILIDADE AO DELOCAMENTO” vento 90°.....	108
Figura 82 – Valor do parâmetro B_2 para vento 0° e 90°.....	109
Figura 83 – Formulário para redução de rigidez axial.....	109
Figura 84 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida.....	110
Figura 85 – Formulário das reações horizontais fictícias – hipótese vento 0°.....	110
Figura 86 – Tela Excel – etapa <i>nt – no translation</i> – vento 0°.....	111
Figura 87 – <i>lt – lateral translation</i> vento 0°.....	112
Figura 88 – Tela Excel – etapa <i>lt – lateral translation</i> – vento 0°.....	112
Figura 89 – <i>nt – no translation</i> vento 90°.....	113
Figura 90 – Tela Excel etapa <i>nt – no translation</i> – vento 90°.....	113
Figura 91 – <i>lt – lateral translation</i> – vento 90°.....	114
Figura 92 – Tela Excel condição <i>lt – lateral translation</i> – vento 90°.....	114
Figura 93 – Tela dimensionamento das barras a tração e compressão.....	115
Figura 94 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez bruta – 1ª interação.	116
Figura 95 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida 80% – 1ª interação.....	116
Figura 96 – Tela dimensionamento das barras a tração e compressão – 1ª interação.	116
Figura 97 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez bruta – 2ª interação.	117
Figura 98 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida 80% – 2ª interação.....	117
Figura 99 – Tela dimensionamento das barras a tração e compressão - 2ª interação.....	117

Figura 100 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez bruta – 3 ^a interação.	118
Figura 101– Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida 80% – 3 ^a interação.....	118
Figura 102 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida – 4 ^a interação.....	118
Figura 103 – Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2.	142
Figura 104 – Curvas de dimensionamento à compressão.	144
Figura 105 – Estrutura original decomposta na estrutura nt e na estrutura lt	145
Figura 106 – Tela Inicial do Software.	155
Figura 107 – Tela de inserção de dados da linha de transmissão.....	157
Figura 108 – Tela de cálculos de vento.	158
Figura 109 – Tela de cálculos de cargas solicitantes.....	159
Figura 110 – Tela de inserção de dados da modelagem da torre.....	161
Figura 111 – Planilha das matrizes geradas pelo cálculo das hipóteses.....	181
Figura 112 – Exemplo de planilhas geradas dos cálculos das hipóteses.	182
Figura 113 – Armazenamento dos dados das planilhas de resultados.....	183
Figura 114 – Tela de dimensionamento dos perfis.....	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenada dos nós (junções) – unidade [m].....	84
Tabela 2 – Numeração oficial das barras.....	85
Tabela 3 – Perfil metálico tipo cantoneira.....	88
Tabela 4 – Propriedades mecânicas das barras.....	88
Tabela 5 – Carregamentos aplicados aos nós	88
Tabela 6 – Comparação deslocamentos – Excel x Metálica 3D.....	90
Tabela 7 – Comparação deslocamentos – Excel x SAP2000	91
Tabela 8 – Reações de apoio Excel.	93
Tabela 9 – Reações de apoio METÁLICA 3D.....	94
Tabela 10 – Reações de apoio SAP2000.....	94
Tabela 11 - Valores comparativos de reações de apoio.	94
Tabela 12 - Esforços solicitantes das barras.....	96
Tabela 13 – Características geométricas do modelo.	101
Tabela 14 – Perfis dimensionados segundo NBR 8800 (2007).....	118
Tabela 15 – Perfis metálicos tipo cantoneira – METÁLICA 3D.	121
Tabela 16 – Tabela de resistência – METÁLICA 3D.	125
Tabela 16 – Tabela de resistência – METÁLICA 3D.	126
Tabela 17 – Valores de coeficientes de ponderação das ações $\gamma f = \gamma f1 \gamma f3$	135
Tabela 18 – Valores dos fatores de combinação Ψ_o e de redução Ψ_1 e Ψ_2 para ações variáveis.	135
Tabela 19 – Valores de coeficientes de ponderação das resistências γm	137
Tabela 20 – Dimensões padrões de cantoneiras com abas iguais.....	148
Tabela 21 – Cabos condutores CAA para linhas transmissão.....	150
Tabela 22 – Cordoalha para para-raios.....	152
Tabela 23 – Propriedades mecânicas dos aços.	152
Tabela 24 – Propriedades Mecânicas.	188
Tabela 25 – Cabos condutores.....	188
Tabela 26 – Cordoalhas de para raios.....	189
Tabela 27 – Dados dos estados – vento e temperatura.	190
Tabela 28 – Coeficientes para o tipo de terreno.	191
Tabela 29 – Fatores de correção k para os tipos de terrenos.	191
Tabela 30 – Perfis de cantoneira.	192

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo de usinas existentes no Brasil, projeção até 2021.....	31
Quadro 2 – Projeção de quantidade de linhas de transmissão para 2019.	31
Quadro 3 – Tensões nominais	33
Quadro 4 – Classificação da estrutura quanto à deslocabilidade.....	53
Quadro 5 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica – Rio Grande do Sul
Cemig	Companhia Energética de Minas Gerais
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
Copel	Companhia Paranaense de Energia
COPPE	Instituto Alberto Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
Eletronorte	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A
Eletrosul	Eletrosul Centrais Elétricas S.A.
ELU	Estado Limite Último
LTEE	Linha de Transmissão de Energia Elétrica
MAES	Métodos de Amplificação de Esforços Solicitantes
MEF	Método de Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VBA	Visual Basic for Applications

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	18
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	18
1.2 OBJETIVOS PRINCIPAIS	20
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4 ESTADO DA ARTE	20
1.5 JUSTIFICATIVAS DO TEMA	28
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	30
2.2 TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA	32
2.2.1 Tipos de torres de transmissão.....	33
2.2.2 Classificação das torres de transmissão	35
2.2.3 Componentes da linha de transmissão	37
2.3 ACIDENTES.....	41
2.4 TRELIÇAS	43
2.4.1 Treliça espacial	44
2.4.2 Análise das treliças	46
2.5 ETAPAS DO PROJETO DE ELABORAÇÃO DE TORRES DE TRANSMISSÃO	46
2.5.1 Definição do traçado preliminar	46
2.5.2 Levantamento dos parâmetros meteorológicos	47
2.5.3 Temperatura ambiente	47
2.5.4 Velocidade de vento.....	47
2.6 NORMAS DE PROJETO	48
2.7 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM ESTRUTURAS	48
2.8 ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS	49

2.8.1	Efeitos globais	50
2.8.2	Sensibilidade a deslocamento das estruturas.....	51
2.8.3	Método de amplificação de esforços	52
2.9	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	53
2.9.1	Métodos de análise estrutural.	55
2.9.2	Análise matricial.....	56
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS.....		62
3.1	EQUIPAMENTO E SOFTWARES.....	63
3.1.1	Softwares	63
3.2	UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE	64
3.2.1	Concepção estrutural.	65
3.2.2	Análise Estrutural	74
3.2.3	Dimensionamento das barras.....	81
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO		83
4.1	VALIDAÇÃO	83
4.1.1	Modelagem da estrutura – Geometria	83
4.1.2	Carregamentos	87
4.1.3	Deslocamentos.....	89
4.1.4	REAÇÕES DE APOIO.....	93
4.1.5	ESFORÇOS SOLICITANTES	96
4.2	SIMULAÇÃO	99
CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....		127
REFERÊNCIAS		129
APÊNDICE A – ITENS DA NBR 8800 – NORMAS METÁLICA		135
APÊNDICE B – TABELAS DE REFERÊNCIA		148
APÊNDICE C – FORMULAÇÕES E DADOS		153

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O assunto abordado é o estudo de estabilidade global de torres metálicas treliçadas de transmissão de energia e uma análise de primeira ordem é aquela em que o equilíbrio da estrutura é estudado na configuração geométrica inicial, ou seja, situação não deformada e uma análise de segunda ordem considera o equilíbrio da estrutura na posição deformada. A verificação da estabilidade global visa garantir a segurança da estrutura perante o estado limite último de estabilidade. Segundo Souza, Pereira e Nardim (2016) uma análise de segunda ordem influencia na magnitude dos esforços, alteram os próprios deslocamentos e caracteriza uma relação não linear entre esforços e deslocamentos. De acordo com a NBR 8800 - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mista de Aço e Concreto de Edifícios (2007), se a estrutura estiver exageradamente instável, deve-se mudar a concepção estrutural ou aumentar as seções das peças estruturais.

Segundo Labegalini *et al.* (1992) as primeiras linhas de transmissão elétrica surgiram por volta de 1870, conseqüentemente a primeira empresa destinada a gerar e vender energia elétrica. Sabe-se que um país em desenvolvimento necessita de eletricidade e daí a importância de transmitir a mesma por todo território. A escolha de uma linha de transmissão depende de vários aspectos de natureza técnica e econômica, sendo que se deve levar em conta o custo da perda de energia elétrica, frente ao investimento proposto e aliado a segurança, visto o risco de falha da própria estrutura. Segundo Larkshmanan *et al.* (2012) as torres de transmissão são componentes vitais das linhas de transmissão e uma previsão de falha é muito importante para confiabilidade e segurança do sistema de transmissão.

Segundo El Damatty e Hamada (2016) em vários locais do globo terrestre, muitas falhas de estruturas de linhas de transmissão foram observadas durante eventos de vento de alta intensidade na forma de tornados. Para garantir a segurança da estrutura, devem ser previstas situações de carga que simulem as condições mais críticas e mais severas que uma estrutura pode sofrer em toda sua vida útil, sendo que, segundo Labegalini *et al.* (1992), no caso de dimensionamento de torres de transmissão, existem 3 fatores importantes que deve-se levar em consideração, sendo eles: hipótese de carga de maior duração associado à temperatura média sem o efeito do vento; hipótese de flecha mínima associado à temperatura de menor valor sem o efeito do vento; hipótese de carga de vento máximo.

Segundo El Damatty e Hamada (2015) não existe um procedimento de projeto apropriado para determinar de forma correta os carregamentos para aplicação no dimensionamento de torres de transmissão de energia. A ABNT-NBR 5422 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (1985), norma esta que regulamenta as diretrizes para o dimensionamento da estrutura, possui parâmetros para determinação da carga de vento, mas esses parâmetros comparando com a ABNT-NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações (1988), são bem diferentes. Segundo Vanin e Martin (2014) o dimensionamento de torres de transmissão de energia utilizando a NBR 6123, admite valores mais conservadores e mais seguros das cargas de vento, do que o dimensionamento utilizando a NBR 5422. Acredita-se que a NBR 5422, por ser uma norma confeccionada na década de 80 e o fato de apresentar parâmetros para determinação da carga de vento, bem abaixo dos valores obtidos do que a Norma NBR 6123 espera-se que em um futuro próximo possa passar por uma revisão de modo que se garanta um parâmetro único para determinação da carga de vento.

Segundo Gontijo (1994) antigamente era muito usado o método de equilíbrio dos nós, métodos das seções e Cremona, mas eram sempre limitados à análise linear de primeira ordem, admitindo que as barras são linearmente elásticas e o equilíbrio na situação indeformada, abordando análises estáticas. Segundo Azevedo (1993) a análise de estruturas metálicas deve ser realizada em duas fases distintas, sendo a primeira determinando os esforços considerando a estrutura de forma global e desprezando os efeitos de segunda ordem e a segunda com segunda ordem, sendo que os esforços devem ser corrigidos individualmente de forma a efetivar-se a verificação de segurança relativa à deformação, cuja parcela mais importante diz respeito em muitos casos precisamente aos efeitos de segunda ordem. Segundo Falcon (2004) a necessidade de expansão do sistema de telecomunicações e eletricidade, que se tenham estruturas cada vez mais seguras, diferente de muitos casos documentados pela literatura, onde entraram em colapso devido ao vento, caso como citado na reportagem “O ESTADO DE SÃO PAULO, do dia 04 de novembro de 1997”, em que dez torres do sistema de transmissão da hidrelétrica de Itaipu, no dia 02 de novembro de 1997, ficaram expostas a ventos de 130 km/h e sofreram queda. Diante destas falhas, Falcon e Silva (2004) propôs uma metodologia de análise para modelo de projeto ótimo por meio da ferramenta de MEF (método dos elementos finitos), levando em conta a análise estrutural, análise de sensibilidade e algoritmos de otimização, propondo um sistema estrutural mecanicamente mais eficiente, de baixo custo e mais seguro. Segundo Junior (2007) a análise de estabilidade levando em conta os efeitos de segunda ordem é muito importante, mas deve-se dar um enfoque sobre a

possibilidade de ruptura de quaisquer cabos, pois a influência dos cabos remanescente no caso da ruptura de um único cabo e a redistribuição de esforços pode desestabilizar a estrutura. Segundo Elawady e El Damatty (2016) os tornados podem gerar uma distribuição desigual da velocidade do vento nos condutores, gerando uma força horizontal que atua diretamente na estrutura onde se acredita ser a razão para a falha de algumas torres pelo mundo. Segundo Junior (2007) a análise do rompimento do cabo deve ser considerada com efeito dinâmico, pensando sempre em um modelo estrutural com algum tipo de rigidez longitudinal e torcional e nunca esquecendo que a falha de uma torre pode gerar danos em um conjunto de torres, podendo gerar um efeito cascata.

Entende-se que o estudo proposto possa contribuir com outros estudos já realizados sobre torres metálicas treliçadas de Transmissão de Energia Elétrica, no que diz respeito à análise de estabilidade de estruturas.

1.2 OBJETIVOS PRINCIPAIS

O objetivo deste projeto foi estudar a estabilidade global de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando o método dos elementos finitos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a geometria das torres metálicas treliçadas;
- Analisar os graus de deslocabilidade em torres metálicas treliçadas;
- Analisar os efeitos de 2ª ordem global em torres metálica treliçadas;
- Aplicar os MAES (métodos de amplificação de esforços solicitantes) em torres metálicas treliçadas;
- Elaborar uma planilha eletrônica para análise, otimização e pré-dimensionamento de torres metálicas treliçadas, segundo ABNT-NBR 8800 (2007).

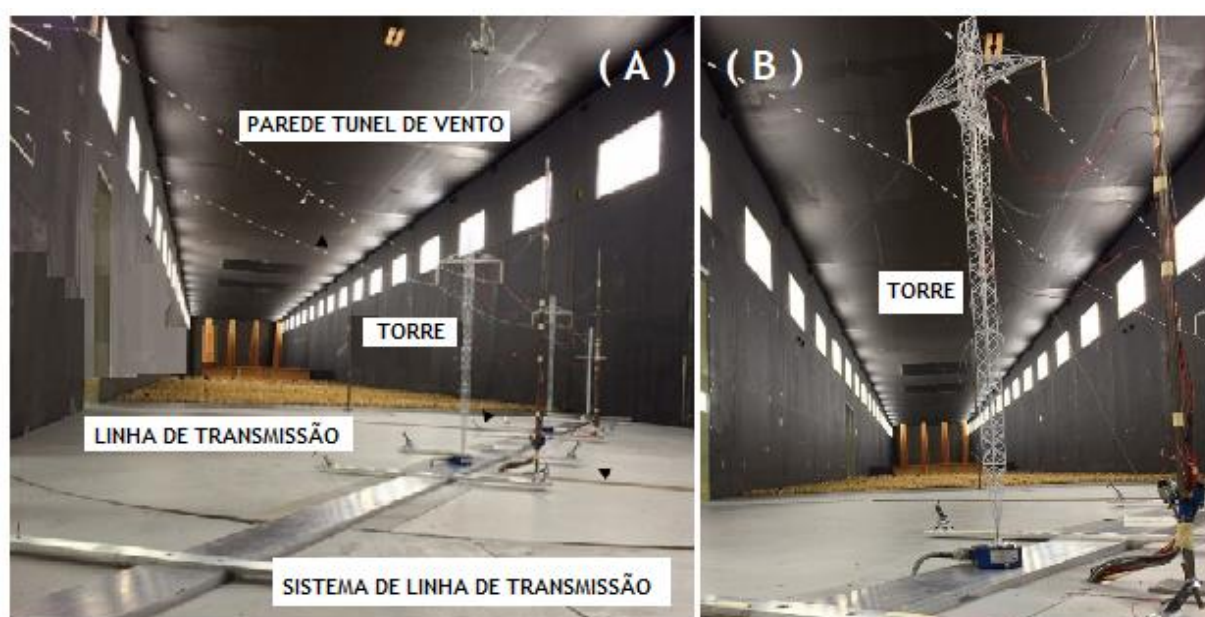
1.4 ESTADO DA ARTE

Tort, Sahin e Hasançebi (2017) definem que a escolha da configuração mais adequada para a estrutura da linha de transmissão de energia depende de vários parâmetros como restrições elétricas, mecânicas e ambientais.

Hamada *et al.* (2017) simulou um teste aeroelástico em torres de transmissão de energia por meio de modelos em escala reduzida utilizando túnel de vento. O sistema de linhas de transmissão simulado no presente estudo é uma torre de transmissão genérica utilizada por diferentes empresas hidrelétricas na América do Norte e em diferentes partes do mundo. O modelo aeroelástico foi projetado em um protótipo de escala geométrica 1:50 e testado no Laboratório de Túnel de Vento de Camada Limite na Universidade de Ontario, Canadá.

O modelo foi testado na torre usando um perfil de vento de exposição aberta, para três direções com e sem as linhas de transmissão (condutores e para-raios). Esse modelo aeroelástico de sistemas de linhas de transmissão com múltiplos vãos não é relatado na literatura. As frequências naturais medidas do modelo aeroelástico correspondem às obtidas por modelagem numérica, extraídas da literatura e são afetadas diretamente pelo valor da força de pré-tensão aplicada nos cabos estaiados. A Figura 1A apresenta o modelo físico da linha de transmissão e a Figura 1B o modelo físico da torre tipo estaiada com cabos condutores e para-raios dentro do laboratório de túnel de vento.

Figura 1 – Protótipo da linha de transmissão e protótipo da torre estaiada.

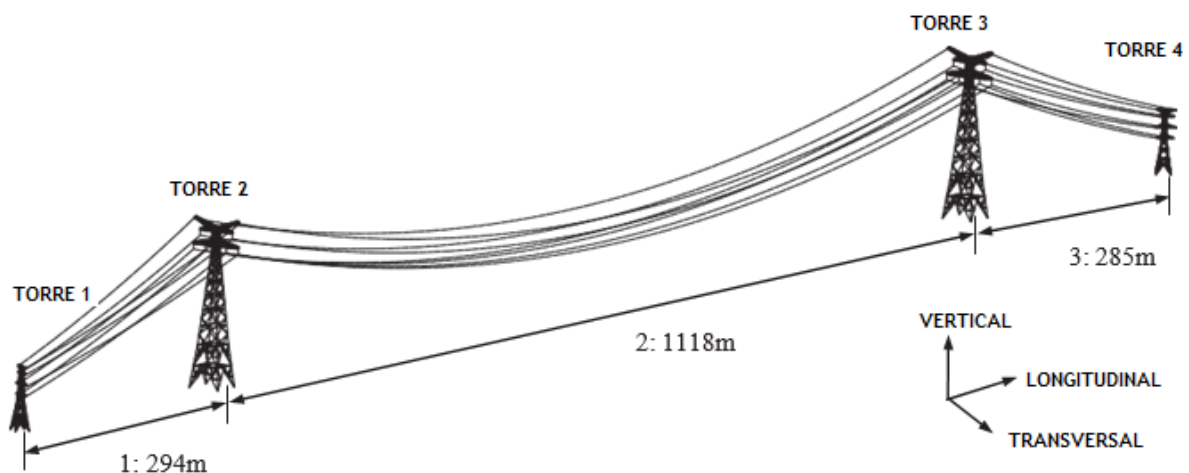


Fonte: Adaptado de: (HAMADA, KING, *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos por Hamada *et al.* (2017) indicam que o modelo aeroelástico do sistema de linhas de transmissão com múltiplas extensões respondeu de forma quase estática às cargas de vento da camada limite. A resposta dinâmica ressonante é menos significativa e se torna menos distinta, aumentando as velocidades do vento. Os resultados obtidos ajudam a enriquecer o estado da arte para futuros estudos na área.

Segundo Tian, Gai e Qu (2016) a linha de transmissão para vencer grandes vãos pode ter intervalos bem maiores que as torres convencionais, com distâncias maiores que 1000 m. Devem ser consideradas as ações sísmicas tendo cuidado especial com as bases de sustentação. Pesquisas foram realizadas no sistema de transmissão sobre o segundo rio mais longo da China e quinto maior do mundo, o rio *Yangtzé*, sistema de 220 kV na Província de Shandong, com cerca de 58,4 km e foi concebido para o risco sísmico com uma probabilidade de ultrapassagem de 10% em cinquenta anos. Por meio de um modelo experimental em escala reduzida usando um protótipo em que se testaram vários tipos de vibrações, verificou-se o efeito da vibração, causando uma resposta dinâmica no sistema de transmissão. O modelo estudado tem três vãos e quatro torres, sendo que a escala foi baseada no teorema de Buckingham. A Figura 2 ilustra o modelo idealizado com as quatro torres e as distancias dos três vãos.

Figura 2 – Modelo idealizado para construção do protótipo.



Fonte: Adaptado de: (TIAN, GAI e QU, 2016).

O projeto e a construção do modelo experimental foram testados no laboratório da Universidade Sul Central da China, em que possui três mesas agitadoras de 4m por 4m, para excitações de múltiplos pontos. Cada mesa tem uma carga útil de até trinta toneladas, com curso máximo de 250 mm, a uma velocidade máxima de 1 m/s, com frequência de saída variando de 0,1 Hz a 50 Hz e a aceleração de saída de até 1,0 g ao longo das direções horizontais no sentido transversal e longitudinal. Cada mesa de excitação ficou posicionada a uma distância de cinquenta metros uma da outra. O laboratório tem condições de abrigar modelos físicos com até 15 m de altura. Como o objeto do estudo eram as torres que vencem

o longo trecho, colocaram-se as torres 01 e 04 em bases fixas e somente as torres 03 e 04 nas mesas de agitação. A Figura 3 (A) apresenta o modelo físico das torres 02 e 03 nas mesas de agitação e a Figura 3 (B) apresenta as torres 01 e 04 nas bases fixas.

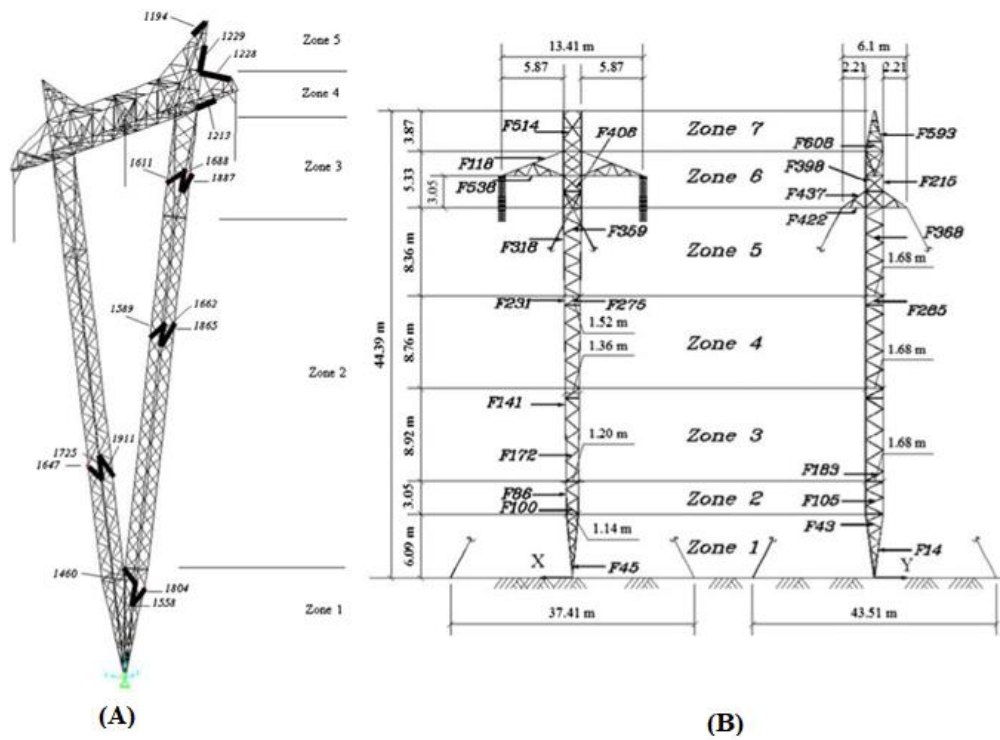
Figura 3 – Protótipos das torres.



Fonte: (TIAN, GAI e QU, 2016).

El Damatty e Hamada (2016) mostram diversos estudos em que foram observadas diversas torres em todo mundo sujeita a efeito de tornados e ventos de alta intensidade. Nota-se a falta de procedimentos e manuais de boas práticas para estimativa de ações de ventos e a forma como agem nas torres de transmissão. O estudo se baseia em uma pesquisa extensa realizada pela Universidade de Ontário no Canadá, em que se simulou quatro tipos de torres, sendo dois modelos estaiadas e dois modelos autoportantes. A Figura 4 mostra dois *layouts* de torres tipo estaiada utilizadas na simulação, sendo (A) a torre T2 e (B) a torre T1.

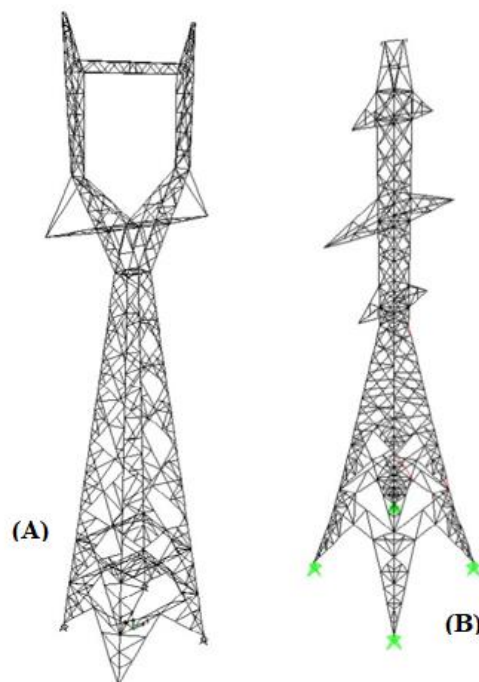
Figura 4 – Layout torres estaiadas.



Fonte: (EL DAMATTY e HAMADA, 2016).

A Figura 5 mostra dois *layouts* de torres tipo autoportante utilizadas na simulação, sendo (A) a torre T3 e (B) a torre T4.

Figura 5 – Layout torres autoportante.



Fonte: (EL DAMATTY e HAMADA, 2016).

Adotaram-se vãos entre 200 e 480 m, com diversas configurações de isoladores. O vão das torres T1, T2, T3 e T4 são 480, 460, 420 e 213 m e altura de 44.36, 47.5, 48.4 e 54.7m respectivamente.

O sistema de linha de transmissão simulado no presente estudo utilizou modelos numéricos tridimensionais não lineares. As barras foram consideradas estruturas tridimensionais com dois graus de liberdade por nó, ligadas uma a outra por meio de conexões rígidas e as diagonais peças articuladas, mas todas as peças foram parafusadas. Todo estudo realizado por El Damatty e Hamada (2016) baseou-se em tornados tipo F2 e obtiveram-se perfis de velocidade básica tangencial, radial e vertical de tais eventos.

Segundo Tian, Gai e Qu (2016) existem ainda muitos desafios no desenvolvimento de um modelo analítico rigoroso para quantificar a influência da variação tridimensional dos movimentos do solo.

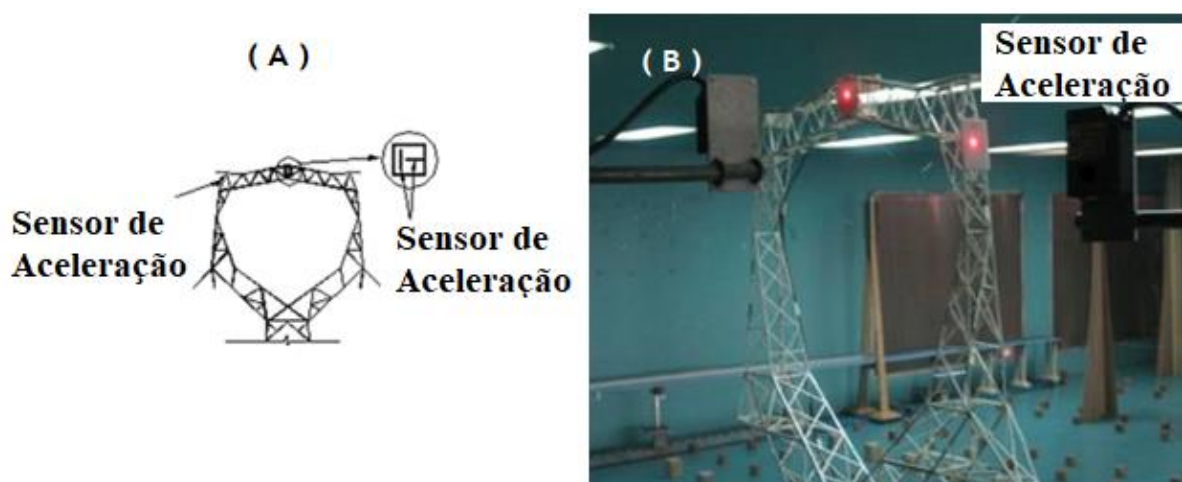
Em Couceiro *et al* (2016) apresentam uma metodologia para otimização de estruturas tridimensionais de torres de transmissão de energia, por meio de um algoritmo que se baseia na forma construtiva da torre evitando, desta forma, uma quantidade excessiva de análises estruturais, conseqüentemente, tendo uma ganho maior em produtividade.

Tian *et al.* (2016) desenvolveram um programa experimental em duas fases, conduzindo três impactos respectivos a um conjunto de torres. Os impactos são aplicados de maneira não uniforme simulando a realidade local. Segundo o autor do artigo a movimentação do solo causa uma resposta dinâmica no sistema torre / cabos e em locais com solo mais flexível a resposta dinâmica encontra-se valores maiores. A resposta do modelo computacional levando em conta a não linearidade geométrica produz valores razoáveis, mas devem ser usados com cautela.

Liang *et al.* (2014) desenvolveram um modelo aeroelástico completo de uma torre para duas linhas de circuito de condutores, para simular o sistema de LTEE (linha de transmissão de energia elétrica). Inúmeros deslocamentos e acelerações foram simulados por meio de túnel de vento com diversas cargas limites, até o ponto de destruição total do protótipo. Pode-se afirmar que os efeitos do acoplamento entre torre de transmissão elétrica e linha em vibrações induzidas pelo vento, devem ser levados em consideração durante o projeto da linha, influenciando diretamente na resistência. Durante o ensaio identificou-se pontos de fragilidade nas torres e autor deste trabalho aconselha que seja feito um reforço nas partes sujeitas a grandes condições de flambagem, onde conseqüentemente poderia aumentar efetivamente a capacidade de sobrevivência das torres sob ventos de alta intensidade.

O trabalho de Liang *et al* (2014) simularam o sistema de linha de transmissão elétrica de 500 kV de Changai para Nanchang, com torres treliçadas de aço no sistema autoportante, altura de 48.50 m e vãos de 400 m. Os testes foram realizados em um túnel de vento de camada limite na Universidade de Tongji. A velocidade do vento de teste é ajustável continuamente de 1 m/s a 17,6 m/s. Dois sensores de aceleração a laser foram usados para medir os deslocamentos do topo da torre. A Figura 6A apresenta um esboço esquemático do projeto da torre com o posicionamento dos sensores de aceleração e a Figura 6B apresenta o modelo em escala reduzida com os sensores de aceleração.

Figura 6 – (A) Esboço esquemático da torre com sensores de aceleração; (B) Modelo em escala reduzida com sensores de aceleração.

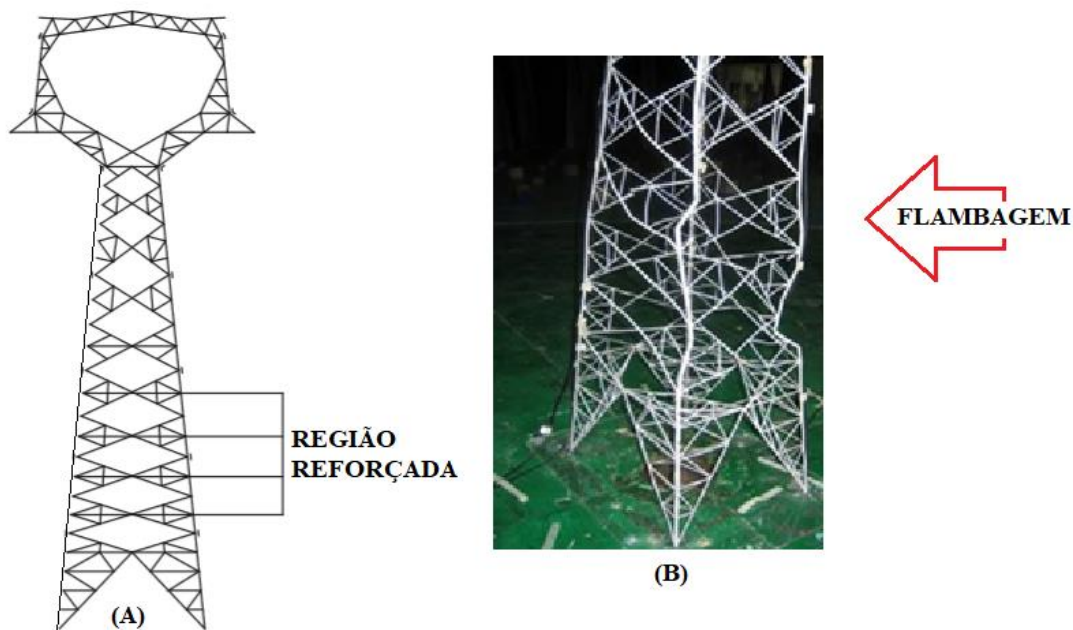


Fonte: (LIANG, ZOU, *et al.*, 2014).

Liang *et al* (2014) realizaram testes destrutivos do protótipo em torres com e sem reforço de diafragmas, de modo a investigar as cargas de vento extremas do sistema. Durante a fase de teste fez quatro medidas de reforço, em que colocava-se um reforço e aumentava o vento gradualmente até que a torre desmoronasse, depois fez-se um novo reforço e aumentou o vento até que desmoronasse novamente e assim sucessivamente, por fim a estrutura entrou em colapso devido à flambagem da coluna vertical.

Figuras 7 (A) mostra um design da torre em análise com as partes reforçadas e Figura 7 (B) a região do protótipo analisado após o ensaio destrutivo.

Figura 7 – Torre reforçada (A) e região com ruína por flambagem (B).



Fonte: (LIANG, ZOU, *et al.*, 2014).

Segundo Yang e Hong (2016) as torres de transmissão de energia elétrica são estruturas submetidas a efeitos naturais extremos como tornados e furacões e de forma alguma deve-se negligenciar os efeitos de turbulência dos ventos.

Segundo Silva, Marchi Neto e Seifert (2016) as usinas hidrelétricas têm sido uma ótima alternativa para a produção de energia levando em conta a emissão de gases de efeito estufa, mas as severas secas dos últimos anos alertam sobre a possível falta de energia elétrica no país, exigindo uma significativa revisão para enfrentar possíveis desafios que podem haver com essa escassez. O trabalho apresenta uma revisão vasta sobre o estado atual energético brasileiro, considerando novas estratégias para o setor de modo a melhorar a segurança do fornecimento de energia no país. Relata ainda uma discussão sobre as causas da crise no setor energético atual e o papel para o futuro das fontes de energia renováveis em uma perspectiva de dez anos.

Em Souza *et al.* (2016) o estudo apresenta uma metodologia para otimizar a topologia de torres de transmissão de energia elétrica, em que divide a estrutura em módulos que podem assumir diferentes designs, baseando-se em regras para prática de criação de modelos e viabilidade de testes de protótipos, gerando assim uma solução ideal para aplicação industrial direta. Tamanhos e formas das estruturas são otimizadas simultaneamente aos exemplos numéricos, simulando duas torres com diferentes ventos e rupturas de cabo condutor.

Com o avanço da tecnologia, este estudo de viabilidade para as linhas de transmissão tornou mais eficiente, ou seja, rápido e preciso. O estudo feito por Liang *et al.* (2014) no qual consistiu em montar em escala reduzida uma linha de transmissão com sensores instalados em cada torre, ao qual foi submetida a um túnel de vento, gerando indicadores dos pontos de falhas. A partir de então, tornou-se possível a localização de onde seria necessária a instalação de reforços na estrutura.

As conhecidas “linhas de transmissão”, responsáveis pelo caminhamento da energia elétrica entre unidades geradoras e subestações, diariamente são submetidas a diversos tipos de cargas, como peso dos condutores, isoladores e os efeitos ambientais, dentre eles ventos de alta intensidade, e devem manter-se erguidas frente às diversas combinações (JUN, HEZHI, *et al.*, 2013).

1.5 JUSTIFICATIVAS DO TEMA

O tema proposto em estudo foi motivado pela importância em avaliar métodos de estabilidade global de estruturas metálicas, levando em conta os efeitos de 2ª ordem. Neste estudo em específico as torres metálicas treliçadas de transmissão de energia. Existe uma grande expectativa de crescimento do setor energético, com a construção de novas usinas geradoras de energia e conseqüentemente novas linhas de transmissão. Desta forma existe uma grande expectativa de novos projetos nesta área de conhecimento e espera-se que este trabalho possa auxiliar futuras obras no setor, além de incentivar o desenvolvimento de novas pesquisas.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em seis capítulos:

O Capítulo 1 apresenta as considerações gerais sobre o tema proposto, os objetivos gerais e específicos que se pretende alcançar, um breve relato sobre o estado da arte, descrevendo pequenos resumos sobre pesquisas recentes do setor, justificativa em desenvolver este trabalho e finalizando com a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 tem-se uma visão global sobre sistema elétrico brasileiro, método dos elementos finitos, instabilidade de estruturas, carregamentos e normas relacionadas a dimensionamento de estruturas metálicas.

No capítulo 3 tem-se os materiais e métodos, onde apresenta-se a metodologia para análise de um projeto da torre de transmissão, abordando a confecção de uma planilha eletrônica para otimização de dados e pré-dimensionamento. Esta planilha contempla os seguintes parâmetros:

- Cargas atuantes na estrutura;
- Peças estruturais e propriedades físicas e mecânicas;
- Simulações de hipóteses, cálculos dos esforços e deformações;
- Análise da sensibilidade das estruturas a deslocamento;
- Análise de estabilidade global e efeitos de 2ª ordem;
- Métodos de multiplicação de esforços (MAES);
- Dimensionamento dos elementos estruturais, segundo NBR 8800 (2007);

O capítulo 4 apresenta os resultados em forma de tabelas e figuras ilustrativas, demonstrando os esforços e deformações encontradas e a solução com o perfil ideal para as simulações dos carregamentos mais críticos. Neste capítulo apresenta-se também um comparativo entre a planilha desenvolvida, um software conceituado na área MEF, o SAP2000 e um comercial específico da área de estruturas metálicas, o METALICA 3D, de modo a validar os resultados apresentados na planilha.

O capítulo 5 apresenta a conclusão sobre o trabalho de forma geral e sugestões para futuros trabalhos na área.

Referencial bibliográfico utilizado para realização da dissertação.

E finalmente apêndice com tabelas de natureza diversas e dados referentes às normas técnicas relacionadas ao dimensionamento dos perfis.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Um sistema elétrico de transmissão de energia conecta todas as formas de geração de energia possíveis, gerando uma grande rede de transmissão de energia elétrica. Dentre as formas possíveis de geração de energia citam-se as hidrelétricas, energia eólica, solar, biomassa, nuclear e termoelétrica.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (2013), existem mais de oitocentas linhas de transmissão, onde totalizam cerca de oitenta mil quilômetros, interligando todo o país. Atualmente existem oito grandes empresas que operam o sistema: Furnas, Chesf (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco), Eletronorte, Eletrosul, CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica – Rio Grande do Sul), Copel (Companhia Paranaense de Energia), CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) e Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais).

A Figura 8 apresenta de forma esquemática o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, tendo seu início na usina hidrelétrica, passando pelas subestações de distribuição, chegando ao consumidor final.

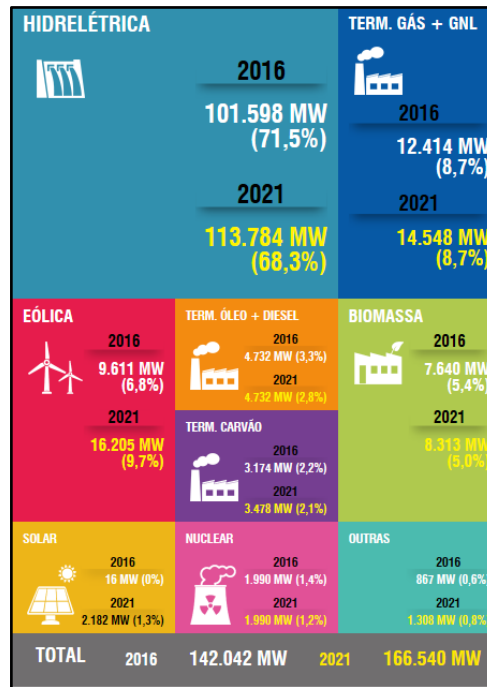
Figura 8 – Gerenciamento do sistema de geração, transmissão e distribuição.



Fonte: (BROMBERGER e OLIVEIRA, 2012).

No quadro 1 apresenta-se um resumo das usinas existentes no Brasil, com uma projeção até 2021 com novas usinas, e conseqüentemente novas linhas de transmissão. Existe uma expectativa de aumento de geração de energia de 142.042 MW para 166.540 MW.

Quadro 1 – Resumo de usinas existentes no Brasil, projeção até 2021.



Fonte: (ONS, 2013).

No quadro 2 apresenta-se a quantidade de linhas de transmissão com projeção para 2019, com ampliação do sistema elétrico brasileiro em aproximadamente vinte mil quilômetros de novas linhas nos próximos dois anos.

Quadro 2 – Projeção de quantidade de linhas de transmissão para 2019.

800 kV CC	2016	2019
	0	9.316 km
750 kV	2016	2019
	2.683 km	2.683 km
600 kV CC	2016	2019
	12.816 km	12.816 km
500 kV	2016	2019
	46.630 km	52.617 km
440 kV	2016	2019
	6.748 km	6.887 km
345 kV	2016	2019
	10.320 km	10.472 km
230 kV	2016	2019
	52.588 km	50.757 km
TOTAL	134.765 km	154.748 km

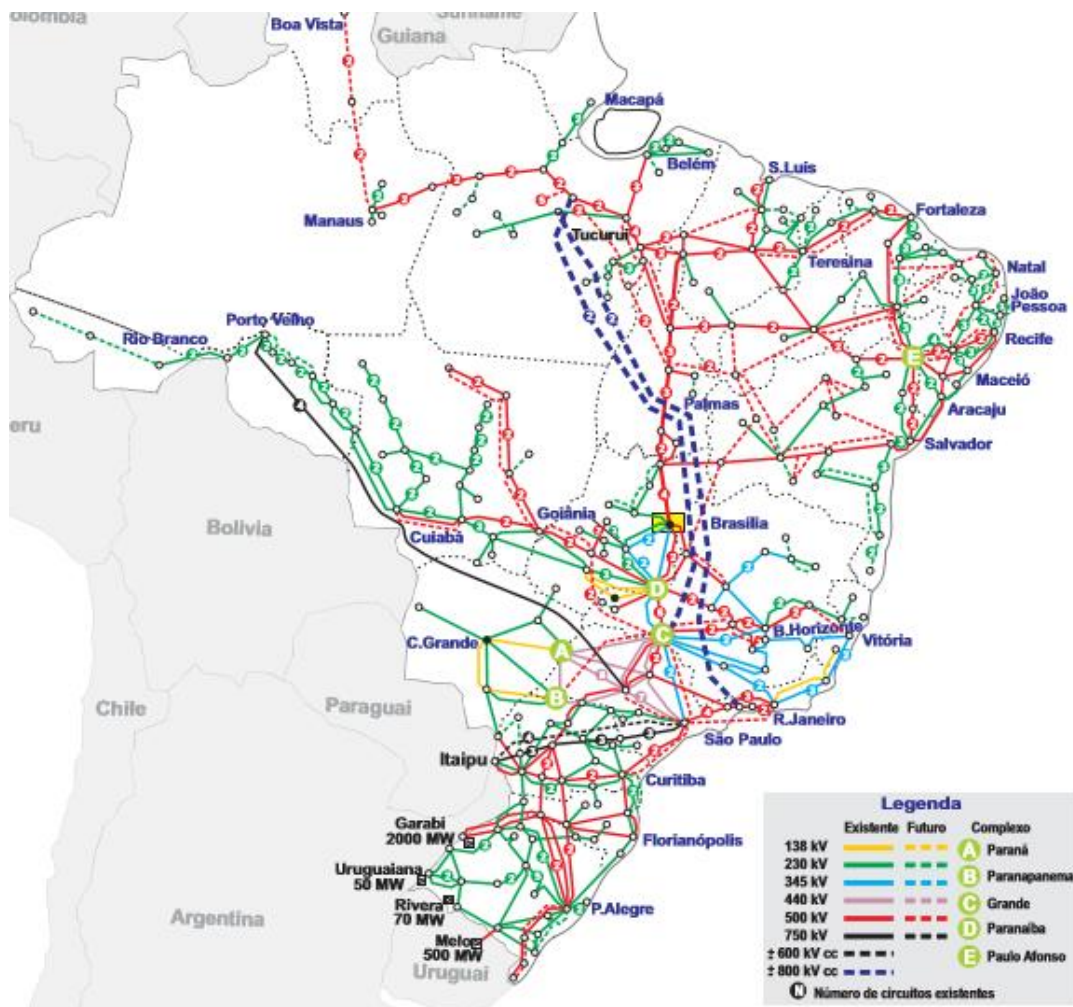
Fonte: (ONS, 2013).

2.2 TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA

Segundo Labegalini *et al.* (1992) as primeiras formas econômicas de aplicações de energia elétrica surgiram perto dos anos de 1870, em que os dínamos e motores de corrente contínua atingiram estágios que permitiram a geração e utilização de energia como força motriz para indústrias e iluminação pública. A primeira linha de transmissão elétrica no Brasil tem seu registro por volta de 1883, na cidade de Diamantina, MG, com dois quilômetros de extensão. Com o crescimento das linhas de transmissão surgiram as empresas responsável pela distribuição do setor, CEMIG, FURNAS, CESP e ITAIPU.

Na Figura 9 é possível ver as linhas de transmissão que percorrem todo o território brasileiro, em que se apresentam linhas de transmissão existentes. A figura referida apresenta também a voltagem, a quantidade de circuitos da linha e o complexo elétrico que a mesma pertence.

Figura 9 – Linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro.



Fonte: (ONS, 2013).

Segundo Fuchs e Almeida (1982) existem algumas tensões de uso no Brasil que conforme as classes podem ser classificadas em diferentes categorias. O quadro 3 apresenta os valores de tensões nominais e máximas e suas respectivas categorias.

Quadro 3 – Tensões nominais

Tensões Nominais	Tensões Máximas	Categoria
33 ou 34,5 kV	38 kV	ALTAS TENSÕES
62 ou 69 kV	72,5 kV	
132 ou 138 kV	145 kV	
220 ou 230 kV	242 kV	
330 ou 345 kV	362 kV	
500 kV	550 kV	TENSÕES EXTRA ELEVADAS
750 kV	800 kV	

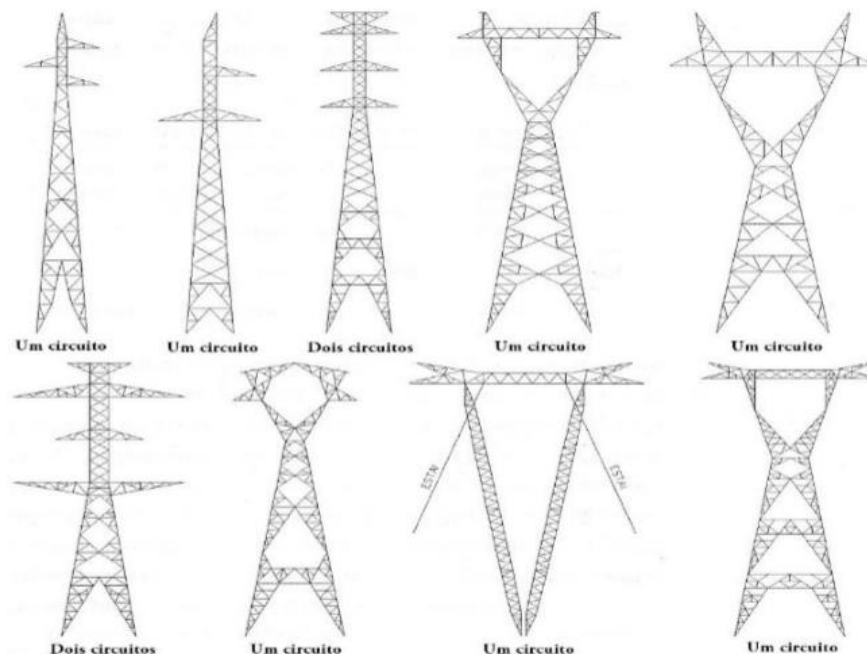
Fonte: (FUCHS e ALMEIDA, 1982) – V = volts; K = 10^3 .

2.2.1 Tipos de torres de transmissão

De acordo com Gontijo (1994), existem arquiteturas padronizadas de torres de transmissão, onde as mais utilizadas para o transporte de energia tem sido as de aço treliçadas, destacando a autoportante tronco piramidal e as estaiadas.

A Figura 10 apresenta alguns tipos de torres de transmissão do tipo tronco piramidal e estaiadas.

Figura 10 – Tipos de torres de transmissão.



Fonte: (GONTIJO, 1994).

2.2.1.1 Torres metálicas estaiadas

São aquelas em que os esforços, sejam horizontais ou verticais, são absorvidos por cabos de aço, que podem ser comumente chamados de tirantes ou estais. Estes tirantes servem para garantir a estabilidade da torre e transmitir as cargas para a fundação. Este tipo de estrutura possui uma desvantagem em relação às torres autoportantes, pois as mesmas precisam de uma faixa de servidão maior devido ao sistema estrutural, além de precisarem de uma área com topografia regular para sua instalação.

Figura 11 – Torre metálica treliçada do tipo estaiada.



Fonte: (NOVAES, 2016).

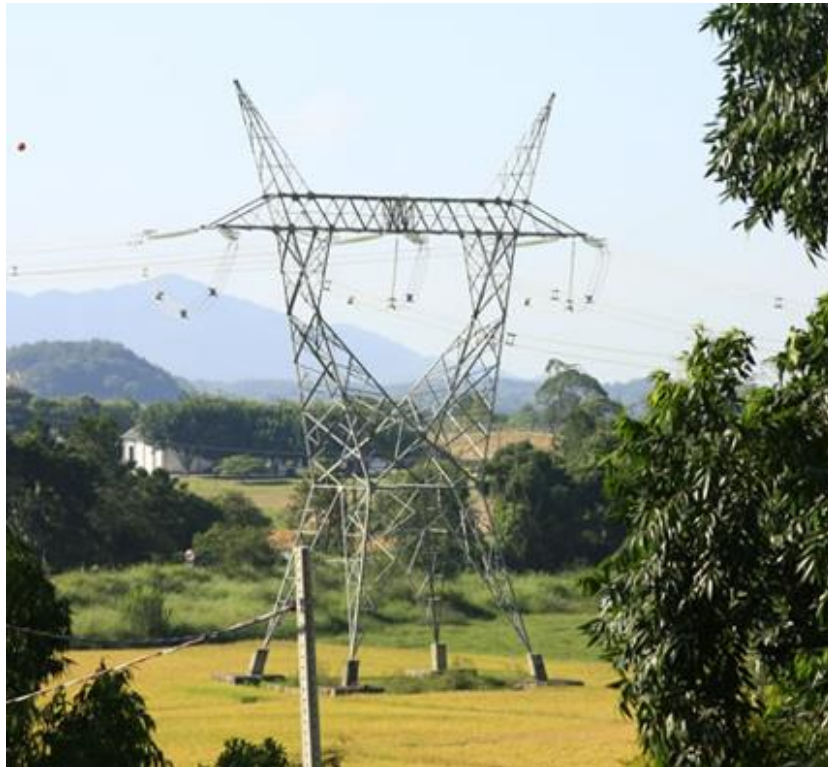
2.2.1.2 Torres autoportante

Como o próprio nome diz, são torres que não precisam de nenhuma estrutura auxiliar para manter sua estabilidade. Todos os esforços horizontais e verticais são transmitidos ao solo por meio de suas fundações.

Segundo Labegalini *et al.* (1992) as torres autoportantes podem ser:

- Rígidas: São aquelas que não apresentam deformações elásticas perceptíveis.
- Semi-rígidas: São aquelas que possuem uma rigidez maior em apenas uma direção.
- Flexíveis: São aquelas que apresentam uma maior sensibilidade a deformação, mas sempre trabalhando no regime elástico.

Figura 12 – Torre metálica treliçada do tipo autoportante.



Fonte: (Torres de Transmissão de Energia, 2017?).

2.2.2 Classificação das torres de transmissão

Quanto a sua função na linha:

- Estruturas de suspensão: dimensionadas para suportar as cargas normais verticais, horizontais, transversais devidas a ação do vento sobre os cabos e as próprias estruturas. No sentido longitudinal também resistem às solicitações impostas pela ação do vento;
- Estruturas de ancoragem: pode ser total ou parcial. A ancoragem total se dá em estruturas de fim de linha, pois são dimensionadas para resistir todas as cargas normais e excepcionais que venham incidir na estrutura. Já as estruturas com ancoragem parcial são empregadas em pontos intermediários da rede e resistem normalmente aos esforços normais de tração unilateral, nas condições diárias de

operação, além dos esforços transversais e longitudinais normais. São projetadas para impedir que um eventual efeito cascata ocorra.

Quanto ao material empregado:

- Madeira: sua maior aplicação é verificada nos Estados Unidos, existindo linhas de até 500 kV;

Figura 13 – Torre treliçada de madeira tipo autoportante.



Fonte: (Coluna de madeira da linha de transmissão da eletricidade, 2013?).

- Concreto armado: estas estruturas tiveram bastante divulgação na Europa, em que foram bastante empregadas;

Figura 14 – Torre de concreto armado tipo autoportante.



Fonte: (NOVAES, 2016).

- Estruturas metálicas: tratam-se da solução técnica e economicamente viável quando se trabalha com estruturas de grande porte. São construídas geralmente de aço-carbono normais ou de alta resistência.

A estrutura de aço como é de praxe devem ser protegidas contra oxidação e corrosão, utilizando aço passivado como o aço tipo Cor-Ten.

Figura 15 – Torre metálica.

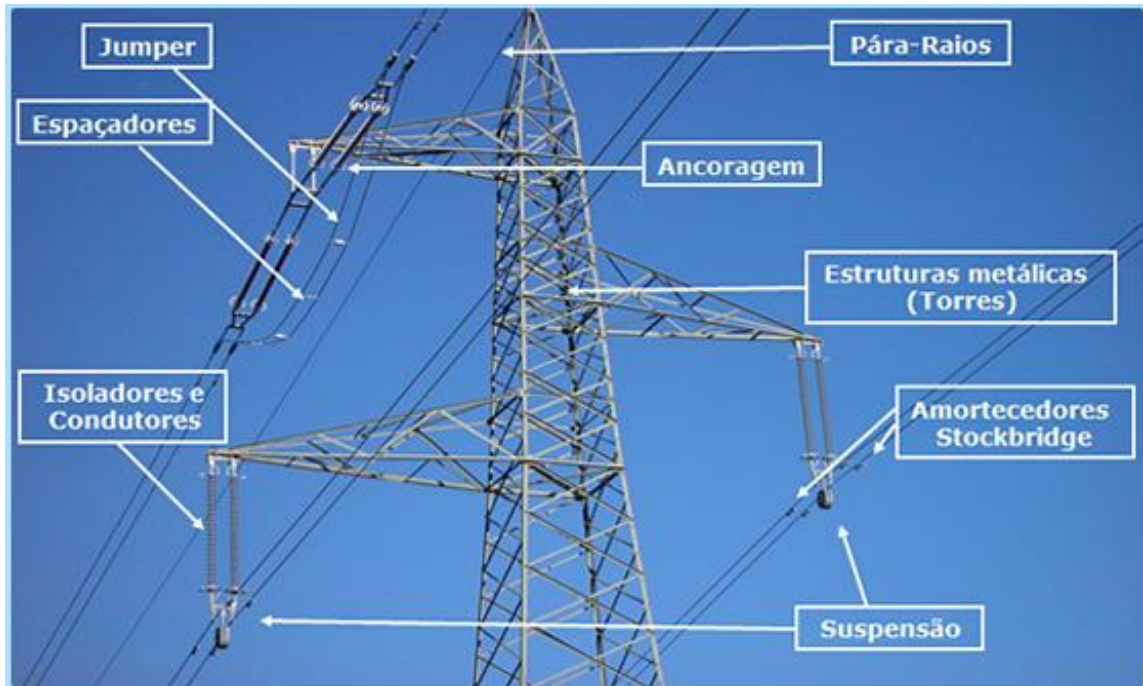


Fonte: (Torres de Transmissão de Energia, 2017?).

2.2.3 Componentes da linha de transmissão

Segundo Fuchs e Almeida (1982) os componentes principais de uma linha de transmissão são os condutores de fase, cabos para-raios, estrutura e isoladores. Na Figura 16 apresentam-se os elementos principais de uma torre de transmissão e elementos secundários como jumper, espaçadores, ferragens de ancoragens e suspensão e amortecedores.

Figura 16 – Elementos das torres de transmissão de energia.

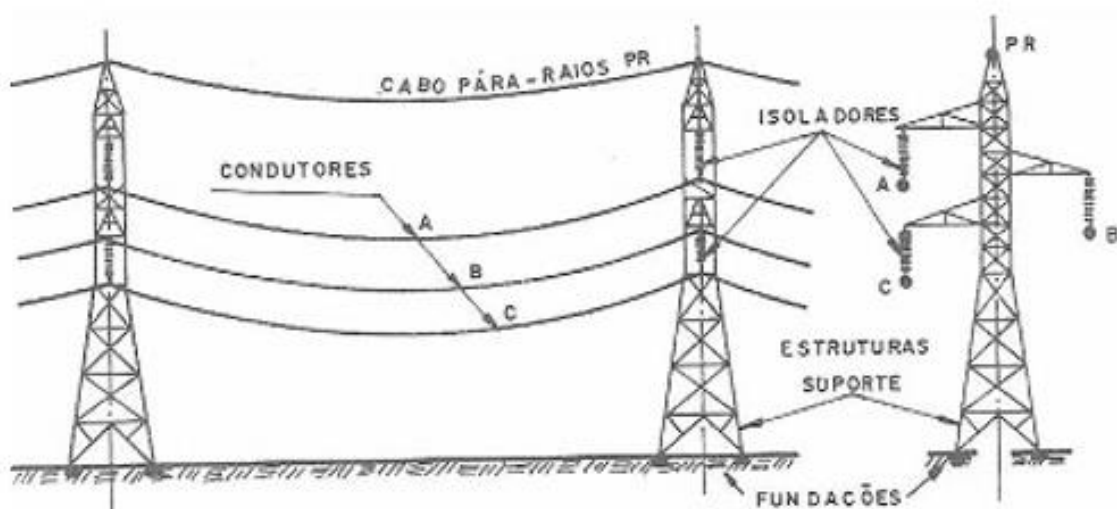


Fonte: (RB Infraenergia, 2017?).

A primeira vista pode parecer que são os condutores de fase os principais componentes da linha de transmissão, mas cada elemento tem a sua importância, no qual será demonstrado a diante.

Na Figura 17 apresenta-se uma possível disposição dos cabos fases e cabo para-raios.

Figura 17 – Principais elementos das linhas de transmissão.



Fonte: (FUCHS e ALMEIDA, 1982).

2.2.3.1 Condutores de fase e cabos para-raios

Os condutores são as fases de uma linha de transmissão, em que os cabos não possuem nenhuma isolamento, conhecidos também como cabos nus, podendo ser de alumínio, liga alumínio-aço, e alumínio com alma de aço sendo em algumas situações de cobre. Deve-se sempre ter um cuidado extra quando os cabos trabalham de forma aérea, pois estão sujeitos a severos esforços de tração.

Os cabos mais comumente utilizados em projetos de linhas de transmissão são:

- AAC (“*all aluminum conductor*”): Este tipo de cabo é composto por vários fios de alumínio encordoados
- AAAC (“*all aluminum alloy conductor*”): Mesmo princípio dos cabos AAC, porém neste caso são utilizadas ligas de alumínio de alta resistência. É o cabo com menor relação peso/carga de ruptura e menores flechas, mas é o de maior resistência elétrica entre os citados aqui.
- ACSR (“*aluminum conductor steel-reinforced*”): É também denominado de cabos CAA. Composto por camadas concêntricas de fios de alumínio encordoados sobre uma alma de aço, que pode ser um único fio ou vários fios encordoados.
- ACAR (“*aluminum conductor, aluminum alloy-reinforced*”): É composto de maneira idêntica aos cabos do tipo ACSR, porém ao invés de se utilizar alma com cabos de aço, utiliza-se alma com fios de alumínio de alta resistência mecânica. Assim, a sua relação peso/carga de ruptura fica ligeiramente maior do que a do cabo ACSR.

Figura 18 – Condutor de alumínio – tipo ACAR



Segundo Labegalini *et al.* (1992) utiliza-se com certa frequência no Brasil, principalmente em linhas de alta e extra tensão, cabos condutores do tipo ACSR. A relação entre o número de fios de alumínio e número de fios de aço configura a formação do cabo. Os cabos condutores ACSR possuem alma de aço e maior resistência mecânica ao cabo.

Os cabos para-raios tem a função de absorver as descargas atmosféricas, garantindo pleno funcionamento da transmissão de energia, onde são aterrados em torres alternadas. Como o próprio nome diz são utilizados para fornecer um caminho para as descargas atmosféricas que podem atingir o circuito de uma linha de transmissão aérea visto que ela se encontra ao tempo.

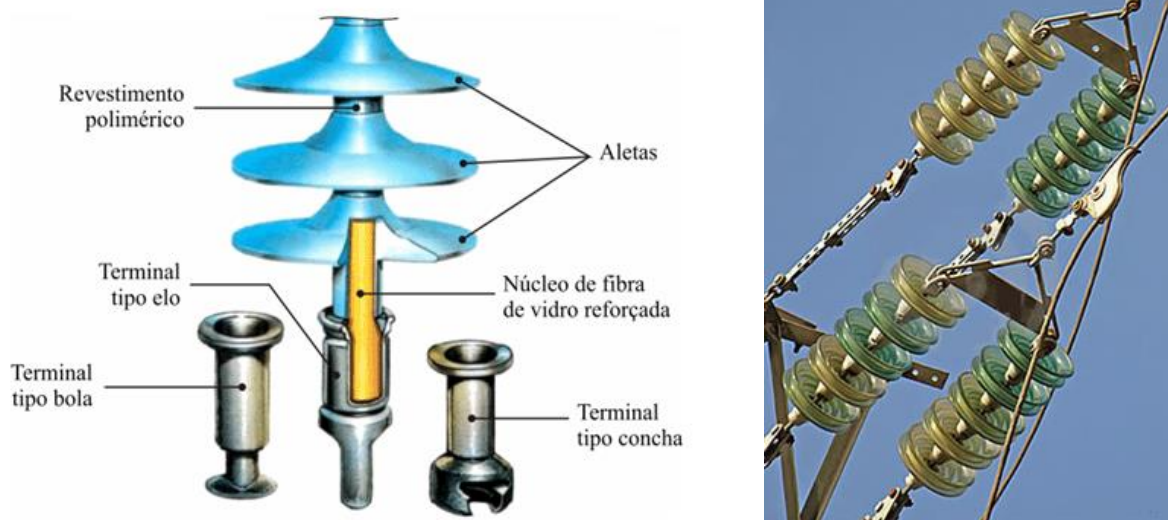
2.2.3.2 Torres

As torres possuem dupla função, ou seja, sustentação e espaçamento dos cabos condutores e para-raios. Podem ter várias configurações, formas e sistemas estruturais, conhecidas como estaiadas e autoportante.

2.2.3.3 Isoladores e demais componentes

A Figura 19 apresenta de forma detalhada o isolador bem como demais acessórios que compõem o mesmo.

Figura 19 – Isoladores e acessórios.



Fonte: (SILVA, 2017?).

2.3 ACIDENTES

Em meados de maio de 2016, fortes chuvas atingiram a região do estado de São Paulo em que se localiza a LT 440KV Bauru/Salto Grande, na ocorrência foram detectadas nove torres com avarias severas em suas estruturas (Figura 20). Sendo necessária a construção de variantes emergenciais para que o serviço de transmissão de energia continuasse.

Figura 20 – Torres retorcidas e deformadas após a chuva e consequências.



Fonte: (ENGELMIG ENERGIA, 2016).

Em maio de 2017, o trecho da linha de transmissão entre Água Clara e Três Lagoas, sob forte chuva teve 18 torres danificadas ou destruídas, sendo que quatro unidades caíram sobre a BR-262 (Figura 21), provocando interrupção total do trânsito entre os municípios citados.

Figura 21 – Estruturas caídas sobre a BR-262.



Fonte: (VIEGAS, 2015).

Em outubro de 2015, oito torres da LT Itumbiara/Rio Verde 2 (230Kv) foram destruídas (Figura 22), em um trecho próximo ao município de Santa Helena de Goiás após a região ser atingida por fortes chuvas e ventania.

Figura 22 – Torre retorcida e deformada em Santa Helena de Goiás.



Fonte: (SETOR ENERGÉTICO, SITE SUSTENTÁVEL, 2015).

No ano de 2011, ventos de aproximadamente 115 km/h derrubaram sete torres em Cascavel/PR (Figura 23).

Figura 23 – Torre caída na projeção horizontal sob análise dos técnicos da COPEL



Fonte: (CARAZZAI, 2011).

No ano de 2014, a LT Foz do Iguaçu/Ivaiporã de 765KV integrada ao sistema de distribuição da energia gerada na Usina Itaipu teve quatro torres destruídas após a região de Cafelândia ser atingida por fortes rajadas de ventos (Figura 24).

Figura 24 – Vista aérea do local atingido.

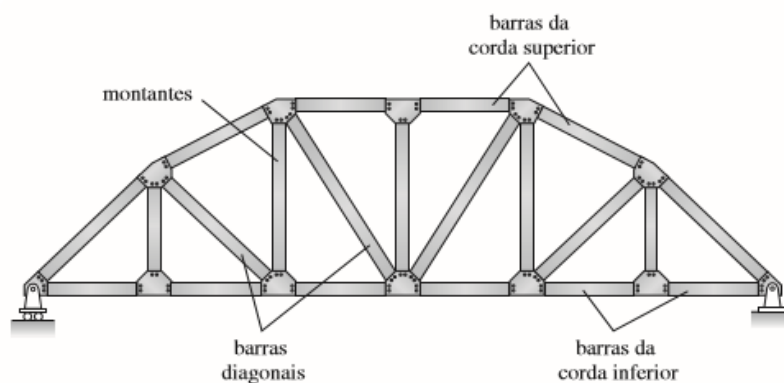


Fonte: (G1 PR, 2014).

2.4 TRELIÇAS

Segundo Gilbert, Leet e Uang (2009) a treliça é um elemento estrutural composto de um arranjo estável. Normalmente as subdivisões são triangulares de modo a obter um arranjo leve e eficiente. As peças podem ser ligadas pela soldagem ou parafusadas. Durante a concepção estrutural admite-se que as barras estão conectadas nas ligações por pinos sem atrito, obtendo desta forma apenas esforços axiais, ou seja, tração ou compressão. Na Figura 25 apresenta-se uma treliça, com a nomenclatura das peças.

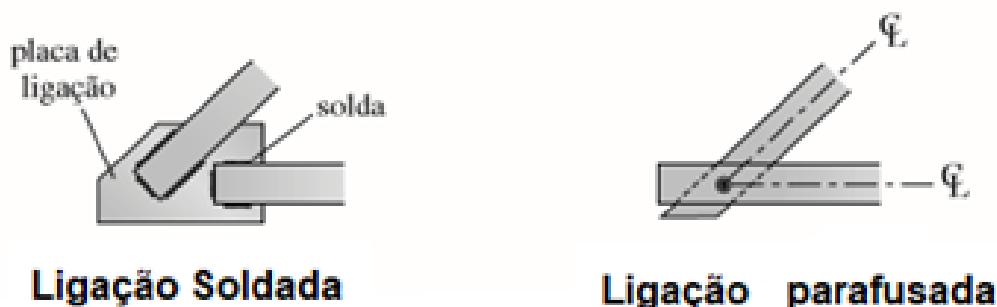
Figura 25 – Treliça com descrição das peças.



Fonte: (GILBERT, LEET e UANG, 2009).

Na Figura 26 apresentam-se uma união soldada e uma união parafusada.

Figura 26 – União soldada e união parafusada.



Fonte: (GILBERT, LEET e UANG, 2009).

2.4.1 Treliça espacial

Treliça espacial nada mais é do que um caso particular de estruturas reticuladas, ou seja, formada por barras, ligadas uma a outra por meio de nós, mas são tridimensionais ou popularmente conhecidas como estrutura espacial.

Segundo Souza e Gonçalves (2018?) as estruturas espaciais possui algumas particularidades na análise estrutural, seja na obtenção dos esforços internos, seja no dimensionamento propriamente dito. O ideal é admitir sempre uma treliça ideal, ou seja, nós articulados e carregamentos nos nós, de modo a obter somente esforços de tração e compressão.

Nas estruturas espaciais, ou seja, treliças tridimensionais, a ABNT-NBR 8800 (2007) considera que a análise de não linearidade geométrica seja considerada, pois os deslocamentos podem acrescentar esforços bem superiores aos encontrados em uma simples análise de 1ª ordem.

Dentre os principais parâmetros que definem o pré-dimensionamento com sucesso da treliça espacial, estão a relação altura / vão, os vínculos e o aproveitamento corretos dos módulos em relação ao tamanho. Este é o tipo de estrutura que possibilita uma beleza arquitetônica pela facilidade de modulação, fácil transporte, montagem com peso bem reduzido, além de possibilitar a ampliação e fácil desmontagem. A Figura 27 apresenta um modelo de treliça espacial, comumente utilizadas em galpões comerciais.

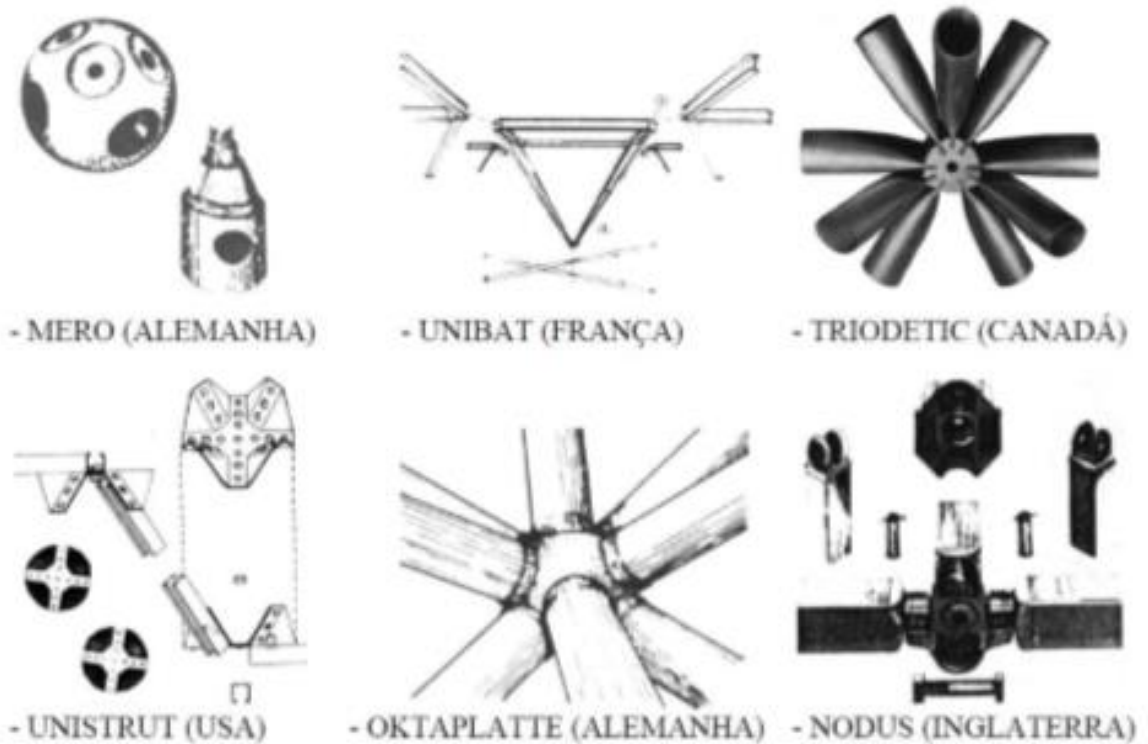
Figura 27 – Galpão executado com treliça espacial.



Fonte: (Portal Met@lica, 2018?).

A Figura 28 apresenta tipos de articulações usados em alguns países como soluções em sistemas estruturais de treliças espaciais. As articulações tem a função de unir as barras.

Figura 28 – Articulações de treliças espaciais.



Fonte: (Portal Met@lica, 2018?).

2.4.2 Análise das treliças

Segundo Gilbert, Leet e Uang (2009) uma treliça é considerada estaticamente determinada quando se encontra a intensidade da força, analisando se a mesma encontrada é de tração ou compressão, bem como suas reações de apoio e deslocamento dos nós. Para calcular as reações de uma treliça determinada, trata-se a estrutura inteira como um corpo rígido e aplicam-se as equações de equilíbrio estático, juntamente com as equações de condição que possam existir. Mas a análise utilizada é baseada em três condições importantes:

1. As barras são retas e só transmitem carga axial. Esse efeito implica em desprezar o peso próprio da barra. Caso o peso seja significativo, aplica-se metade dele como carga concentrada nos nós de cada extremidade da barra.
2. Os membros são conectados nos nós por pinos sem atrito. Isto é, nenhum momento pode ser transferido entre a extremidade de uma barra e o nó no qual ela se conecta.
3. As cargas são aplicadas somente nos nós.

2.5 ETAPAS DO PROJETO DE ELABORAÇÃO DE TORRES DE TRANSMISSÃO

De acordo com as diretrizes para execução de projetos básicos do Operador Nacional do Sistema Elétrico, ONS (2013), deve-se levar em conta algumas considerações na elaboração do projeto:

2.5.1 Definição do traçado preliminar

Segundo ONS (2013, p. 127):

Contribuem para a elaboração de um projeto básico robusto a análise das alternativas das possíveis rotas para a linha de transmissão e a escolha de um traçado preliminar o mais próximo daquele a ser implantado na fase do projeto executivo da linha.

Durante a definição do traçado da linha, mesmo que preliminar, devem-se evitar interferências que possam prejudicar a construção, manutenção e operação da linha. Alguns aspectos relacionados à escolha do traçado favorecem a implantação e manutenção da linha: a existência, na região, de infraestrutura para deslocamento de pessoal e transporte de materiais e equipamentos, tais como, rodovias, estradas e rios navegáveis, além da possibilidade de implantação de vias de acesso até a faixa de passagem; e a existência de terrenos planos ou pouco acidentados ao longo do traçado da linha.

Normalmente, o traçado preliminar da linha é definido com base nas informações advindas das cartas topográficas do IBGE, da Diretoria do Serviço Geográfico do Ministério do Exército ou de mapas gerados por ferramentas computacionais georreferenciadas.

2.5.2 Levantamento dos parâmetros meteorológicos

Segundo ONS (2013, p. 128):

Os parâmetros meteorológicos, necessários às avaliações elétricas e mecânicas do projeto básico, devem ser determinados, preferencialmente, com base nas informações oriundas das estações meteorológicas disponíveis na área de implantação do empreendimento.

Quando não houver medição disponível nas proximidades do empreendimento, os parâmetros meteorológicos poderão ser estimados com base nos dados das estações meteorológicas mais próximas ao empreendimento, ajustados em função da qualidade do dado ou das distâncias da linha às estações selecionadas.

As séries históricas de velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade do ar são confeccionadas a partir dos registros oriundos das estações meteorológicas, coletados ao longo dos anos.

2.5.3 Temperatura ambiente

Segundo ONS (2013, p. 128-129):

Os dados de temperatura ambiente são utilizados, nas avaliações de capacidade de corrente do condutor e no cálculo mecânico dos cabos.

As temperaturas ambientes mais utilizadas nas avaliações do projeto básico são: mínima absoluta; média das mínimas diárias; média; média das máximas diárias e máxima absoluta. Dependendo da avaliação a ser feita no projeto básico, adota-se uma ou mais temperaturas ambientes.

2.5.4 Velocidade de vento

Segundo ONS (2013, p. 130-131):

Os dados de velocidade de vento, parametrizados em diferentes formas, devem ser utilizados em várias análises do projeto básico, tais como: na avaliação da capacidade de corrente em regime permanente do condutor; no estudo de coordenação do isolamento das estruturas; na definição da largura da faixa de segurança; no cálculo mecânico dos cabos condutor e para-raios; e no dimensionamento mecânico das estruturas. [...]

Além disso, consta também que “para o projeto mecânico de uma linha de transmissão, os carregamentos oriundos da ação do vento nos componentes físicos da linha de transmissão devem ser estabelecidos a partir da caracterização probabilística das velocidades de vento da região, com tratamento para fenômenos meteorológicos severos, tais como, sistemas frontais, tempestades, tornados, furacões, etc”.

Segundo Gontijo (1994), fatores como viabilização do recurso energético, levantamento topográfico, escolha do tipo da torre e cálculo preliminar da estrutura é de suma importância, passando pelo custo da obra, projeto executivo, fabricação das peças e testes da linha.

2.6 NORMAS DE PROJETO

Segundo Brito (2010), para obter informações e diretrizes para projeto de dimensionamento de estruturas de modo geral, recomenda-se que os profissionais consultem as normas técnicas.

Dentre as normas técnicas relacionadas ao tema, cita-se:

- NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento (2003).
- NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (1980).
- NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações (1988).
- NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (1985).
- NBR 8850: Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão (1985).
- NBR 8842: Suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão (2010).
- NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios (2007).

2.7 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM ESTRUTURAS

Segundo Vaz (2011) o método dos elementos finitos (MEF) em análise de estruturas teve projeção a âmbito internacional na década de 50, em Londres, por meio de um grupo de engenheiros da Boeing, liderados pelo Professor Ray W. Clough. O método foi se desenvolvendo e amplamente divulgado chegando ao Brasil em 1970, com os primeiros trabalhos na COPPE-UFRJ. O método desenvolve-se de forma natural por meio de análise matricial de estruturas reticuladas, tendo como aliado o desenvolvimento computacional da época. O método consiste no uso de matrizes de rigidez e do conceito de cargas equivalentes nodais, podendo ser aplicado em análise estática de estruturas com comportamento linear elástico, estrutura com não linearidade física e geométrica, e análise dinâmica de estruturas. Na área de análise de estruturas, sua formulação pode ser feita a partir do Princípio da Mínima Energia Potencial Total, dos Métodos dos Resíduos Ponderados ou Princípios dos Trabalhos Virtuais.

Segundo Fernandes, Silva e Diacenco (2016) MEF, trata-se de uma análise matemática de uma estrutura discretizada em outras várias sub-estruturas batizadas de elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Na Figura 29 mostra-se um elemento discretizado e vários outros sub-elementos triangulares.

Figura 29 – Elemento discretizado.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidas por modelos matemáticos. Seu campo de aplicação vai desde indústria aeronáutica, aeroespacial, automobilística, chegando até a área de exploração de petróleo, podendo afirmar com muita segurança que o MEF na engenharia, é uma ferramenta de análise de diversos fenômenos físicos no projeto de diversos equipamentos.

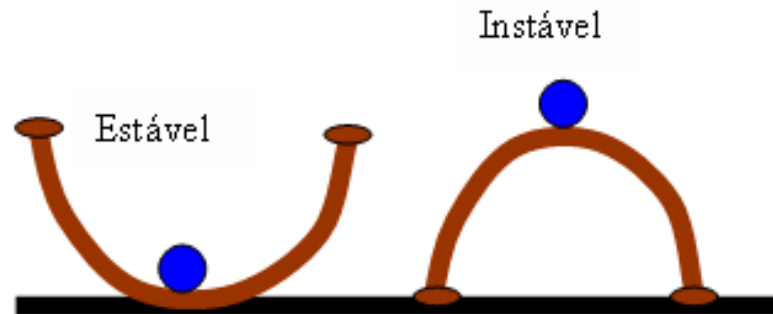
Segundo Galvão (2000) MEF é uma ferramenta fundamental para análise de estabilidade de sistemas estruturais, seja estabilidade global ou instabilidade local, envolvendo equações algébricas não lineares.

2.8 ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS

Segundo Galvão (2000) os avanços na área de novos materiais, tem levado a engenharia de estruturas a utilizar elementos cada vez mais leves, que conseqüentemente tendem a sofrer mais deformações, onde analisar a estabilidade destes elementos torna-se de extrema importância no dimensionamento da estrutura. Estudando a não linearidade geométrica pode-se levar a configurações estáveis e instáveis, chegando a pontos críticos de deformação.

Na Figura 30 apresentam-se duas situações de equilíbrio. A primeira tem-se uma esfera dentro de uma calota, em que qualquer que seja a perturbação na estrutura, a mesma se adapta ao sistema e volta ao equilíbrio, chama-se esta situação de equilíbrio estável. Na segunda situação tem-se a esfera sobre a calota, estrutura em equilíbrio instável, a eminência de um colapso e qualquer perturbação, a mesma perde sua forma original.

Figura 30 – Equilíbrio estável em relação ao equilíbrio instável.



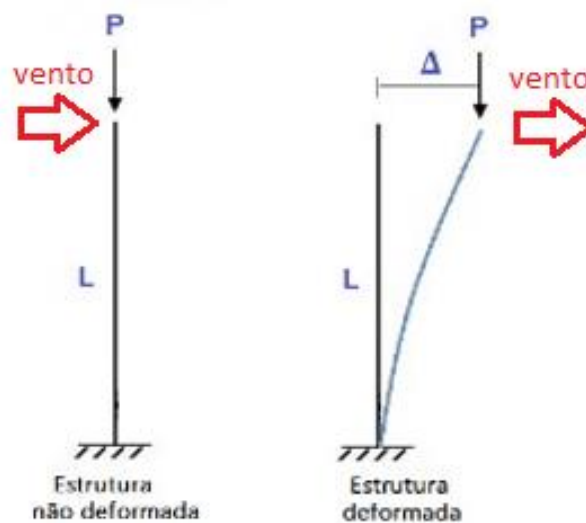
Fonte: Adaptado de <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=12436>.

2.8.1 Efeitos globais

Os efeitos globais de segunda ordem nada mais são do que efeitos provocados por deslocamentos nos topos dos membros, seja este um único elemento ou uma estrutura de modo geral. Conforme mostra a Figura 31, tem-se uma carga no topo do pilar, denominada carga P , e uma carga horizontal referente a ação variável do vento, que após a estrutura absorver estas cargas, a mesma deforma-se até manter-se novamente em equilíbrio, gerando um deslocamento no topo conhecido como Δ (delta).

Analisando a posição final da estrutura, ou seja, posição deformada, a mesma carga P além de gerar um esforço axial no pilar, gera uma carga de momento $= P \cdot \Delta$. Este acréscimo é conhecido como efeito de segunda ordem global.

Figura 31 – Estrutura deformada / não deformada em relação ao vento adotado.

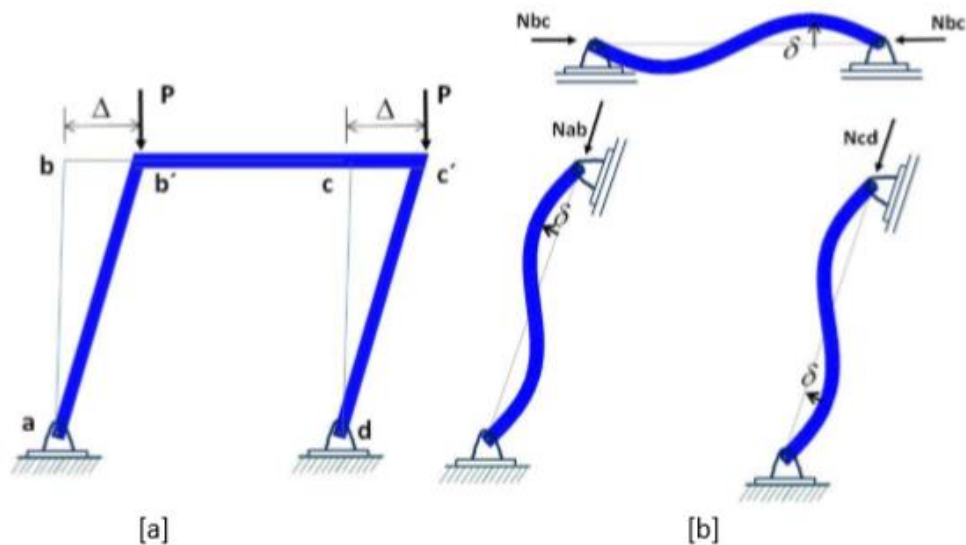


Fonte: (IGLESIA, 2016).

De acordo com a Figura 32, os efeitos de segunda ordem podem ser:

- Efeitos globais ($P-\Delta$) resultam dos deslocamentos relativos das extremidades dos elementos;
- Efeitos locais ($P-\delta$) resultam das deformações ao longo do comprimento do elemento.

Figura 32 – Efeito de 2ª ordem global $P-\Delta$ (A) e efeito de 2ª ordem local $P-\delta$ (B).



[a] Efeitos globais de 2ª ordem – [b] Efeitos locais de 2ª ordem.

Fonte: (SOUZA, MIGUEL, *et al.*, 2016).

2.8.2 Sensibilidade a deslocamento das estruturas

Segundo ABNT-NBR 8800 (2007), item 4.9.4 – Classifica-se as estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais em estruturas de pequena, média ou grande deslocabilidade.

- Uma estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade quando, em todos os seus andares, a relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, em todas as combinações últimas, for igual ou inferior a 1,1.
- Uma estrutura é classificada como de média deslocabilidade quando a máxima relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, considerando todos os andares e todas as combinações últimas, for superior a 1,1 e igual ou inferior a 1,4.
- Uma estrutura é classificada como de grande deslocabilidade quando a máxima relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, considerando todos os andares e todas as combinações últimas, for superior a 1,4. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 34-35)

De acordo com a ABNT-NBR 8800 (2007) item 4.9.4.8 a relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base, obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem pode ser aproximada de maneira aceitável pelo valor do coeficiente B_2 , calculado de acordo com o anexo “D” da NBR 8800, sem a consideração das imperfeições iniciais de material.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_m} \frac{\Delta_{1h} \sum N_{SD}}{h \sum H_{SD}}}$$

Sendo que:

$\sum N_{SD}$ é o somatório das forças axiais solicitantes de cálculo em todos os pilares e outros elementos resistentes a cargas verticais (inclusive nos pilares e outros elementos que não pertençam ao sistema resistente a ações horizontais), no andar considerado;

R_m é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde o sistema resistente a ações horizontais é constituído apenas por subestruturas de contraventamento formadas por pórticos nos quais a estabilidade lateral é assegurada pela rigidez à flexão das barras e pela capacidade de transmissão de momentos das ligações e igual a 1,0 para todas as outras estruturas;

Δ_{1h} é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento) do andar considerado, obtido da análise de primeira ordem. Se Δ_{1h} possuir valores diferentes em um mesmo andar, deve ser tomado um valor ponderado para esse deslocamento, em função da proporção das cargas gravitacionais aplicadas ou, de modo conservador, o maior valor;

$\sum H_{Sd}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais atuantes, usadas para determinar Δ_{1h} ;

h é a altura do andar (distância entre eixos de vigas). (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 132-133)

2.8.3 Método de amplificação de esforços

Souza, Pereira e Nardin (2016) afirmam que os procedimentos para análise não linear geométrica apesar de terem as mesmas origens normativas, possuem diferentes metodologias de aplicação, sendo a maioria de procedimentos simplificados, mas permitem análises mais rigorosas.

No quadro 4 apresenta um resumo sobre os modelos das análises de estruturas considerando a sensibilidade das estruturas a deslocamentos laterais. Esses métodos são baseados nos critérios normativos da ABNT-NBR 8800 (2007).

Quadro 4 – Classificação da estrutura quanto à deslocabilidade.

CLASSIFICAÇÃO	Pequena deslocabilidade $B_2 \leq 1,1$ Em todos os pavimentos.	Média deslocabilidade $1,1 < B_2 \leq 1,4$	Grande deslocabilidade $B_2 > 1,4$
Modelos de Análise	Análise em 1ª ordem se as forças axiais de cálculo nas barras que participam do sistema de estabilidade lateral não superam 50% da força axial de plastificação. Imperfeições geométricas iniciais devem ser incluídas na análise.	Análise de 2ª ordem simplificada utilizando os parâmetros B_1 e B_2 calculados com a rigidez reduzida dos elementos da estrutura. As forças nocionais não devem ser somadas às ações laterais.	Deve ser feita análise de 2ª ordem rigorosa incluindo imperfeições geométricas e de material.
Imperfeições do Material	NÃO CONSIDERAR	Reduzir a rigidez à flexão e à compressão dos elementos para $0,8EI$ e $0,8EA$, respectivamente.	

Fonte: (SOUZA, PEREIRA e NARDIN, 2016).

De acordo com item 4.9.7.1.3 da ABNT-NBR 8800 (2007) os esforços solicitantes devem ser obtidos considerando-se os efeitos globais e locais de segunda ordem sendo que o método da amplificação dos esforços solicitantes (MAES), dado no Anexo “D” (NBR 8800), pode ser considerado uma aproximação aceitável para análise de segunda ordem.

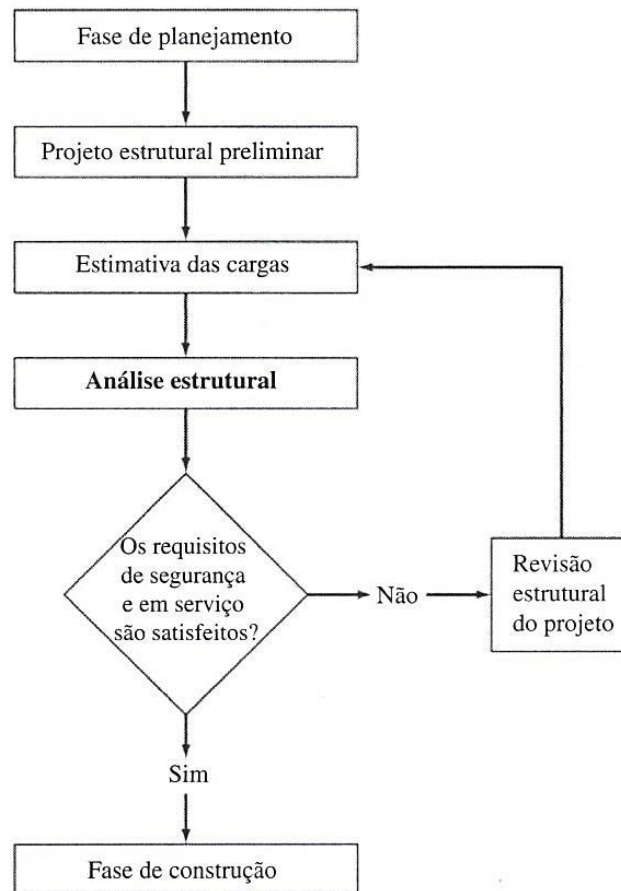
Todos os itens referentes ao MAES, bem como o anexo “D” da referida norma, estão disponíveis no apêndice deste trabalho.

2.9 ANÁLISE ESTRUTURAL

Segundo Kassimali (2015), a análise estrutural é uma estimativa do desempenho de uma determinada estrutura, sob cargas externas, variação de temperatura e movimentos de apoio resultando em tensões, esforços solicitante como forças normais, cortantes e momentos fletores, bem como deslocamentos e reações de apoio.

Na Figura 33 demonstra-se as fases de planejamento de um projeto estrutural, onde envolvem requisitos funcionais, arranjos, dimensões da estrutura com o possível tipo da estrutura. Segundo Kassimali (2015), essa fase pode envolver fatores como estética, impacto ambiental, sendo o resultado um sistema estrutural mais econômico.

Figura 33 – Fases de um projeto de engenharia de estruturas típico.



Fonte: (KASSIMALI, 2015).

Na fase preliminar as dimensões do sistema estrutural são estimadas com base em boas práticas de projeto, experiências de obras já realizadas e exigências normativas. As dimensões assim selecionadas são utilizadas para estimar o peso da estrutura. Estimativa de cargas envolve todos os carregamentos que podem agir na estrutura, de forma concomitante ou isolada. Na análise estrutural, os valores dos carregamentos são analisados de forma a obter-se as tensões resultantes nos elementos e os deslocamentos nos vários pontos da estrutura. Na verificação de segurança, analisam-se os resultados verificando se a estrutura satisfaz ou não os requisitos de segurança. Caso esses requisitos sejam alcançados, confeccionam-se os desenhos de projetos e recomendações construtivas e caso não atenda, o projeto deverá ser revisado e todos os procedimentos repetidos até satisfazer todos os requisitos.

De acordo com Martha (2010) a análise estrutural é uma fase de suma importância para um projeto de estruturas, onde deve haver uma previsão do comportamento da estrutura. Este comportamento pode ser expresso por diversos parâmetros como tensões, deformações e

deslocamentos da estrutura, tendo como objetivo final a determinação dos esforços solicitantes para dimensionamento da mesma.

De acordo com Viero (2011) a determinação dos esforços internos em estruturas isostáticas, independe das características dos materiais, dependendo única e exclusivamente da forma geométrica e dos esforços externos ativos e reativos. A determinação destes esforços é de importância fundamental para o correto dimensionamento das peças estruturais.

Segundo Almeida (2009) os objetivos da análise estrutural são três, sendo eles a determinação dos esforços solicitantes internos, determinação das reações de apoio e determinação dos deslocamentos em qualquer ponto da estrutura. Fatores esses que influenciam diretamente em quais materiais serão adotados, tipo de estruturas de suporte e verificações de estados limites de serviços.

De acordo com Süsskind (1984) a análise estrutural é a parte da mecânica que estuda as estruturas, consistindo este estudo na determinação dos esforços e das deformações a que elas ficam submetido quando solicitadas por agentes externos.

2.9.1 Métodos de análise estrutural.

Segundo Aragão Filho (2013) a análise estrutural pode ser dividida em dois grupos, sendo eles os métodos analíticos e métodos numéricos.

2.9.1.1 Métodos analíticos

Possuem limitações bem conhecidas, mas conforme a configuração da estrutura podem ser admitidas algumas simplificações para obter as soluções, lembrando que em estruturas complexas os métodos numéricos devem ser invariavelmente empregados.

2.9.1.2 Métodos numéricos

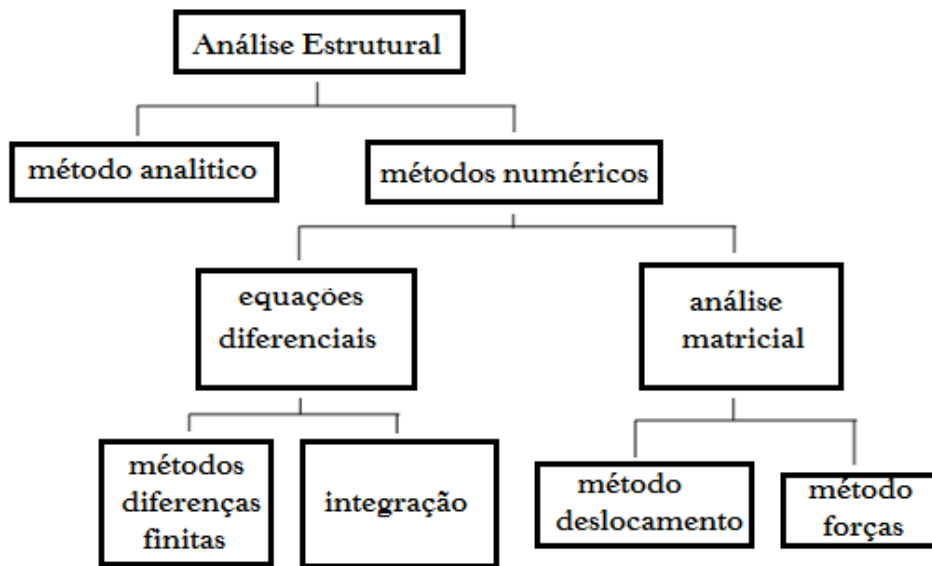
Os métodos numéricos de análise estrutural podem ser subdivididos em dois tipos: Soluções numéricas de equações diferenciais para deslocamentos ou tensões, e métodos matriciais baseados na idealização discreta em elementos estruturais.

No primeiro tipo, baseado em equações da elasticidade, por técnicas de diferenças finitas quanto pela integração numérica direta.

No segundo tipo, toda teoria é desenvolvida com auxílio da álgebra matricial, idealizada com uma montagem de elementos estruturais discretos, onde deve haver o equilíbrio de forças e a compatibilidade de deslocamentos nas junções desses elementos.

Na Figura 34 apresenta-se um resumo das possíveis soluções dentro da análise estrutural.

Figura 34 – Soluções em análise estrutural.



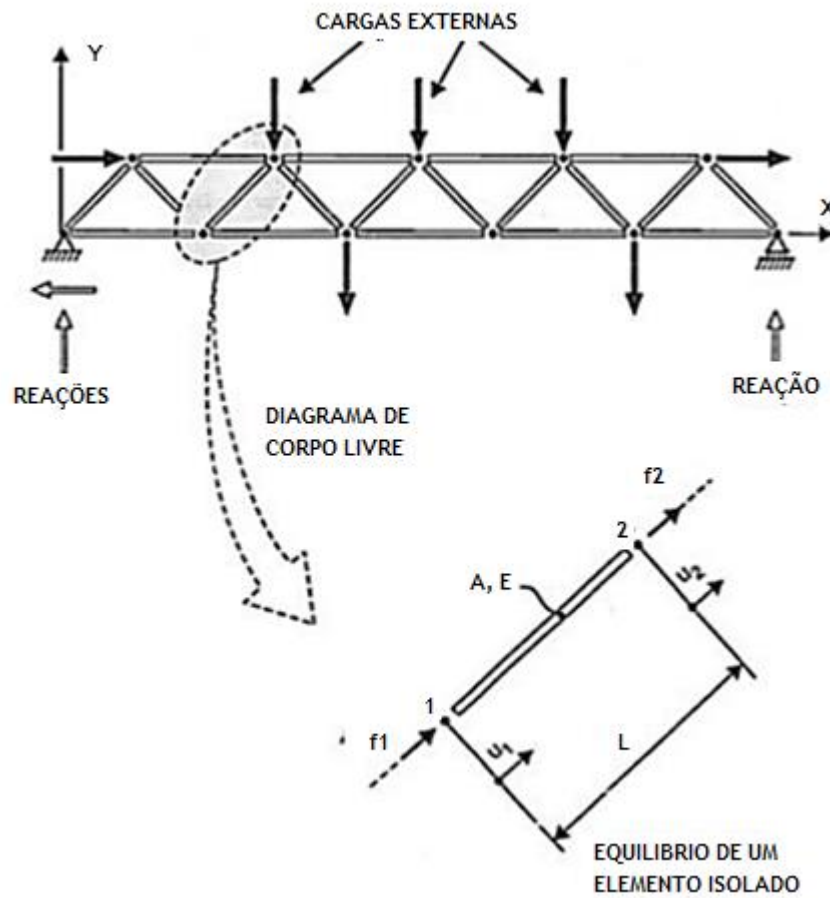
Fonte: (ARAGÃO FILHO, 2013)

2.9.2 Análise matricial

2.9.2.1 Elemento barra

Segundo Kassimali (2015), elementos reticulados podem ser estudados a partir dos deslocamentos das extremidades do elemento na direção do centróide da peça. Na Figura 35 apresenta-se uma estrutura treliçada, representando o elemento barra.

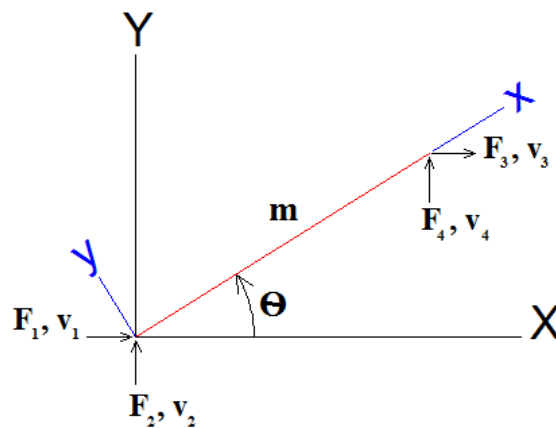
Figura 35 – Estrutura treliçada.



Fonte: (KASSIMALI, 2015).

Na Figura 36 apresenta-se um elemento barra inserido no sistema de coordenada global.

Figura 36 – Elemento barra no sistema de coordenadas globais.



Fonte: Adaptado – (KASSIMALI, 2015).

As relações de rigidez para o elemento no sistema de coordenada local é expresso:

$$Q = Ku \quad [1]$$

Sendo Q = vetor força; u = vetor deslocamento e K = matriz de rigidez do elemento no sistema de coordenada local.

$$[K] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [2]$$

Sendo E = módulo de elasticidade longitudinal do material; A = área da seção transversal da barra e L= comprimento da barra.

$$\begin{Bmatrix} F1x \\ F2y \\ F3x \\ F4y \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v1x \\ v2y \\ v3x \\ v4y \end{Bmatrix} \quad [3]$$

$$\{Q\}_{xy} = [K]_{xy} \{u\}_{xy} \quad [4]$$

Após definir os vetores força e deslocamento e a matriz de rigidez do elemento barra, deve-se compatibilizar o sistema local com o sistema global de coordenadas. Desta forma deve-se considerar o ângulo existente entre o elemento barra e o eixo de coordenadas global, onde o ângulo formado será θ , admitindo positivo no sentido anti-horário. Aplica-se a matriz de transformação de coordenadas [T].

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad [5]$$

Desta forma, transforma-se a matriz de rigidez local em matriz de rigidez global do elemento.

$$[K]_{XY} = [T][K]_{xy}[T]^t \quad [6]$$

Sendo $[K]_{XY}$ = matriz de rigidez global do elemento; [T] = matriz de transformação de coordenadas; $[K]_{xy}$ = matriz de rigidez local do elemento; $[T]^t$ = transposta da matriz de transformação de coordenada.

$$[K]_{XY} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [7]$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad [8]$$

Organizando tem-se:

$$[K]_{XY} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta & -\cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta & -\sin^2 \theta \\ -\cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & -\sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad [9]$$

As treliças tem N elementos de barras, interligados em suas extremidades, ou seja, seus nós, onde tem-se a aplicação dos carregamento e fixação dos apoios reativos. Em muitas literaturas os nós podem ser também conhecidos como articulações ou junções. Diante desta quantidade N de elementos barras, deve-se analisar de forma global a estrutura, transformando a matriz de rigidez global do elemento $[K]_{XY}$ em uma matriz única chamada matriz de rigidez global do sistema. Para a correta organização dos N elementos de barra diante do sistema por completo, deve-se haver um endereçamento correto do nó do sistema local, com o seu respectivo nó do sistema global.

Sendo:

Número do deslocamento global na direção X = 2 * (nó global do elemento) - 1.

Número do deslocamento global na direção Y = 2 * (nó global do elemento).

2.9.2.2 Treliça espacial

Segundo Kassimali (2015) as treliças tridimensionais (3-D) ou popularmente conhecidas como treliças espaciais, podem ser modeladas usando o elemento de barra, desde que as conexões entre os elementos sejam tais que apenas a carga axial seja transmitida. A análise de uma treliça tridimensional usando elementos de barra é frequentemente valiosa na obtenção de estimativas preliminares de tensões de membros, que no contexto do projeto, é valiosa na determinação das propriedades estruturais requeridas.

$$\lambda = \frac{1}{L} [(x_j - x_i)i + (y_j - y_i)j + (z_j - z_i)k] \quad [10]$$

Ou

$$\lambda = \cos \theta_x I + \cos \theta_y J + \cos \theta_z K \quad [11]$$

Sendo que λ = comprimento da barra.

Assim, os deslocamentos dos elementos são expressos em componentes no sistema global 3-D.

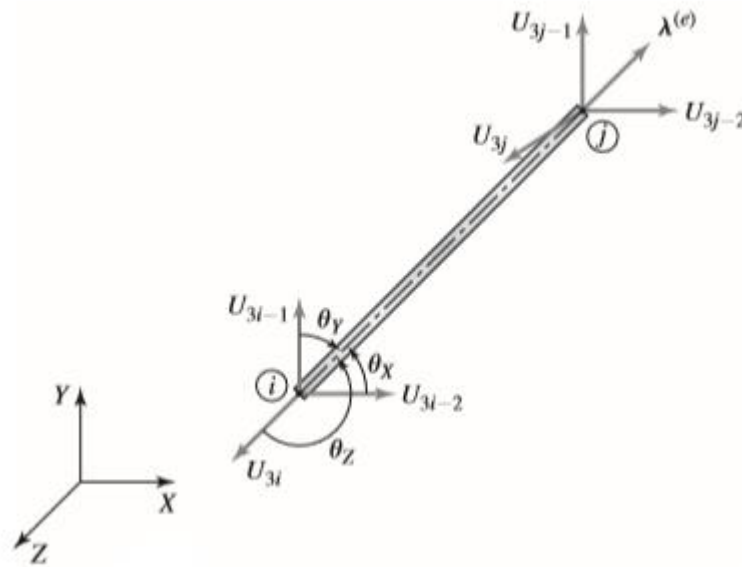
$$u_1 = U_1 \cos \theta_x + U_2 \cos \theta_y + U_3 \cos \theta_z \quad [12]$$

$$u_2 = U_4 \cos \theta_x + U_5 \cos \theta_y + U_6 \cos \theta_z \quad [13]$$

Usa-se a notação de que os deslocamentos de elemento 1 e 4 estão na direção X global, os deslocamentos 2 e 5 estão na direção Y global e os deslocamentos de elemento 3 e 6 estão na direção Z global.

A Figura 37 apresenta um elemento de barra em um sistema de coordenadas global 3D.

Figura 37 – Elemento barra em um sistema de coordenadas global 3D.



Fonte: (HUTTON, 2004).

De forma análoga a equação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} u_1^{(e)} \\ u_2^{(e)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \cos \theta_y & \cos \theta_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_x & \cos \theta_y & \cos \theta_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1^{(e)} \\ U_2^{(e)} \\ U_3^{(e)} \\ U_4^{(e)} \\ U_5^{(e)} \\ U_6^{(e)} \end{Bmatrix} \quad [14]$$

$$= [R]\{U^{(e)}\} \quad [15]$$

Sendo que $[R]$ é a matriz de transformação que mapeia os deslocamentos de elementos unidimensionais em um sistema de coordenadas global tridimensional. A matriz de rigidez do elemento no sistema de coordenadas local é transformada nas coordenadas globais 3-D através de:

$$[K] = [R]^T \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} [R] \quad [16]$$

Onde deve-se substituir pela matriz de transformação $[R]$ e executar os resultados de multiplicação em:

$$[K] = k \begin{bmatrix} Cx^2 & CxCy & CxCz & -Cx^2 & -CxCy & -CxCz \\ CxCy & Cy^2 & CyCz & -CxCy & -Cy^2 & -CyCz \\ CxCz & CyCz & Cz^2 & -CxCy & -CyCz & -Cz^2 \\ -Cx^2 & -CxCy & -CxCz & Cx^2 & CxCy & CxCz \\ -CxCy & -Cy^2 & -CyCz & CxCy & Cy^2 & CyCz \\ -CxCz & -CyCz & -Cz^2 & CxCz & CyCz & Cz^2 \end{bmatrix} \quad [17]$$

Tem-se matriz de rigidez global 3-D para o elemento de barra unidimensional, sendo que:

$$Cx = \cos \theta_x$$

$$Cy = \cos \theta_y$$

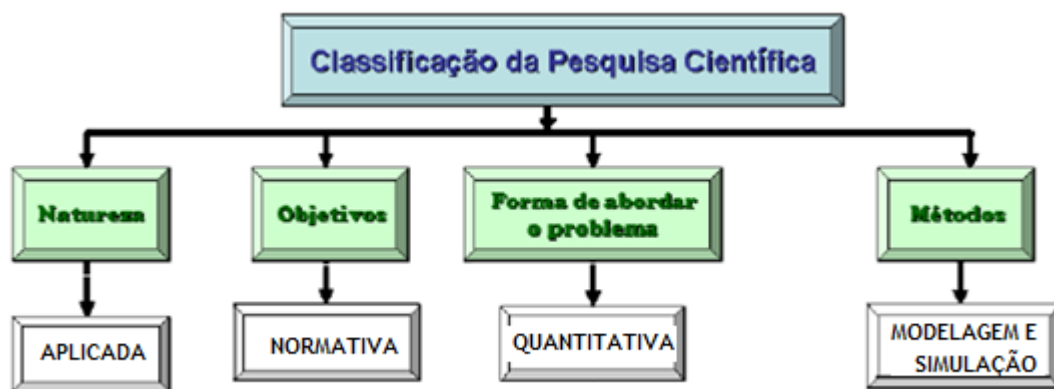
$$Cz = \cos \theta_z$$

A montagem da matriz de rigidez global (portanto, as equações de equilíbrio) é idêntica ao procedimento discutido para o caso bidimensional, com a exceção óbvia de que três deslocamentos devem ser contabilizados em cada nó.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de uma pesquisa aplicada onde se espera que os resultados sejam utilizados na solução de problemas reais, áreas acadêmicas voltadas à pesquisa, objetivando o desenvolvimento de políticas, estratégias e ações para aperfeiçoar os resultados disponíveis na literatura existente. Abordagem quantitativa, utilizando método de simulação e modelagem. Na Figura 38, tem-se um panorama geral da pesquisa.

Figura 38 – Classificação da pesquisa adotada no projeto.



Fonte: Adaptado de Mello e Turrioni (2007).

O presente estudo trata-se da análise de estabilidade de torres metálicas treliçadas, para uso exclusivo em linhas de transmissão de energia. Dentre os objetivos propostos fez-se necessário a elaboração de uma planilha digital que contemplasse a análise global de segunda ordem. A planilha foi elaborada no software Excel 360, devido ao fácil acesso, praticidade de utilização e capacidade em resolver cálculo matricial, tornando-o apto para o uso do MEF. Algumas rotinas foram desenvolvidas em programação VBA (*visual basic advanced*)

A planilha contempla dados provenientes da linha de transmissão, considerando cargas permanentes relacionadas ao peso próprio da estrutura, cargas variáveis de vento e temperatura, atuando diretamente no cabo condutor e para-raios, análise estrutural de primeira ordem e análise simplificada de segunda ordem, por meio do MAES (método de amplificação de esforços solicitantes), considerando a sensibilidade da estrutura a deslocamento e finalizando com dimensionamento das peças a esforços de tração e compressão. Lembrando que a carga de vento é admitida segundo a ABNT-NBR 5422 (1985) e a análise estrutural e dimensionamento das barras segundo a ABNT-NBR 8800 (2007).

O software apresenta também uma tela gráfica simulando o modelo em três dimensões, podendo o usuário verificar se a estrutura está geometricamente correta.

A calibração foi feita com o auxílio de um programa específico de MEF na versão Try e um software comercial de dimensionamento de estruturas metálicas. Os dados comparativos estão apresentados no capítulo 4.

3.1 EQUIPAMENTO E SOFTWARES

Equipamento: Laptop Acer - processador Intel® Core™ i7-5500 U CPU @ 2.40GHz, 8,00 Gb de memória RAM – Sistema operacional de 64 bits Windows 10 Home Single Language.

Local: laboratório de informática da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, campus da UNESP.

3.1.1 Softwares

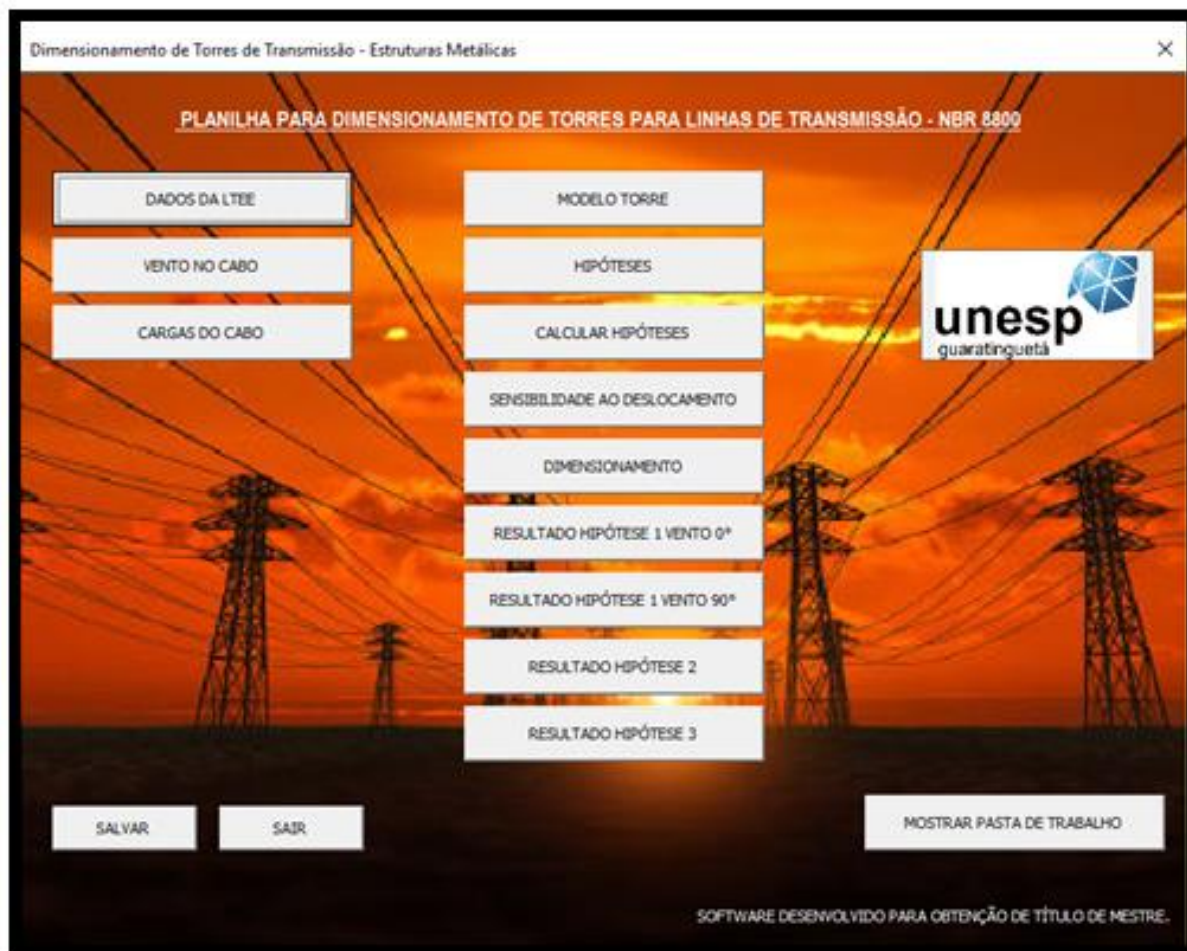
Para elaboração deste trabalho científico utilizou-se três softwares:

- Excel: versão home 360 com assinatura mensal registrada no recibo de pagamento 27376106 de 14 ago. 2018 da empresa Microsoft Corporation;
- SAP2000: versão Evaluation obtida através do link <https://csiamerica.com/support/downloads/software-evaluation-request?productnid=221&product=1> e download do website: <http://installs.csiamerica.com/software/SAP2000/20/SAP2000v2000EvalSetup.exe>. Trata-se de um software já consagrado por usuários do MEF e foi utilizado para validação das planilhas de deslocamento dos nós e esforços solicitantes das barras desenvolvidas no Excel.
- Metálica 3D: versão profissional registrada no nome de Fabiano Dias da Silva – Hardlock 81977, comercializado pela empresa Multiplus (<https://multiplus.com>). Software referência nos grandes escritórios de desenvolvimentos de projetos de estruturas metálicas e foi utilizado para validação das planilhas de deslocamento dos nós, esforços solicitantes e dimensionamento das barras desenvolvidas no Excel.

3.2 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE

A Figura 39 apresenta a tela principal do software desenvolvido, onde se tem diversos botões de controle. Cada botão tem uma função específica que será demonstrado e explicado no decorrer deste capítulo.

Figura 39 – Tela principal do projeto de pesquisa.

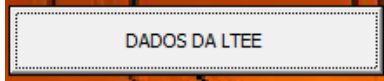


Fonte: Produção do próprio autor.

A operacionalidade do programa está demonstrada de forma didática e em etapas. No decorrer das etapas será comentado sucintamente as considerações importantes das normas relacionadas, de modo que o usuário possa tomar as decisões referentes as condições de contorno do projeto. Esta fase se divide em três etapas: concepção estrutural, análise estrutural e dimensionamento das barras.

3.2.1 Concepção estrutural.

O software é específico para linha de transmissão de energia e existem duas fases distintas dentro da concepção estrutural. Primeiramente o usuário deverá acionar o botão



. Este botão irá solicitar dados referente a LTEE (Linha de Transmissão de Energia Elétrica) em estudo, ou seja, condições de contorno do sistema.

3.2.1.1 Pré-dimensionamento dos cabos.

Nesta etapa será pré-dimensionado os cabos de condução de energia e cabos para-raios.

Input no software:

- Local de implantação da torre;
- Potência fornecida da linha;
- Quantidade de circuitos;
- Cota altimétrica da base da torre em relação ao nível do mar;
- Altura da torre;
- Vão entre torres da linha de transmissão;
- Nível de rugosidade do terreno em relação à pressão do vento;

A Figura 40 apresenta a tela de inserção de dados para o pré-dimensionamento dos cabos condutores e parâmetros para cálculo da carga de vento.

Figura 40 – Input de dados para dimensionamento.

Menu Inicial

DADOS PRELIMINARES DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

CAPACIDADE DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

POTÊNCIA: MVA

LT: kV

CIRCUITOS:

DETERMINAÇÃO DA CORRENTE COM CAPACIDADE DE 85%:

$$I = \frac{N}{\sqrt{3} \times V} = 213,3686 \text{ A}$$

CORRENTE POR CABO

$$I = \frac{I}{n} = 213,3686 \text{ A}$$

CABO CAA PRÉ DIMENSIONADO:

CABO CAA UTILIZADO:

CABO PARA RAIÓ UTILIZADO:

ISOLADOR DE SUSPENSÃO PADRÃO:

PESO: 4,60 kg

DIAMETRO: 0,2550 m

PASSO: 0,1460 m

DADOS CABO CAA

PESO: 0,2160 kg/m

DIAMETRO: 0,0101 m

CARGA RUP: 19350 N

DADOS CABO PARA RAIÓ

PESO: 0,3050 kg/m

DIAMETRO: 0,0079 m

CARGA RUP: 50031 N

CARACTERÍSTICAS DA TORRE INSTALADA:

REGIÃO INSTALADA:

ALTITUDE DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

ALTITUDE: m

VB VENTO: 36 m/s m/s

TEMP. MIN: -4 °C °C

TEMP. MED: 16 °C °C

TEMP. MÁX: 36 °C °C

CATEGORIA DO TERRENO:

ALTURA MÁXIMA DA TORRE: m

CASO TENHA INFORMAÇÕES DO LOCAL:

Coefficiente de rugosidade kr= 1,0800

Coefficiente de correção do período de integração (t) kd= 1,1500


Coefficiente de correção de altura da torre kh= 1,0595

VÃO DE PESO = VÃO DE VENTO PARA TORRE NIVELADA:

V1 m

V2 m

$$V_v = \frac{v_1 + v_2}{2} = 10,0000 \text{ m}$$



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a inserção dos dados o usuário deverá clicar no botão menu inicial

Menu Inicial

Output: Pré-dimensionamento dos cabos condutores e para-raios. Automaticamente o software calcula os pesos próprios dos cabos, pressão do vento nos cabos e a reação dos cabos na torre.

A Figura 41 apresenta os cálculos referentes a cargas de vento segundo ABNT-NBR 5422 (1985). A tela é autoexplicativa e apresenta toda formulação utilizada nos cálculos.

Figura 41 – Cargas de vento.

CALCULO DE TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA - NBR 5422

ACÇÕES DO VENTO ATUANTES NA TORRE DE TRANSMISSÃO

VELOCIDADE DE VENTO DE PROJETO Menu Inicial

$$V_p = k_r * k_d * k_h * V_b = 26,3171 \text{ m/s}$$

ACÇÃO DO VENTO;
PRESSÃO DINÂMICA: $p = \frac{1,293}{1+0,00367T} * \left(\frac{16000+64T-ALT}{16000+64T+ALT} \right) = 1,2073 \text{ kg/m}^3$

$$q_0 = \frac{p V^2}{2} = 418,0645 \text{ N/m}^2$$

VENTO NOS CABOS CONDUTORES:

$$F_{vcc} = q_0 * a * d = 4,3295 \text{ N/m} \quad a = 1,02$$

VENTO NOS CABOS PARA RAIOS:

$$F_{vcp} = q_0 * a * d = 3,4002 \text{ N/m}$$

VENTO NOS ISOLADORES:

$$F_{vi} = q_0 * C * S = 18,6774 \text{ N} \quad S = 0,0372 \quad C = 1,2$$

p= Massa específica do ar
a= fator de efetividade
d= diâmetro do cabo
C= Coeficiente de arrasto
S= Seção transversal

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 42 apresenta os cálculos referentes a cargas nos cabos segundo NBR 5422 (1985). A tela é autoexplicativa mostra toda formulação utilizada nos cálculos.

Figura 42 – Cargas nos cabos.

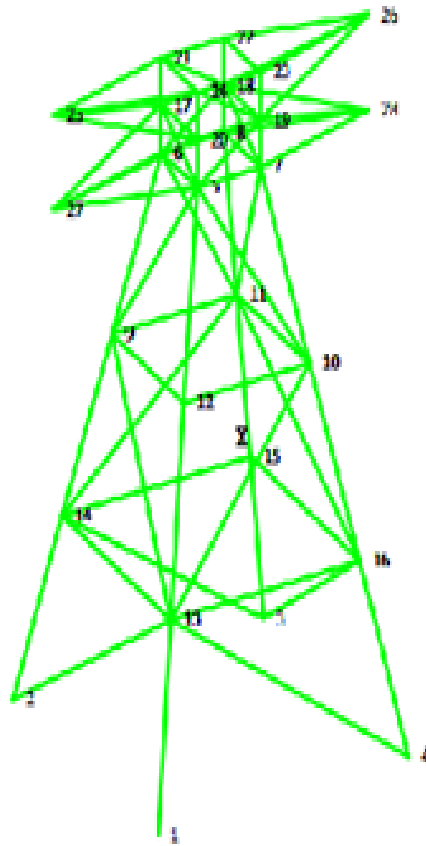


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1.2 Dados da torre

A Figura 43 apresenta uma ilustração feita na planilha Excel para melhor representar o esboço da torre.

Figura 43 – Esboço 3D torre.



Fonte: Produção do próprio autor.

Input no software:

3.2.1.2.1 Coordenadas dos nós e definição das barras

As coordenadas dos nós devem ser inseridas no software em coordenadas cartesianas X, Y e Z, sendo que a direção X representa o eixo com inserção do vento a 0° ou seja, perpendicular a direção do cabo, a direção Z representa o eixo com inserção do vento a 90° e a direção Y representa o eixo referente as cotas altimétricas da torre e sentido das cargas gravitacionais.

Além das coordenadas dos nós, o usuário deve inserir para cada barra qual é o número do nó inicial e final da barra. A Figura 44 mostra a tela de *input* dos dados acima mencionados discriminando o local exato de cada inserção. Os dados de comprimento devem ser inseridos no sistema internacional com a unidade em metros [m]. Conforme já mencionado anteriormente, os nós podem ser conhecidos também como junções.

Figura 44 – Campo de inserção de dados.

Junções: Campo para inserir as coordenadas das junções da estrutura..

Junções	x	y	z
Junção 1	0	0	0
Junção 2	0	0	3
Junção 3	3	0	3

Barras: Campo para inserir a junção inicial e final da barra.

Barra	Junção a	Junção b
Barra 1	1	5
Barra 2	2	6
Barra 3	3	7
Barra 4	4	8

Fonte: Produção do próprio autor.

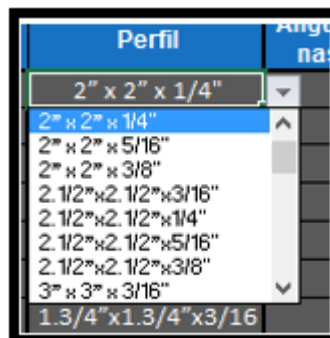
3.2.1.2.2 Seção das barras

Por se tratar de análise matricial, o cálculo da rigidez K depende exclusivamente da área da seção transversal da barra, modulo de elasticidade longitudinal do material e o comprimento da barra. O software permite que o usuário escolha diversos perfis do tipo cantoneira de abas iguais da marca Gerdau, em que o software busca automaticamente a área referente aquele perfil escolhido.

O software calcula automaticamente o comprimento da barra por meio das coordenadas iniciais e finais de cada nó e vem instalado como *default* o valor do modulo de elasticidade longitudinal do aço, $E_{aço} = 206 * 10^9$ [MPa] e também por *default* o peso específico $\gamma_{aço} = 78.5$ [kN / m³].

No apêndice B deste trabalho, a Tabela 20 contém a relação completa de todos os perfis e todas as características geométricas das peças. A Figura 45 mostra a tela de *input* dos dados acima mencionados discriminando o local exato de cada inserção.

Figura 45 – Seções das barras tipo cantoneira.

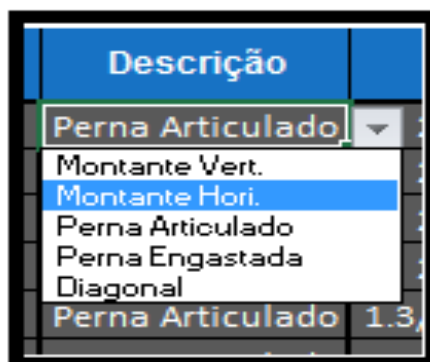


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1.2.3 Grupos e descrição das barras

Por questões de simetria da torre, é importante que as barras estejam dispostas em grupos de modo a otimizar operações computacionais. Para isto o usuário deve selecionar se a barra é uma perna engastada, perna articulada, montantes verticais, montantes horizontais e diagonais. Esta definição é de extrema importância visto que interfere diretamente no comprimento da barra, pois este parâmetro é multiplicado pelo coeficiente de flambagem K . Para as pernas engastadas o coeficiente K vale 0,7 e deve ser atribuído para as barras chumbadas diretamente na fundação e para as demais consideradas articuladas vale 1,00. Valores apresentados encontram-se no anexo E da NBR 8800 (2007) e reproduzido no apêndice A deste trabalho. A Figura 46 mostra a tela de *input* dos dados acima mencionados discriminando o local exato de escolha da descrição das barras.

Figura 46 – Descrição das barras.



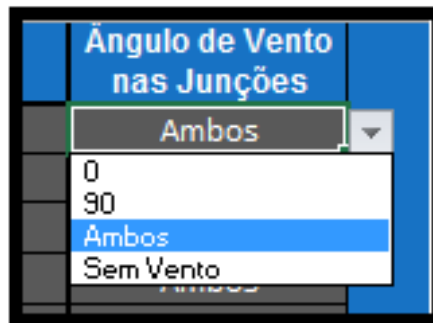
Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1.2.4 Incidência dos ventos nas barras

O usuário deverá escolher em quais nós haverá incidência de vento. O software apresenta quatro possibilidades de vento incidindo na estrutura, sendo vento a 0° , 90° , ambas as direções e sem incidência de vento. Desta forma o usuário poderá fazer várias simulações de ventos em diferentes direções, bem como simulação sem incidência de vento. O software automaticamente irá aplicar nos nós uma carga equivalente referente àquela ação do vento.

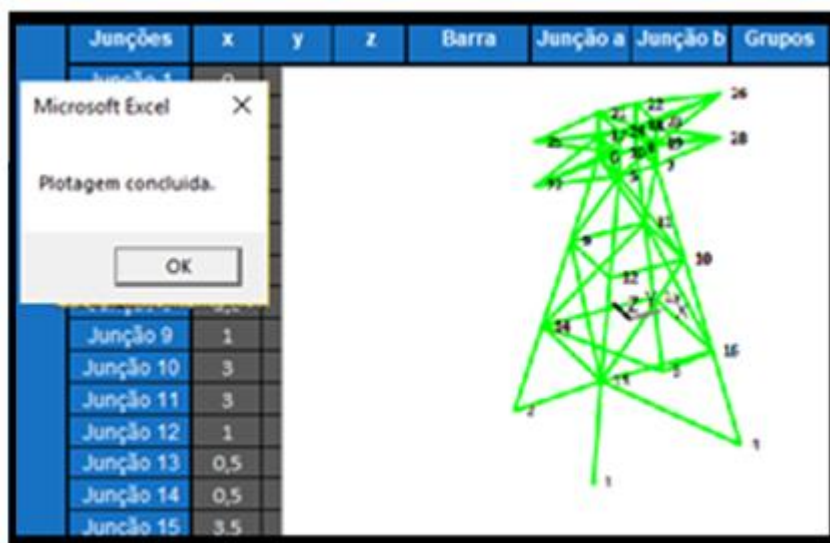
A Figura 47 mostra a tela de *input* dos dados acima mencionados discriminando o local exato de cada inserção.

Figura 47 – Incidência de ventos nos nós.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após todas as condições de contorno serem inseridas, o usuário poderá visualizar um esboço da estrutura, clicando no botão MODELO 3D. A Figura 48 mostra o botão para acionar o modelo 3D e o esboço da estrutura final.

Figura 48 – Tela de *output* modelo 3D.

Fonte: Produção do próprio autor.

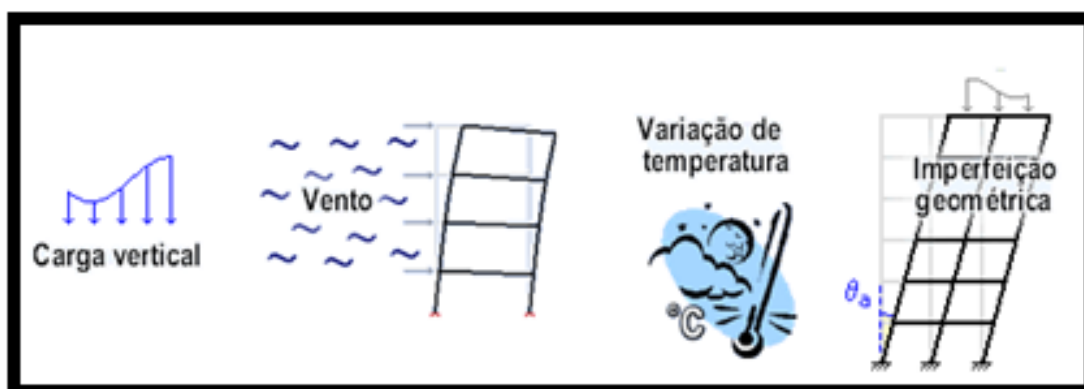
Caso a estrutura esteja geometricamente correta, o usuário deverá clicar no botão menu inicial inicial.

3.2.1.2.5 Hipóteses de Carregamento

Segundo a NBR 8800 (2007) deve-se fazer as combinações mais críticas agindo diretamente na estrutura. O software sugere oito possibilidades considerando sempre o ELU (estado limite último). No caso específico de torres de transmissão existem as cargas

permanentes relacionadas ao peso próprio da estrutura e cabos, carga variável de vento, carga de temperatura simulando cabos rompendo por tração máxima (queda de temperatura gerando encurtamento no cabo e conseqüentemente tração na torre) e imperfeições geométricas ligadas diretamente a efeitos de segunda ordem (etapa de montagem da torre). A Figura 49 apresenta um esboço das ações que incidem diretamente e indiretamente na estrutura.

Figura 49 – Ações agindo na estrutura.



Fonte: Adaptado de TQS – <http://www.tqs.com.br/>.

Para análise de primeira ordem:

- Hipótese 01: 1 vento 0°: Carga permanente da estrutura + Vento a 0°;
- Hipótese 02: 1 vento 90°: Carga permanente da estrutura + Vento a 90°;
- Hipótese 03: Carga permanente da estrutura + Cabo Condutor Rompendo devido a temperatura;
- Hipótese 04: Carga permanente da estrutura + Cabo Para-raios Rompendo devido a temperatura;

Para análise de segunda ordem (MAES):

- Hipótese 05: Carga permanente da estrutura + Vento a 0°, com “E” reduzido a 80%;
- Hipótese 06: Carga permanente da estrutura + Vento a 90°, com “E” reduzido a 80%;
- Hipótese 07: Carga permanente da estrutura + Vento a 0° + Força Ncional, com “E” reduzido a 80%;
- Hipótese 08: Carga permanente da estrutura + Vento a 90° + Força Ncional, com “E” reduzido a 80%;

Na Figura 50 tem-se a aba com todas as hipóteses mostradas e calculadas com os coeficientes de ponderação conforme o ELU. O usuário deve escolher quais os nós irão receber as cargas reativas dos cabos e escolher quais os nós terão uma carga de tração simulando o cabo rompendo.

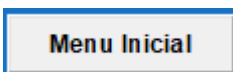
Figura 50 – Tela hipóteses de carregamento.

Menu Inicial						Hipótese 1 Vento 0°		Hipótese 1 Vento 90°		Hipótese 2		Hipótese 3	
ESCOLHA AS JUNÇÕES COM AS CARGAS PONTUAIS DOS CABOS:						Fx	Fy	Fy	Fz	Fy	Fz	Fy	Fz
Circuito 1: Fase 1 Fase 2 Fase 3						829,7500	-92,5203	-92,5203	829,7500	-92,5203	0,0000	-92,5203	0,0000
Cabo condutor: Junção 27						3556,0131	-406,2206	-406,2206	0,0000	-406,2206	0,0000	-406,2206	0,0000
Cabo para raio: Junção 25						0,0000	-719,9209	-719,9209	0,0000	-719,9209	0,0000	-719,9209	0,0000
Condutor rompido: Junção 27						0,0000	-406,2206	-406,2206	3556,0131	-406,2206	0,0000	-406,2206	0,0000
Circuito 2: Fase 1 Fase 2 Fase 3						8185,6467	-830,0170	-830,0170	8185,6467	-830,0170	0,0000	-830,0170	0,0000
Cabo condutor: Junção 28						5372,7066	-546,6940	-546,6940	0,0000	-546,6940	0,0000	-546,6940	0,0000
Cabo para raio: Junção 26						0,0000	-546,6940	-546,6940	5628,0445	-546,6940	0,0000	-546,6940	0,0000
Condutor rompido: Junção 28						0,0000	-263,3710	-263,3710	0,0000	-263,3710	0,0000	-263,3710	0,0000
Combinções:						9196,2715	-925,8105	-925,8105	0,0000	-925,8105	0,0000	-925,8105	0,0000
$\sum_{j=1}^n \gamma_{Qj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q1} \Psi_{p1} Q_{k1} + \sum_{l>1} \gamma_{Ql} \Psi_{al} Q_{kl}$						0,0000	-925,8105	-925,8105	8685,5957	-925,8105	0,0000	-925,8105	0,0000
Hipótese 1 Vento 0°						4577,4233	-394,3380	-394,3380	4577,4233	-394,3380	0,0000	-394,3380	0,0000
Hipótese 1 Vento 90°						13780,4528	-1626,5334	-1626,5334	13780,4528	-1626,5334	0,0000	-1626,5334	0,0000
Hipótese 2						9507,2858	-1034,1031	-1034,1031	0,0000	-1034,1031	0,0000	-1034,1031	0,0000
Hipótese 3						0,0000	-441,6728	-441,6728	0,0000	-441,6728	0,0000	-441,6728	0,0000
Combinções para efeito de 2ª ordem: (Caso não queira, considerar 0 e 1)						0,0000	-1034,1031	-1034,1031	8631,8415	-1034,1031	0,0000	-1034,1031	0,0000
Hipótese 1 Vento 0°						2913,6618	-246,7477	-246,7477	0,0000	-246,7477	0,0000	-246,7477	0,0000
Hipótese 1 Vento 90°						0,0000	-307,9086	-307,9086	0,0000	-307,9086	0,0000	-307,9086	0,0000
Hipótese 2						0,0000	-246,7477	-246,7477	2913,6618	-246,7477	0,0000	-246,7477	0,0000
Hipótese 3						2191,4571	-185,5867	-185,5867	2191,4571	-185,5867	0,0000	-185,5867	0,0000
Combinções para efeito de 2ª ordem: (Caso não queira, considerar 0 e 1)						1653,5088	-140,0298	-140,0298	0,0000	-140,0298	0,0000	-140,0298	0,0000
Hipótese 1 Vento 0°						0,0000	-109,4493	-109,4493	0,0000	-109,4493	0,0000	-109,4493	0,0000
Hipótese 1 Vento 90°						0,0000	-140,0298	-140,0298	1653,5088	-140,0298	0,0000	-140,0298	0,0000
Hipótese 2						2014,6111	-170,6103	-170,6103	2014,6111	-170,6103	0,0000	-170,6103	0,0000
Hipótese 3						4676,7312	-1444,4806	-1444,4806	2222,8906	-1444,4806	0,0000	-1444,4806	14709,1642

Fonte: Produção do próprio autor.

Nesta aba o software calcula automaticamente o peso das barras, as cargas de vento e faz a somatória de cada carga relacionada aquele nó.

Após a escolha e verificação das hipóteses, o usuário deve clicar no botão menu inicial



3.2.2 Análise Estrutural

Fase de extrema importância dentro da teoria das estruturas. Será implementada com recursos básico do Excel e com algumas rotinas em programação VBA (*Visual Basic Application*). Essas rotinas foram baseadas, consultadas e adaptadas da dissertação de mestrado de Suzuki (2014) e toda memória de cálculo das rotinas VBA estão apresentadas no apêndice

C deste trabalho para que sejam consultadas, adaptadas e reproduzidas em futuros trabalhos, de forma que se possa avançar na linha do conhecimento no que diz respeito a softwares de análise estrutural voltados para área educacional.

A obtenção dos esforços e deslocamentos é feito por meio de análise elástica em teoria de primeira ordem da estrutura indeformada, utilizando o MEF através da matriz de rigidez de elementos tipo barra com três graus de liberdade por nó.

Após preencher a tela “HIPÓTESES”, o usuário deverá voltar a tela principal e selecionar o botão “CALCULAR HIPÓTESES”. A Figura 51 apresenta a tela “CALCULAR HIPÓTESES” efeito de primeira ordem, indicando e destacado na cor vermelha, os nós indeslocáveis da estrutura. No local destacado na cor vermelha existem três colunas na cor preta no qual o usuário deverá colocar zeros na respectiva direção com restrição de modo a dizer ao software quais os nós são indeslocáveis ou estão associados a algum tipo de fundação.

Figura 51 – Tela “CALCULAR HIPÓTESES” – efeito 1ª ordem.

Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0				0	0	0
Junção 2	0	0	4				0	0	0
Junção 3	4	0	4				0	0	0
Junção 4	4	0	0				0	0	0
Junção 5	1,5	12	1,5						
Junção 6	1,5	12	2,5						
Junção 7	2,5	12	1,5						
Junção 8	2,5	12	2,5						
Junção 9	1	8	3						
Junção 10	3	8	1						
Junção 11	3	8	3						
Junção 12	1	8	1						
Junção 13	0,5	4	0,5						
Junção 14	0,5	4	3,5						
Junção 15	3,5	4	3,5						
Junção 16	3,5	4	0,5						
Junção 17	1,5	13	2,5						

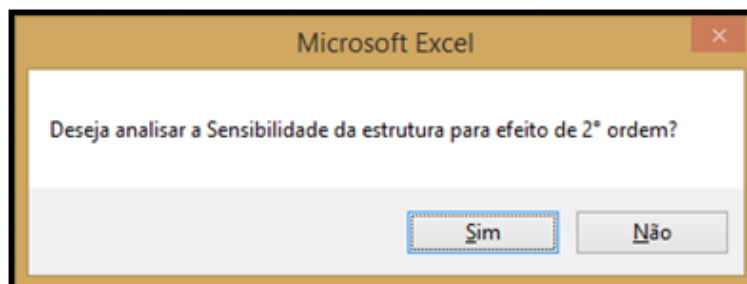
Fonte: Produção do próprio autor.

Nesta aba existem quatro botões referentes a quatro hipóteses relacionadas à análise de primeira ordem e mais quatro botões referentes à análise de segunda ordem. As funções relacionadas a segunda ordem serão explicadas mais a diante.

O usuário deverá calcular cada hipótese de forma individual, clicando no botão referente a hipótese em análise. O software carrega automaticamente os dados da Hipótese 1 vento 0°, importando da aba “HIPÓTESES”, calcula, gera as matrizes de rigidez das barras e armazena os resultados na aba “RESULTADOS DE VENTO A 0°”. Nesta fase o usuário deverá preencher os nós com o numero zero (0) de forma a indicar ao software que aquele nó

específico trata-se de um apoio indeslocável. Na sequência o software pergunta ao usuário se o mesmo deseja analisar a sensibilidade da estrutura a deslocamentos. A Figura 52 apresenta a tela de escolha sobre a análise de sensibilidade da estrutura, podendo o usuário tomar a decisão de fazer ou não a análise.

Figura 52 – Tela de escolha para análise dos deslocamentos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Caso positivo o software segue automaticamente para a aba “ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A ESTRUTURAS” e caso negativo volta à tela anterior de modo a repetir o mesmo procedimento para as demais hipóteses de carregamento. Em cada hipótese existe uma aba para armazenar os dados referentes à análise de primeira ordem e segunda ordem separadamente.

3.2.2.1 Análise de sensibilidade a estruturas

Dentro da aba “ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A ESTRUTURAS” o usuário deverá escolher alguns nós que deseja avaliar. O parâmetro avaliador é o índice B_2 . A estrutura pode ser classificada em pouca, média e grande deslocabilidade. A classificação de uma estrutura depende da combinação última de ações, o que significa que uma mesma estrutura pode ter diversas combinações, sendo algumas gerando pequena deslocabilidade e outras com grande deslocamento. Essa situação gera um trabalho volumoso de análise e para minimizar o problema, a ABNT-NBR 8800 (2007) admite que a classificação da estrutura seja feita uma única vez, tomando a combinação de ações que fornece os maiores valores de B_2 , que é a combinação constituída pela maior resultante de carga gravitacional. Neste caso teremos apenas duas combinações que serão analisadas às condições de deslocabilidade, ou seja, as hipóteses 1 considerando a ação variável do vento na direção 0° e na direção 90° separadamente.

- Para as estruturas de pequena deslocabilidade: o usuário deverá efetuar a análise de segunda ordem, levando em conta o efeito das imperfeições geométricas, exceto nas combinações de ações em que atuem outras forças laterais, como as devidas ao vento. As imperfeições geométricas podem ser representadas por forças nocionais aplicadas nos nós, igual a 0,3% do valor da somatória de todas as cargas gravitacionais. Mas como o valor que possui as maiores cargas gravitacionais são as hipóteses 1, ambas relacionadas a ações de vento, não é necessário aplicar os efeitos de segunda ordem.
- Para as estruturas de média deslocabilidade: o usuário deverá efetuar a análise de segunda ordem, desprezando da mesma forma as imperfeições geométricas, ou seja, as forças nocionais, mas sem desprezar o efeito das imperfeições de material, que deve ser considerado 80% da rigidez axial da barra. Para isso o usuário deverá voltar na aba “HIPÓTESES” e selecionar a tecla de ponderação multiplicando o módulo de elasticidade E por 0,80. A Figura 53 mostra na aba “HIPÓTESES” a tecla de ponderações que reduz a rigidez axial da barra. Para a análise de segunda ordem será aplicado o MAES (método de amplificação de esforços solicitantes).

Figura 53 – Tela de ponderações e redução de ações.

Combinações para efeito de 2º ordem: (Caso não queira, considerar 0 e 1)					
Hipótese 1 Vento 0°	0,00	3%	G Perm.	0,80	E0
Hipótese 1 Vento 90°	0,00	3%	G Perm.	0,80	E0

Fonte: Produção do próprio autor.

- Para as estruturas de alta deslocabilidade: o usuário deverá fazer uma análise bem criteriosa levando em consideração tanto a imperfeição geométrica, aplicando a carga nocional, junto com as cargas horizontais de vento e aplicar também a redução de rigidez axial multiplicando o módulo de elasticidade E por 0,80. Para a análise de segunda ordem será aplicado o MAES (método de amplificação de esforços solicitantes).

Figura 54 – Tela de escolha para análise dos deslocamentos.

Combinações para efeito de 2º ordem: (Caso não queira, considerar 0 e 1)					
Hipótese 1 Vento 0°	1,00	3%	G Perm.	0,80	E0
Hipótese 1 Vento 90°	1,00	3%	G Perm.	0,80	E0

Fonte: Produção do próprio autor.

Após a escolha e verificação das hipóteses, o usuário deve clicar no botão menu inicial

Menu Inicial

e seguir para a aba “CALCULAR HIPÓTESES”.

3.2.2.2 MAES (método de amplificação de esforços solicitantes)

Para aplicação do MAES é necessário que o usuário faça duas análises de primeira ordem individuais: a análise *nt* (*no-translation*) e sequencialmente o *lt* (*lateral translation*). O efeito final será a sobreposição dos efeitos de ambas as situações, sendo que a situação *lt* (*lateral translation*) deverá ser multiplicada pelo maior valor do parâmetro B_2 , independente da direção do vento. O parâmetro B_2 é obtido na análise de sensibilidade da estrutura.

3.2.2.2.1 Análise *nt* – *no translation*

O usuário deverá primeiramente escolher os nós que deseja aplicar o método, considerando que esses nós são apoios fictícios garantindo a deslocabilidade da estrutura somente na direção horizontal. A Figura 55 apresenta o local de escolha dos nós para apoios fictícios, onde se deve fazer as considerações para vento 0° e vento 90°.

Figura 55 – Tela de escolha para análise dos deslocamentos.

EFEITO DE 2º ORDEM
 MAES - MÉTODO CONFORME NBR8800
 CONSIDERAR EFEITO DE 2º ORDEM
 NAS HIPÓTESES 1 VENTO 0° E 90°

TRAVAMENTO DOS NÓS *nt* - *no translation*

Informar os nós para travamento Vento 0°

Junção 21 Junção 24 Junção 9 Junção 12

Importa e Calcula
 Efeito de 2º ordem
 Hipótese 1 vento 0°

Informar os nós para travamento Vento 90°

Junção 24 Junção 23 Junção 10 Junção 12

Importar e Calcular
 Efeito de 2º ordem
 Hipótese 1 vento 90°

Fonte: Produção do próprio autor.

Após a escolha dos nós deve-se apertar a tecla “Importar e calcular – Efeito de 2ª ordem – Hipótese 1 vento 0°”. Após essa ação o software busca as informações referentes aquela combinação na aba “HIPÓTESE “e automaticamente coloca o número zero (0) nos nós escolhidos pelo usuário, garantindo a não deslocabilidade horizontal daquele ponto. A Figura 56 mostra os nós selecionados para a situação *nt – no translation* com restrição a deslocabilidade horizontal para a primeira fase do MAES concluída.

Figura 56 – Efeito de 2ª ordem – *nt – no translation*.

Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0	831,732628	-92,5203079		0	0	0
Junção 2	0	0	4	3564,7178	-406,220591		0	0	0
Junção 3	4	0	4	15,4268759	-719,920874		0	0	0
Junção 4	4	0	0	8,70472694	-406,220591		0	0	0
Junção 5	1,5	12	1,5	8203,43282	-830,017017				
Junção 6	1,5	12	2,5	5384,42143	-546,694				
Junção 7	2,5	12	1,5	11,7148714	-546,694				
Junção 8	2,5	12	2,5	5,64366392	-263,370983				
Junção 9	1	8	3	9216,11031	-925,810547		0		
Junção 10	3	8	1	19,8387974	-925,810547				
Junção 11	3	8	3	31,227495	-1457,2831				
Junção 12	1	8	1	4585,87345	-394,337992		0		
Junção 13	0,5	4							
Junção 14	0,5	4							
Junção 15	3,5	4							
Junção 16	3,5	4							
Junção 17	1,5	13							
Junção 18	2,5	13							
Junção 19	2,5	13							
Junção 20	1,5	13							
Junção 21	1,5	14	2,5	1656,5094	-140,029791		0		
Junção 22	2,5	14	2,5	2,34534243	-109,449314				
Junção 23	2,5	14	1,5	3,00063839	-140,029791				
Junção 24	1,5	14	1,5	2018,26706	-170,610269		0		
Junção 25	-0,5	14	2	4680,76508	-1444,48059				

←

←

←

←

EFEITO DE 2º ORDEM

MAES - MÉTODO CONFORME NBR8800

CONSIDERAR EFEITO DE 2º ORDEM

NAS HIPÓTESES 1 VENTO 0º E 90º

TRAVAMENTO DOS NÓS *nt – no translation*

Informar os nós para travamento Vento 0º

Junção 21 Junção 24 Junção 9 Junção 12

Fonte: Produção do próprio autor.

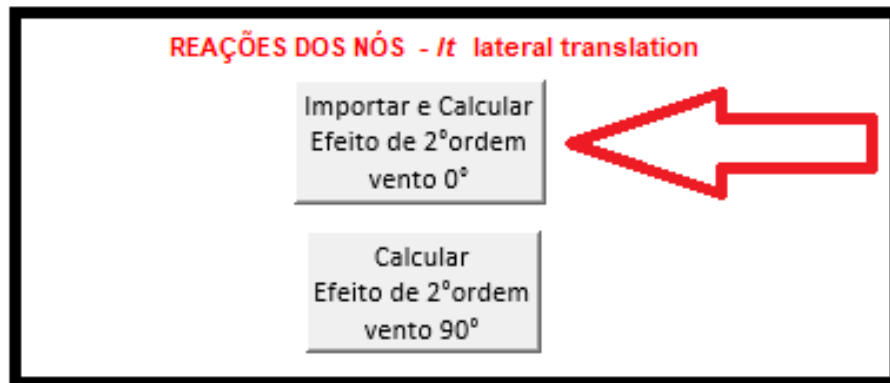
3.2.2.2.2 *Análise lt – lateral translation*

Na sequência o usuário deve apenas clicar na tecla “Importar e Calcular – Efeito de 2ª ordem – vento 0°”. Automaticamente o software limpa toda a tabela de carregamentos e busca a reação de apoio do item anterior, ou seja, a fase *nt – no translation* e aplica como força pontual em sinal contrário naqueles nós anteriormente travados, gerando novos esforços

solicitantes. No final do processo o software faz a soma dos efeitos individuais, considerando as ponderações do parâmetro B_2 .

A Figura 57 mostra a tecla a ser acionada para a fase *lt* – *lateral translation*.

Figura 57 – Tecla de acionamento – *lt* – *lateral translation*.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 58 apresenta as reações colocadas nos pontos restritos anteriormente e a planilha limpa dos demais dados. Essas cargas geram novos esforços.

Figura 58 – Tela com cargas referentes a fase – *lt* – *lateral translation*.

Junção 7	2,5	12	1,5						
Junções	x	y	z	Fx	Fz	UX	UY	UZ	
Junção 9	1	8	3	21832,8753					
Junção 10	3	8	1						
Junção 11	3	8	3						
Junção 12	1	8	1	18590,1523					
Junção 13	0,5	4	0,5						
Junção 14	0,5	4	3,5						
Junção 15	3,5	4	3,5						
Junção 16	3,5	4	0,5						
Junção 17	1,5	13	2,5						
Junção 18	2,5	13	2,5						
Junção 19	2,5	13	1,5						
Junção 20	1,5	13	1,5						
Junção 21	1,5	14	2,5	16660,046					
Junção 22	2,5	14	2,5						
Junção 23	2,5	14	1,5						
Junção 24	1,5	14	1,5	19158,5188					
Junção 25	-0,5	14	2						
Junção 26	4,5	14	2						
Junção 27	-0,5	12	2						
Junção 28	4,5	12	2						

Fonte: Produção do próprio autor.

Após esta ação o usuário deve fazer o mesmo procedimento para a hipótese de vento 90°.

3.2.3 Dimensionamento das barras.

Após obter os esforços finais nas barras considerando a análise de segunda ordem caso seja necessário, será dimensionado os perfis de acordo com a NBR8800 (2007) atendendo os requisitos dos estados limites último.

Nesta etapa o usuário pode escolher diferentes tipo de aço. O software faz primeiramente um dimensionamento para os esforços axiais de tração e na sequência a compressão apresentando um alerta de “**Suporta**” para as barras dimensionadas e “**Não Suporta**” para barras que não atendem algum critério da NBR 8800 (2007). As barras devem ter o mesmo perfil para cada grupo e caso isso não ocorra o usuário deve selecionar na coluna “perfil final escolhido”, o maior perfil dimensionado para aquele grupo e selecionar a tecla “**RECALCULAR HIPÓTESES COM PERFIL REDIMENSIONADO**”.

Com isso o programa volta no passo inicial de concepção estrutural e repete todo o processo descrito incluindo as análises de primeira e segunda ordem. Repete-se o processo até que haja convergência de todas as barras.

A Figura 59 apresenta tela final de dimensionamento das barras.

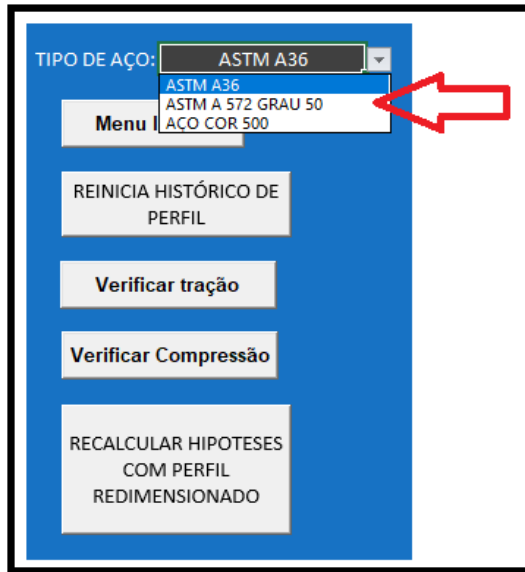
Figura 59 – Aba dimensionamento das barras.

Barra	Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	Esbeltez	Tração	Compressão	
1	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	DIMENSIONAMENTO DO PERFIL PARA A ESTRUTURA CONFORME NBR-8800 SELECIONE O TIPO DE MATERIAL DE CANTONEIRA UTILIZADO TIPO DE AÇO: ASTM A 572 GRAU 50 <input type="button" value="Menu Inicial"/> <input type="button" value="REINICIA HISTÓRICO DE PERFIL"/> <input type="button" value="Verificar tração"/> <input type="button" value="Verificar Compressão"/> <input type="button" value="RECALCULAR HIPÓTESES COM PERFIL REDIMENSIONADO"/>
2	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	
3	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	
4	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	
5	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
6	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
7	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
8	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
9	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
10	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
11	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
12	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
13	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
14	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
15	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
17	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
18	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
19	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
20	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	
21	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 1	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta	

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 60 apresenta os possíveis tipos de aço disponíveis para o dimensionamento.

Figura 60 – Tipo de aço.



Fonte: Produção do próprio autor.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VALIDAÇÃO

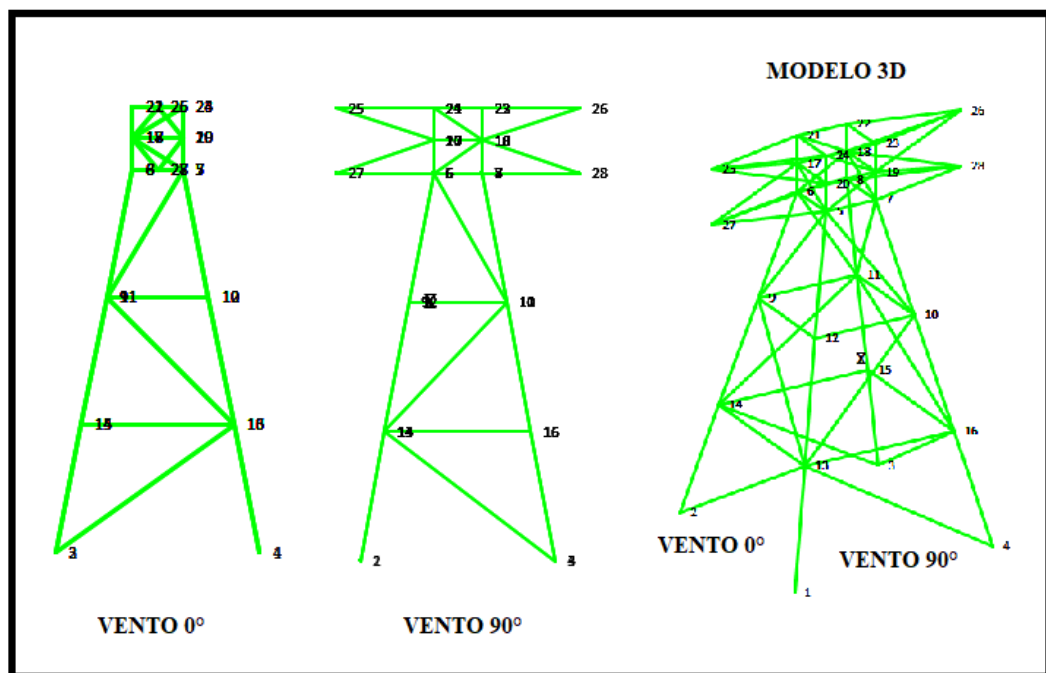
Como validação da planilha Excel utilizou-se o software SAP2000 e METÁLICA 3D, conforme mencionado no capítulo anterior.

4.1.1 Modelagem da estrutura – Geometria

4.1.1.1 Inserção de dados dos nós

A Figura 61 apresenta uma ilustração com a numeração dos nós do modelo concebido em três dimensões e desenvolvido no Excel. A Tabela 1 descreve com detalhes as condições de contorno do modelo.

Figura 61 – Modelo 3D – Planilha Excel.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 1 tem-se as coordenadas de cada nó nas direções dos eixos cartesianos X, Y e Z. A estrutura possui 18 nós e a escolha desta estrutura deu-se pela limitação de nós dos softwares para verificação por serem versões Try e pela capacidade computacional do próprio Excel.

Nós										
Referência	Coordenadas			Vínculo c/ exterior						Vinculação interna
	X (m)	Y (m)	Z (m)	U _x	U _y	U _z	θ_x	θ_y	θ_z	
N27	-0.500	2.000	12.000	-	-	-	-	-	-	Articulado
N28	4.500	2.000	12.000	-	-	-	-	-	-	Articulado

Referências:

U_x, U_y, U_z : Deslocamentos prescritos em eixos globais.

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$: Rotações prescritas em eixos globais.

Cada grau de liberdade marca-se com 'X' se estiver restringido e, caso contrário, com '-'.

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.1.2 Numeração das barras

Cada software tem um parâmetro para numeração das barras, visto que depende de como o nó foi inserido e o sentido como a barra foi desenhada. Adota-se de forma oficial a numeração das barras conforme apresenta-se na Tabela 2. A estrutura possui um total de 76 barras e foi concebida de forma a ser uma treliça espacial, conforme a torre de linha de transmissão. A junção “a” significa o nó inicial e junção “b” o nó final de cada barra.

Tabela 2 – Numeração oficial das barras.

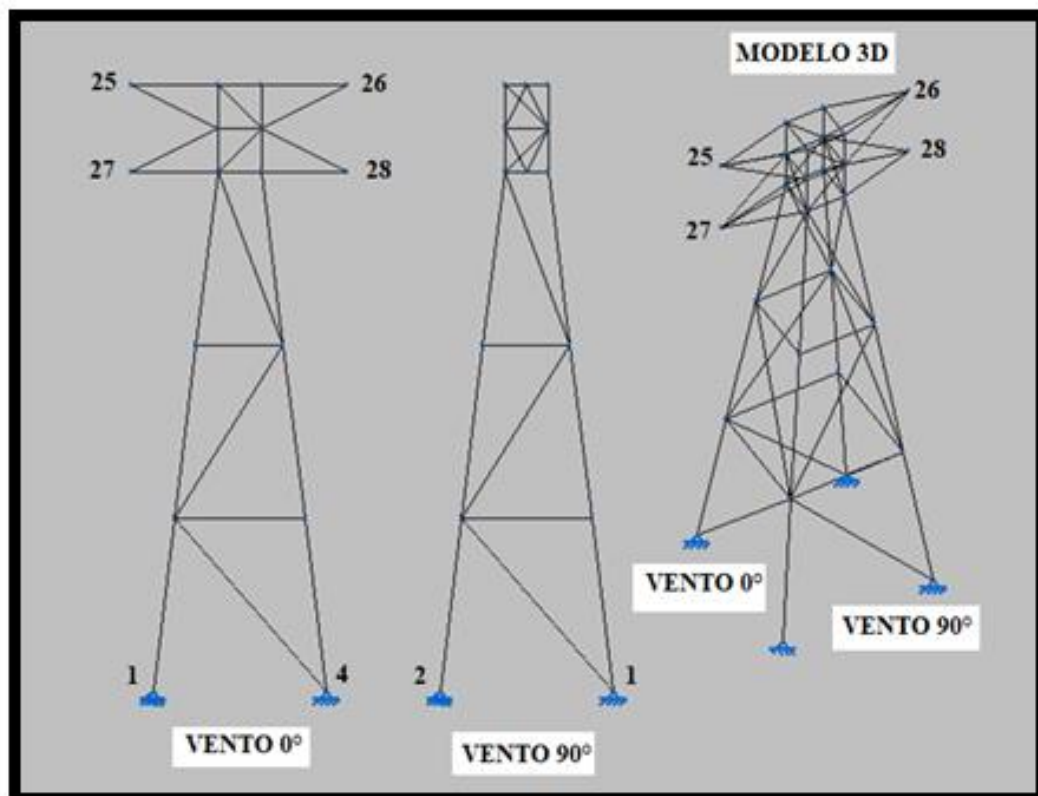
Barra	Junção a	Junção b	Barra	Junção a	Junção b	Barra	Junção a	Junção b
Barra 1	1	13	Barra 27	10	5	Barra 53	21	22
Barra 2	2	14	Barra 28	6	11	Barra 54	22	23
Barra 3	3	15	Barra 29	11	14	Barra 55	23	24
Barra 4	4	16	Barra 30	14	3	Barra 56	24	21
Barra 5	13	14	Barra 31	3	16	Barra 57	24	17
Barra 6	14	15	Barra 32	2	13	Barra 58	24	19
Barra 7	15	16	Barra 33	13	9	Barra 59	18	21
Barra 8	16	13	Barra 34	16	11	Barra 60	18	23
Barra 9	13	12	Barra 35	7	11	Barra 61	25	17
Barra 10	14	9	Barra 36	5	9	Barra 62	25	20
Barra 11	15	11	Barra 37	5	20	Barra 63	25	21
Barra 12	16	10	Barra 38	6	17	Barra 64	25	24
Barra 13	12	9	Barra 39	7	19	Barra 65	26	18
Barra 14	9	11	Barra 40	8	18	Barra 66	26	19
Barra 15	11	10	Barra 41	17	18	Barra 67	26	22

Barra	Junção a	Junção b	Barra	Junção a	Junção b	Barra	Junção a	Junção b
Barra 16	10	12	Barra 42	18	19	Barra 68	26	23
Barra 17	9	6	Barra 43	19	20	Barra 69	27	6
Barra 18	11	8	Barra 44	20	17	Barra 70	27	5
Barra 19	10	7	Barra 45	5	17	Barra 71	27	17
Barra 20	12	5	Barra 46	5	19	Barra 72	27	20
Barra 21	5	6	Barra 47	18	6	Barra 73	28	7
Barra 22	6	8	Barra 48	18	7	Barra 74	28	8
Barra 23	8	7	Barra 49	17	21	Barra 75	28	18
Barra 24	7	5	Barra 50	18	22	Barra 76	28	19
Barra 25	4	13	Barra 51	19	23			
Barra 26	13	10	Barra 52	20	24			

Fonte: Produção do próprio autor.

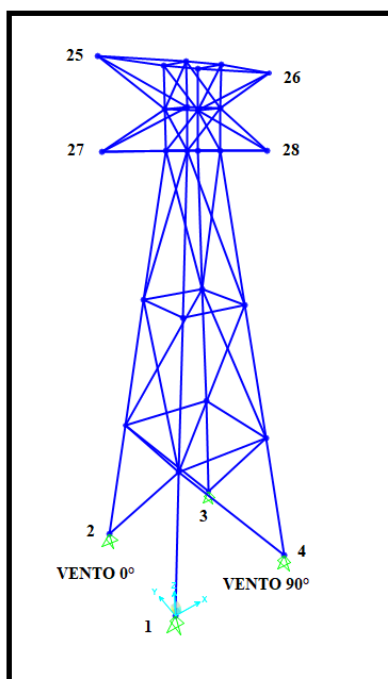
As Figuras 62 e 63 apresentam os modelos gerados pelo METÁLICA 3D e SAP2000 respectivamente.

Figura 62 – Modelo 3D – software METÁLICA 3D.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 63 – Modelo 3D – software SAP2000.



Fonte: Produção do próprio autor.

O resultado apresentado no Excel não é tão rico em detalhes em relação aos apresentados pelo METÁLICA 3D e pelo SAP2000, visto que ambos possuem uma interface gráfica muito grande, com maior riqueza de detalhes e em que o usuário tem uma interação maior. Mas analisando os recursos disponíveis no Excel, o usuário tem condições de verificar se a estrutura está geometricamente de acordo com a sua concepção estrutural.

4.1.2 Carregamentos

Para validação dos dados aplicou-se à estrutura os carregamentos verticais relacionados ao peso próprio e vento em apenas uma direção, ou seja, vento 0°. Diante dessas condições, utilizou-se a hipótese 1ª vento 0°, com os carregamento em Newton [N]. Não utilizou nenhum coeficiente de majoração.

Para determinar os carregamentos de peso próprio e ação variável de vento necessita-se da escolha de um perfil metálico. A Tabela 3 e Tabela 4 apresentam, respectivamente, o perfil metálico tipo cantoneira adotado e as propriedades mecânicas do aço respectivamente.

Tabela 3 – Perfil metálico tipo cantoneira.

Material		Perfil Série Gerdau	Área (cm ²)
Tipo	Designação		
Aço laminado	A-572 345MPa	L 1.3/4 x 3/16" (Cantoneira)	4,25

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas das barras.

Materiais utilizados							
Material		E (MPa)	ν	G (MPa)	f_y (MPa)	α_t (m/m°C)	γ (kN/m ³)
Tipo	Designação						
Aço laminado	A-572 345MPa	206010.00	0.300	79234.62	345.00	0.000012	77.01

Notação:

E: Módulo de elasticidade *ν* : Módulo de poisson

G: Módulo de corte

f_y : Limite elástico

α_t : Coeficiente de dilatação

γ : Peso específico

Fonte: Produção do próprio autor.

Os carregamentos representados por F_x são cargas na direção X, e representam a incidência do vento na estrutura considerado 0°, os representados por F_z são as cargas na direção Z, e representam a incidência do vento na estrutura considerado 90° e os representados por F_y são as cargas na direção Y, e representam as cargas gravitacionais e sempre terão os valores negativos. Na coluna F_x as células sem valor significam que aquele nós não têm incidência a vento 0° e a coluna F_z está completamente sem carregamento visto que representa cargas de vento a 90° e nesta análise de validação não se está considerando esta hipótese. As restrições de apoio estão representadas pela letra U, nas respectivas direções X, Y e Z, e devem ser preenchidos com o número 0 em que houver restrição ao deslocamento. Valores característicos apresentados em Newton [N].

A Tabela 5 apresenta os carregamentos característicos aplicados nos nós da estrutura. Unidades apresentadas em Newton [N].

Tabela 5 – Carregamentos aplicados aos nós

Junções	x	y	z	F_x	F_y	UX	UY	UZ
Junção 1	0,0	0,0	0,0	740,8482	-62,7398	0	0	0
Junção 2	0,0	0,0	4,0	1714,5136	-145,1961	0	0	0
Junção 3	4,0	0,0	4,0		-227,6523	0	0	0
Junção 4	4,0	0,0	0,0		-145,1961	0	0	0
Junção 5	1,5	12,0	1,5	3748,7847	-317,4713			

Tabela 5 – Carregamentos aplicados aos nós

Junções	x	y	z	Fx	Fy	(conclusão)		
						UX	UY	UZ
Junção 6	1,5	12,0	2,5	2524,0060	-229,1946			
Junção 7	2,5	12,0	1,5	0	-229,1946			
Junção 8	2,5	12,0	2,5	0	-140,9178			
Junção 9	1,0	8,0	3,0	3860,8221	-326,9593			
Junção 10	3,0	8,0	1,0	0	-326,9593			
Junção 11	3,0	8,0	3,0	0	-466,6571			
Junção 12	1,0	8,0	1,0	2211,2335	-187,2615			
Junção 13	0,5	4,0	0,5	5706,4287	-529,5936			
Junção 14	0,5	4,0	3,5	4414,7917	-373,8730			
Junção 15	3,5	4,0	3,5	0	-218,1525			
Junção 16	3,5	4,0	0,5	0	-373,8730			
Junção 17	1,5	13,0	2,5	2081,1870	-176,2483			
Junção 18	2,5	13,0	2,5	0	-219,9347			
Junção 19	2,5	13,0	1,5	0	-176,2483			
Junção 20	1,5	13,0	1,5	1565,32659	-132,5619			
Junção 21	1,5	14,0	2,5	1181,0777	-100,0213			
Junção 22	2,5	14,0	2,5	0	-78,17808			
Junção 23	2,5	14,0	1,5	0	-100,0213			
Junção 24	1,5	14,0	1,5	1439,0080	-121,8645			
Junção 25	-0,5	14,0	2,0	3340,5223	-1031,7719			
Junção 26	4,5	14,0	2,0	1752,7433	-1031,7719			
Junção 27	-0,5	12,0	2,0	8234,1297	-4985,8131			
Junção 28	4,5	12,0	2,0	6646,3506	-4985,8131			

Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.3 Deslocamentos

A matriz de rigidez global determinou-se os deslocamentos nodais e a Tabela 6 apresenta os valores dos deslocamentos nodais da planilha Excel, por meio do software METÁLICA 3D e um comparativo dos deslocamentos determinados. Para o software METÁLICA 3D e SAP2000 o eixo das cargas gravitacionais é o eixo Z, mas para a planilha Excel adota-se como o eixo Y e conseqüentemente o Uy no Excel = Dz no METÁLICA 3D e no SAP2000. De maneira análoga temos a mesma condição para o eixo Z considerado no Excel e nos demais softwares. O Uz no Excel = Dy no METÁLICA 3D e no SAP2000. Os valores apresentados estão todos em milímetros [mm].

Tabela 6 – Comparação deslocamentos – Excel x Metálica 3D.

Junções	Excel			Metalica 3D			Diferença %		
	UX	UY	UZ	Dx	Dz ¹	Dy	UX/Dx	UY/Dz ¹	UZ/Dy
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	32,6444	1,5973	2,8365	32,6440	1,5970	2,8360	0,0013	0,0204	0,0161
6	33,1523	2,1095	2,8699	33,1520	2,1090	2,8700	0,0009	0,0220	-0,0020
7	32,5971	-1,7905	0,0979	32,5970	-1,7900	0,0980	0,0004	0,0277	-0,0849
8	33,1244	-1,6256	0,0874	33,1240	-1,6260	0,0870	0,0013	-0,0241	0,4147
9	15,1375	2,4458	-0,4991	15,1370	2,4460	-0,4990	0,0030	-0,0062	0,0249
10	14,3776	-3,6082	2,0153	14,3780	-3,6080	2,0150	-0,0030	0,0065	0,0132
11	15,0483	-3,1745	2,0143	15,0480	-3,1750	2,0140	0,0022	-0,0142	0,0165
12	14,4286	2,6310	-0,4986	14,4290	2,6310	-0,4990	-0,0027	-0,0017	-0,0823
13	3,9930	1,8851	2,6934	3,9930	1,8850	2,6930	0,0009	0,0068	0,0156
14	4,0942	2,6454	2,6918	4,0940	2,6450	2,6920	0,0059	0,0134	-0,0067
15	4,0933	-2,4645	-2,5381	4,0930	-2,4650	-2,5380	0,0075	-0,0202	0,0021
16	3,9914	-1,7509	-2,5371	3,9910	-1,7510	-2,5370	0,0108	-0,0077	0,0047
17	37,1076	2,0972	2,3173	37,1080	2,0970	2,3170	-0,0010	0,0077	0,0124
18	37,1323	-1,7361	0,0508	37,1320	-1,7360	0,0510	0,0009	0,0074	-0,3459
19	36,4500	-1,9757	0,0617	36,4500	-1,9760	0,0620	-0,0001	-0,0160	-0,5616
20	36,4260	1,6298	2,3278	36,4260	1,6300	2,3280	0,0000	-0,0140	-0,0106
21	41,0610	2,1212	1,8908	41,0610	2,1210	1,8910	0,0000	0,0112	-0,0125
22	41,0758	-1,7370	-0,1802	41,0760	-1,7370	-0,1800	-0,0004	0,0012	0,1114
23	40,3184	-1,9733	-0,1765	40,3180	-1,9730	-0,1760	0,0009	0,0168	0,2827
24	40,2896	1,6861	1,8915	40,2900	1,6860	1,8920	-0,0010	0,0043	-0,0247
25	40,6912	9,6439	3,3431	40,6910	9,6440	3,3430	0,0004	-0,0007	0,0042
26	40,7453	-9,8324	-1,6320	40,7450	-9,8320	-1,6320	0,0007	0,0037	0,0026
27	33,1303	8,7914	3,9887	33,1300	8,7910	3,9890	0,0008	0,0047	-0,0072
28	32,8205	-10,1424	-1,0070	32,8200	-10,1420	-1,0070	0,0015	0,0039	0,0007

1 – O eixo Dz representa o sentido das cargas gravitacionais.

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 7 apresenta os valores dos deslocamentos nodais da planilha Excel, os valores dos deslocamentos nodais do software SAP2000 e um comparativo dos deslocamentos encontrados na planilha Excel e SAP2000. Os valores apresentados estão todos em milímetros [mm].

Tabela 7 – Comparação deslocamentos – Excel x SAP2000

Junções	Excel			SAP2000			(continua) Diferença %		
	UX	UY	UZ	Dx	Dz ¹	Dy	UX/Dx	UY/Dz ¹	UZ/Dy
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	32,6444	1,5973	2,8365	32,6448	1,5968	2,8393	-0,0004	0,0005	-0,0028
6	33,1523	2,1095	2,8699	33,1462	2,1097	2,8728	0,0061	-0,0003	-0,0028
7	32,5971	-1,7905	0,0979	32,5974	-1,7899	0,0952	-0,0003	-0,0006	0,0027
8	33,1244	-1,6256	0,0874	33,1184	-1,6262	0,0846	0,0060	0,0006	0,0028
9	15,1375	2,4458	-0,4991	15,1346	2,4455	-0,4976	0,0029	0,0003	-0,0015
10	14,3776	-3,6082	2,0153	14,3779	-3,6080	2,0137	-0,0003	-0,0002	0,0016
11	15,0483	-3,1745	2,0143	15,0455	-3,1741	2,0127	0,0029	-0,0004	0,0016
12	14,4286	2,6310	-0,4986	14,4289	2,6307	-0,4971	-0,0003	0,0002	-0,0015
13	3,9930	1,8851	2,6934	3,9931	1,8852	2,6936	-0,0001	-0,0001	-0,0002
14	4,0942	2,6454	2,6918	4,0935	2,6449	2,6920	0,0008	0,0004	-0,0002
15	4,0933	-2,4645	-2,5381	4,0926	-2,4641	-2,5382	0,0008	-0,0004	0,0001
16	3,9914	-1,7509	-2,5371	3,9915	-1,7509	-2,5373	-0,0001	0,0000	0,0001
17	37,1076	2,0972	2,3173	37,1029	2,0974	2,3196	0,0048	-0,0003	-0,0023
18	37,1323	-1,7361	0,0508	37,1274	-1,7368	0,0495	0,0049	0,0007	0,0014
19	36,4500	-1,9757	0,0617	36,4490	-1,9749	0,0603	0,0010	-0,0007	0,0014
20	36,4260	1,6298	2,3278	36,4250	1,6291	2,3300	0,0010	0,0006	-0,0023
21	41,0610	2,1212	1,8908	41,0571	2,1215	1,8922	0,0039	-0,0003	-0,0015
22	41,0758	-1,7370	-0,1802	41,0719	-1,7377	-0,1801	0,0039	0,0007	-0,0001
23	40,3184	-1,9733	-0,1765	40,3158	-1,9726	-0,1764	0,0026	-0,0007	-0,0001
24	40,2896	1,6861	1,8915	40,2870	1,6854	1,8930	0,0026	0,0007	-0,0015
25	40,6912	9,6439	3,3431	40,6883	9,6415	3,3398	0,0029	0,0025	0,0033
26	40,7453	-9,8324	-1,6320	40,7435	-9,8369	-1,6271	0,0018	0,0045	-0,0050
27	33,1303	8,7914	3,9887	33,1342	8,7674	3,9810	-0,0039	0,0240	0,0077

Tabela 7 – Comparação deslocamentos – Excel x SAP2000

Juncões	(conclusão)								
	Excel			SAP2000			Diferença %		
	UX	UY	UZ	Dx	Dz ¹	Dy	UX/Dx	UY/Dz ¹	UZ/Dy
28	32,8205	-10,1424	-1,0070	32,8164	-10,1550	-0,9992	0,0041	0,0126	-0,0079

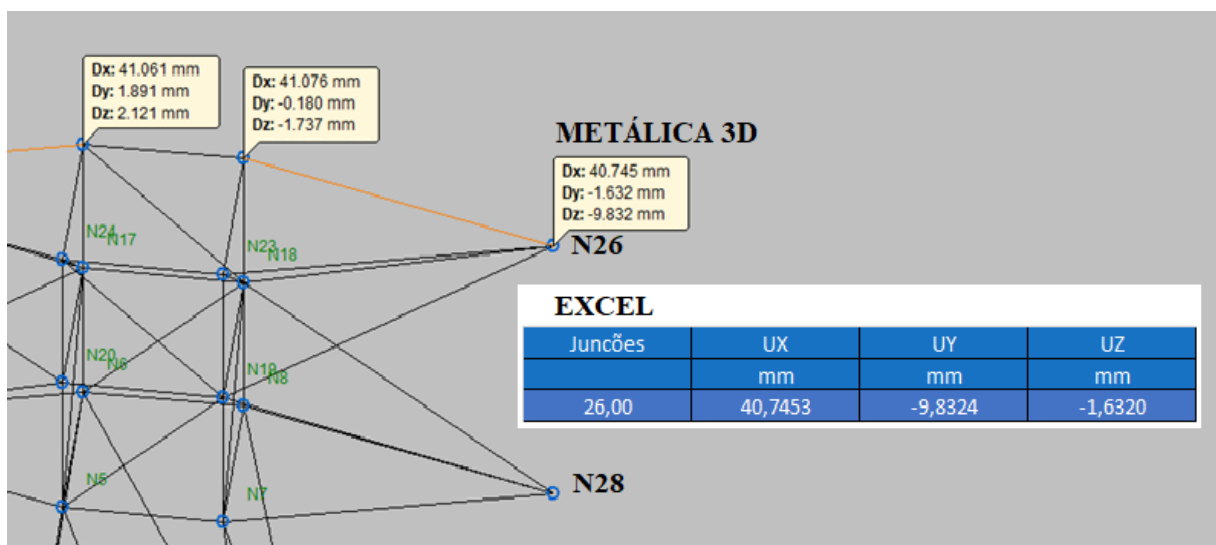
1 – O eixo Dz representa o sentido das cargas gravitacionais.

Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando as comparações entre Excel e METÁLICA 3D, percebe-se que a diferença percentual entre os deslocamentos é praticamente zero, considerando quatro casas decimais na unidade milímetros. Se considerar apenas três casas decimais após a vírgula, o erro é zero. Esta diferença se dá pelo fato da precisão do METÁLICA 3D ser de apenas três casas decimais após a vírgula, ou seja, o software trunca o valor nesta precisão. Analisando da mesma forma com o software SAP2000 esta diferença é ainda menor, visto que o SAP2000 apresenta uma precisão ainda maior em casas decimais após a vírgula. No entanto sendo bem criterioso e de maneira bem conservadora, as torres de transmissão de energia em sua maioria são estruturas bem altas na proporção de dezenas de metros e diante desta enorme proporção pode-se dizer que a planilha Excel está validada no que diz respeito a deslocamento nodal.

A Figura 64 apresenta uma tela adaptada do software METÁLICA 3D em que se compara o nós N26 entre METÁLICA 3D x Excel e percebe-se que não existe diferença entre os dois softwares.

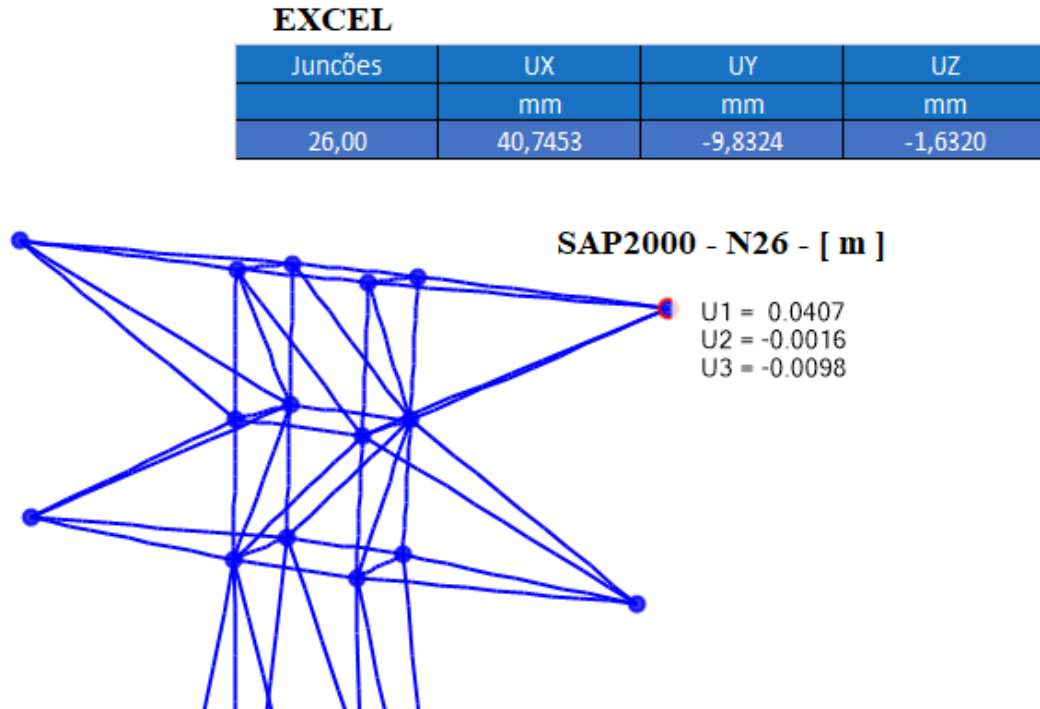
Figura 64 – Comparativo N26 entre METÁLICA 3D x Excel.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 65 apresenta uma tela adaptada do software SAP2000 onde se compara o nós N26 entre SAP2000 x Excel e percebe-se que não existe diferença entre os dois softwares.

Figura 65 - Comparativo N26 entre SAP2000 x Excel.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.4 REAÇÕES DE APOIO.

As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam as reações de apoio obtidas com a planilha Excel, METÁLICA 3D e SAP2000 respectivamente. No Excel a força F_y representa a o valor das cargas gravitacionais chegando na fundação e conforme já mencionado anteriormente no METÁLICA 3D e no SAP2000 está ação está representada pela força R_z .

Tabela 8 – Reações de apoio Excel.

Reações nos nós - Excel			
Ref.	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)
N1	-7,8497	-56,8081	-7,1089
N2	-9,1156	-59,0633	7,5911
N3	-17,2415	67,8028	-8,6528
N4	-16,9550	65,5098	8,1706

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 9 – Reações de apoio METÁLICA 3D.

Reações nos nós - METÁLICA 3D			
Ref.	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)
N1	-7,8500	-7,1090	-56,8080
N2	-9,1160	7,5910	-59,0630
N3	-17,2420	-8,6530	67,8030
N4	-16,9550	8,1710	65,5100

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 10 – Reações de apoio SAP2000.

Reações nos nós – SAP2000			
Ref.	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)
N1	-7,8500	-7,1090	-56,8120
N2	-9,1140	7,5890	-59,0540
N3	-17,2390	-8,6510	67,7930
N4	-16,9560	8,1710	65,5062

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 11 apresenta um comparativo percentual entre o Excel x METÁLICA 3D e entre Excel x SAP2000 respectivamente.

Tabela 11 - Valores comparativos de reações de apoio.

Ref.	R.A. Excel x METÁLICA 3D			R.A. Excel x SAP2000		
	Fx (kN)	Rx (kN)	Dif. %	Fx (kN)	Rx (kN)	Dif. %
N1	-7,8497	-7,8500	-0,0038	-7,8497	-7,8500	-0,0038
N2	-9,1156	-9,1160	-0,0047	-9,1156	-9,1140	0,0173
N3	-17,2415	-17,2420	-0,0027	-17,2415	-17,2390	0,0147
N4	-16,9550	-16,9550	-0,0002	-16,9550	-16,9560	-0,0061

Ref.	R.A. Excel x METÁLICA 3D			R.A. Excel x SAP2000		
	Fy (kN)	Rz (kN)	Dif. %	Fy (kN)	Rz (kN)	Dif. %
N1	-56,8081	-56,8080	0,0002	-56,8081	-56,8120	-0,0069
N2	-59,0633	-59,0630	0,0005	-59,0633	-59,0540	0,0157
N3	67,8028	67,8030	-0,0003	67,8028	67,7930	0,0144
N4	65,5098	65,5100	-0,0004	65,5098	65,5062	0,0054

Tabela 11 - Valores comparativos de reações de apoio.

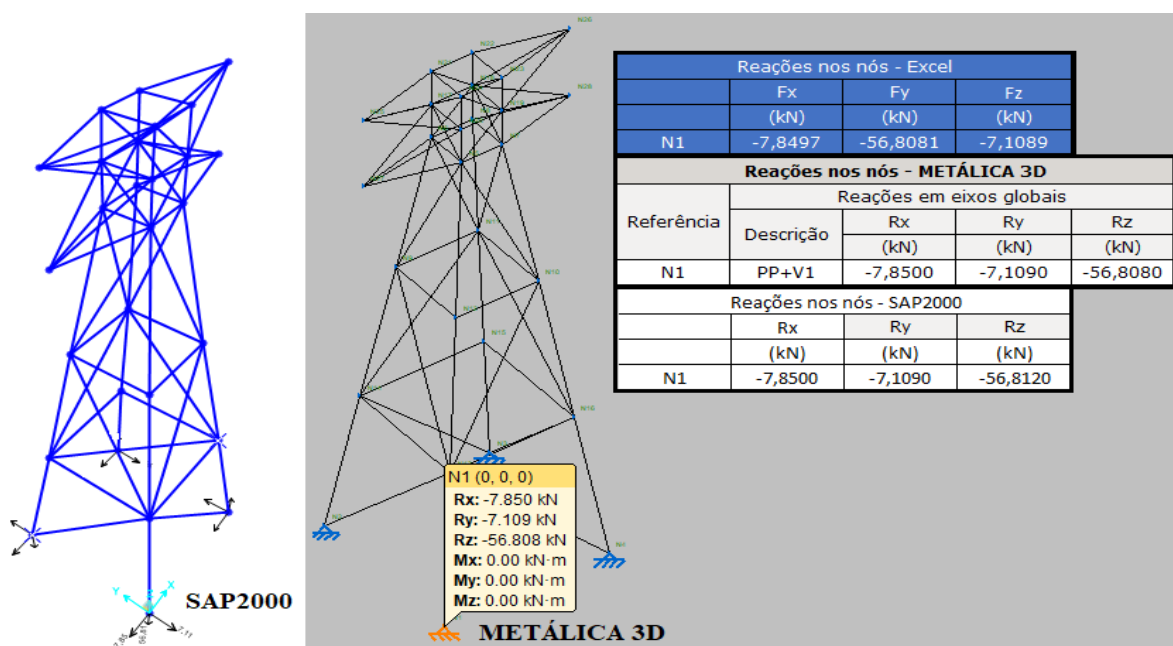
Ref.				(conclusão)		
	Fz (kN)	Ry (kN)	Dif. %	Fz (kN)	Ry (kN)	Dif. %
N1	-7,1089	-7,1090	-0,0021	-7,1089	-7,1090	-0,0021
N2	7,5911	7,5910	0,0008	7,5911	7,5890	0,0272
N3	-8,6528	-8,6530	-0,0026	-8,6528	-8,6510	0,0205
N4	8,1706	8,1710	-0,0053	8,1706	8,1710	-0,0053

Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando as comparações entre Excel e METÁLICA 3D, percebe-se que a diferença percentual entre as reações de apoio é praticamente zero, considerando quatro casas decimais na unidade [kN]. Se considerar apenas três casas decimais após a vírgula, o erro é zero. Esta diferença se dá pelo fato da precisão do METÁLICA 3D ser de apenas três casas decimais após a vírgula, ou seja, o software trunca o valor nesta precisão. Analisando da mesma forma com o software SAP2000 esta diferença é bem pequena também. Da mesma forma e sendo bem conservador pode-se dizer que a planilha Excel está validada no que diz respeito a cálculo das reações de apoio.

A Figura 66 apresenta uma tela adaptada com software METÁLICA 3D em que se compara as reações de apoio no nó N1 entre METÁLICA 3D x Excel x SAP2000 e percebe-se que não existe diferença entre os três softwares.

Figura 66 - Comparativo nó N1 entre METÁLICA 3D x Excel x SAP2000.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.5 ESFORÇOS SOLICITANTES

Por se tratar de uma treliça ideal há as ações de carregamento agindo diretamente nos nós da estrutura e conseqüentemente tem-se somente esforços axiais nas barras, e estes serem de tração ou compressão.

A Tabela 12 apresenta os valores de esforços em cada barra da estrutura, perante o carregamento previsto, obtidos dos três softwares em análise e apresenta os valores comparativo em percentuais entre o Excel x METÁLICA 3D e Excel x SAP2000 de esforços solicitantes em cada barra. Valores em [kN], sendo valores positivos para esforço normal de tração e valores negativos para esforço normal de compressão.

Tabela 12 - Esforços solicitantes das barras.

(continua)

Descrição			Força Axial			Excel x METÁLICA 3D (%)	Excel X SAP2000 (%)
Barras	Nó a	Nó b	Excel	METÁLICA 3D	SAP2000		
1	1	13	57,7526	57,7530	57,7570	-0,0007	-0,0076
2	2	14	59,8692	59,8690	59,8602	0,0004	0,0151
3	3	15	-56,4361	-56,4360	-56,4284	0,0001	0,0137
4	4	16	-54,4839	-54,4840	-54,4877	-0,0002	-0,0071
5	13	14	-0,0467	-0,0470	-0,0467	-0,5689	0,0003
6	14	15	-0,0273	-0,0270	-0,0273	0,9867	0,0002
7	15	16	-0,0273	-0,0270	-0,0277	0,9867	-0,0768
8	16	13	-0,0467	-0,0470	-0,0467	-0,5689	0,0003
9	13	12	35,0487	35,0490	35,0484	-0,0009	0,0007
10	14	9	33,5309	33,5310	33,5260	-0,0002	0,0147
11	15	11	-56,2145	-56,2140	-56,2068	0,0010	0,0137
12	16	10	-54,9010	-54,9010	-54,9022	0,0000	-0,0021
13	12	9	-0,0234	-0,0230	-0,0234	-0,0099	-0,0013
14	9	11	-3,9017	-3,9020	-3,9017	-0,0079	0,0006
15	11	10	-0,0409	-0,0410	-0,0409	-0,0002	0,0730
16	10	12	-2,2346	-2,2350	-2,2346	-0,0161	0,0002
17	9	6	31,7177	31,7180	31,7191	-0,0011	-0,0045
18	11	8	-9,9695	-9,9700	-9,9790	-0,0046	-0,0951
19	10	7	-14,8445	-14,8440	-14,8390	0,0031	0,0366
20	12	5	35,2388	35,2390	35,2386	-0,0004	0,0007
21	5	6	2,9319	2,9320	2,9286	-0,0042	0,1116
22	6	8	-2,4394	-2,4390	-2,4333	0,0175	0,2528
23	8	7	-0,9241	-0,9240	-0,9266	0,0108	-0,2671
24	7	5	-4,1403	-4,1400	-4,1447	0,0063	-0,1082

Tabela 12 - Esforços solicitantes das barras.

(continuação)

Descrição			Força Axial			Excel x METÁLICA 3D (%)	Excel X SAP2000 (%)
Barras	Nó a	Nó b	Excel	METÁLICA 3D	SAP2000		
25	4	13	-15,6320	-15,6320	-15,6329	-0,0003	-0,0062
26	13	10	14,1986	14,1990	142,0031	-0,0031	-0,0124
27	10	5	-29,1885	-29,1880	-29,1933	0,0016	-0,0164
28	6	11	-30,5148	-30,5150	-30,5062	-0,0008	0,0281
29	11	14	17,2943	17,2940	17,2911	0,0019	0,0184
30	14	3	-15,6502	-15,6500	-15,6483	0,0011	0,0118
31	3	16	-0,3664	-0,3660	-0,3653	0,1039	0,2856
32	2	13	0,3381	0,3380	0,3371	0,0321	0,3089
33	13	9	-0,6470	-0,6470	-0,6451	0,0000	0,2914
34	16	11	0,6049	0,6050	0,6031	-0,0149	0,3073
35	7	11	-1,7206	-1,7200	-1,7156	0,0372	0,2942
36	5	9	1,6849	1,6850	1,6799	-0,0046	0,2996
37	5	20	2,8406	2,8410	2,8279	-0,0123	0,4477
38	6	17	-1,0771	-1,0770	-1,0761	0,0070	0,0875
39	7	19	-16,2140	-16,2140	-16,2065	-0,0002	0,0460
40	8	18	-9,6764	-9,6760	-9,6849	0,0042	-0,0883
41	17	18	2,1619	2,1620	2,1496	-0,0062	0,5687
42	18	19	-0,9482	-0,9480	-0,9477	0,0182	0,0466
43	19	20	2,0997	2,1000	2,0992	-0,0142	0,0251
44	20	17	-0,9163	-0,9160	-0,9160	0,0281	0,0289
45	5	17	-0,8464	-0,8460	-0,8377	0,0487	1,0309
46	5	19	10,1800	10,1800	10,1754	0,0001	0,0457
47	18	6	5,8853	5,8850	5,8965	0,0045	-0,1914
48	18	7	0,3185	0,3180	0,3219	0,1460	-0,0738
49	17	21	2,1080	2,1080	2,1090	-0,0016	-0,0510
50	18	22	-0,0782	-0,0780	-0,0783	0,2278	-0,1700
51	19	23	0,2058	0,2050	0,2070	0,4095	-0,5660
52	20	24	4,9295	4,9300	4,9261	-0,0101	0,0680
53	21	22	1,2964	1,2960	1,2948	0,0320	0,1268
54	22	23	-0,3241	-0,3240	-0,3236	0,0320	0,1456
55	23	24	2,5199	2,5200	2,5232	-0,0051	-0,1322
56	24	21	-0,0674	-0,0670	-0,0666	0,2050	1,6710
57	24	17	0,6420	0,6420	0,6372	0,0077	0,7533
58	24	19	-7,7858	-7,7860	-7,7771	-0,0031	0,1111
59	18	21	-3,1226	-3,1220	-3,1245	0,0181	-0,0629
60	18	23	-0,4326	-0,4330	-0,4343	-0,1023	-0,4027
61	25	17	-2,2223	-2,2220	-2,2178	0,0127	0,2010
62	25	20	-0,1418	-0,1420	-0,1518	-0,1385	-0,0024

Tabela 12 - Esforços solicitantes das barras.

(conclusão)

Descrição			Força Axial			Excel x METÁLICA 3D (%)	Excel X SAP2000 (%)
Barras	Nó a	Nó b	Excel	METÁLICA 3D	SAP2000		
63	25	21	0,2778	0,2780	0,2747	-0,0718	-0,0234
64	25	24	-1,5941	-1,5940	-1,5843	0,0050	0,6145
65	26	18	-0,4812	-0,4810	-0,4791	0,0458	0,4456
66	26	19	-1,8829	-1,8830	-1,8865	-0,0071	-0,1931
67	26	22	1,3363	1,3360	1,3346	0,0235	0,1279
68	26	23	2,5974	2,5970	2,6008	0,0163	-0,1315
69	27	6	-10,6169	-10,6170	-10,6009	-0,0011	0,1503
70	27	5	-8,1492	-8,1490	-8,1582	0,0023	-0,1111
71	27	17	7,0833	7,0830	7,0666	0,0044	0,2361
72	27	20	4,3406	4,3400	4,3518	0,0143	-0,2575
73	28	7	-2,1780	-2,1780	-2,1838	0,0021	-0,2646
74	28	8	-1,2496	-1,2500	-1,2421	-0,0345	0,5947
75	28	18	5,1960	5,1960	5,1878	-0,0001	0,1582
76	28	19	6,2279	6,2280	6,2338	-0,0010	-0,0943

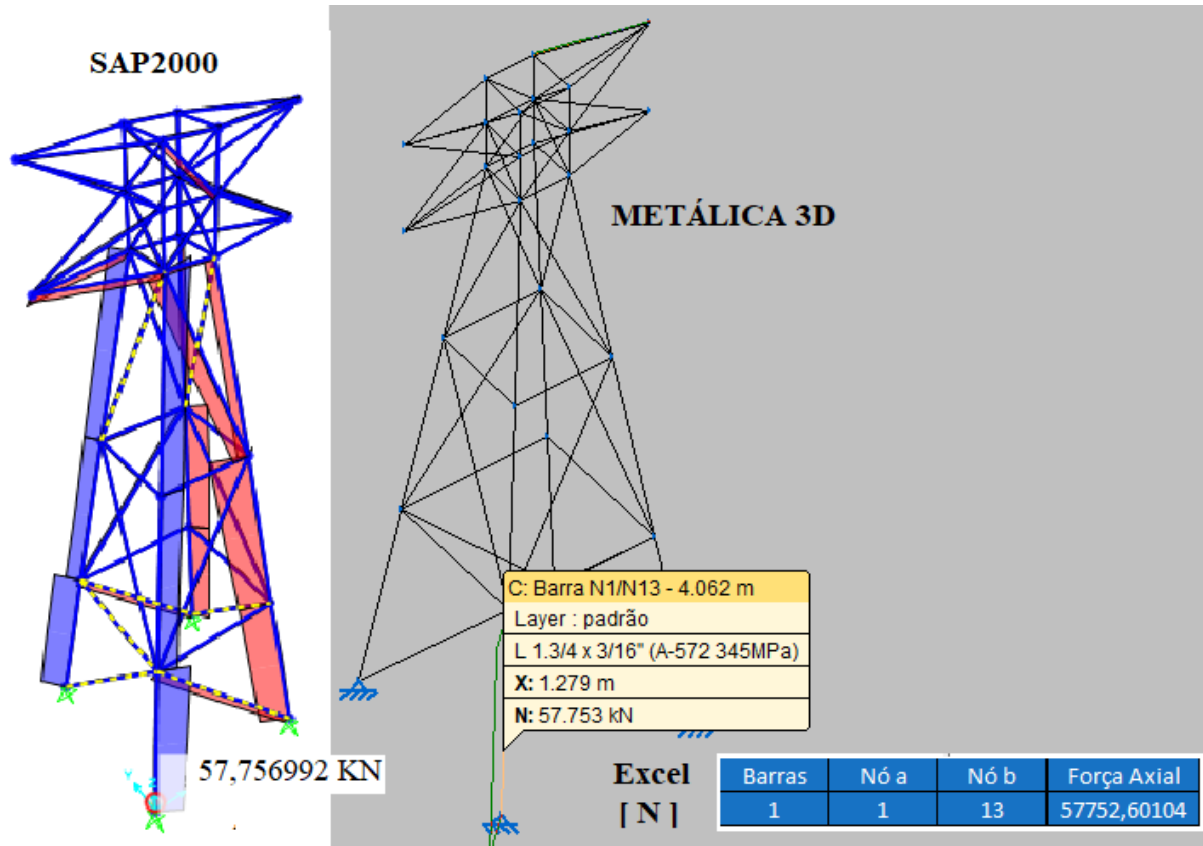
Fonte: Produção do próprio autor.

As comparações entre Excel x METÁLICA 3D e Excel x SAP2000 percebe-se que a diferença percentual entre os esforços solicitantes é pequena, os valores abaixo de 1% e em outras praticamente zero quando se compara com a planilha Excel.

Em uma análise final segundo NBR 8800 (2007), e atendendo aos critérios de ELU (estado limite último), deve-se aplicar os coeficientes de majoração que no caso de uma torre de transmissão de energia seria de 40% para cargas gravitacionais permanentes e 40% para as cargas variáveis relacionadas ao vento incidindo na estrutura. Diante destas considerações estas diferenças percentuais acabam sendo irrisórias visto que os coeficientes de majoração já admitem as incertezas dos próprios carregamentos agindo na estrutura. Diante da magnitude das forças aplicadas, são diferenças que chegam a ordem de alguns quilos [kg] na estrutura. Da mesma forma e sendo bem conservador pode-se dizer que a planilha Excel está validada no que diz respeito ao cálculo dos esforços solicitantes nas barras.

A Figura 67 apresenta uma tela adaptada com software METÁLICA 3D onde se compara os esforços solicitantes na barra 01. As comparações são entre METÁLICA 3D x Excel x SAP2000 e percebe-se que não existe diferença entre os três softwares.

Figura 67 – Comparativo barra 01 entre METÁLICA 3D x Excel x SAP2000.



Fonte: Produção do próprio autor.

Diante dos dados analisados pode-se caracterizar com segurança que as planilhas Excel estão validas e podendo as mesmas serem usadas para análise estrutural. Um estudo de caso de uma torre de transmissão aplicando todos os carregamentos existentes, incluindo hipótese de cabo se rompendo e análise de segunda ordem será apresentado na sequencia. Nesta etapa será validada a etapa de dimensionamento da estrutura segundo a NBR 8800 (2007).

4.2 SIMULAÇÃO

Para um melhor esclarecimento do software proposto, fez-se necessário a aplicação de um modelo com condições parecidas com a de uma torre na prática. A Figura 68 apresenta o pré-dimensionamento dos cabos, a Figura 69 apresenta dados referentes a condições climáticas, entre elas a velocidade do vento, altitude e temperatura conforme o local de implantação da torre, e a Figura 70 apresenta a distância entre torres. Nas Figuras 68, 69 e 70 existem dados relacionados a condições de contorno do sistema que devem ser inseridas pelo usuário.

Figura 68 – Pré-dimensionamento de cabos.

CALCULO DE TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA - NBR 5422

Menu Inicial

DADOS PRELIMINARES DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

CAPACIDADE DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

POTÊNCIA: 1700 MVA
 LT: 500 kV
 CIRCUITOS: 1

DETERMINAÇÃO DA CORRENTE COM CAPACIDADE DE 85%:

$$I = \frac{N}{\sqrt{3} \times V} = 1668,5423 \text{ A}$$

CORRENTE POR CABO

$$i = \frac{I}{n} = 1668,5423 \text{ A}$$

CABO CAA PRÉ DIMENSIONADO: CAA 74
 CABO CAA UTILIZADO: CAA 74
 CABO PARA RAIOS UTILIZADO: PARA RAIOS 7

ISOLADOR DE SUSPENSÃO PADRÃO:

PESO: 4,60 kg
 DIAMETRO: 0,2550 m
 PASSO: 0,1460 m

DADOS CABO CAA

PESO: 3,7610 kg/m
 DIAMETRO: 0,0458 m
 CARGA RUP: 252320 N

DADOS CABO PARA RAIOS

PESO: 1,2090 kg/m
 DIAMETRO: 0,0159 m
 CARGA RUP: 188646 N

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 69 – Condições climáticas.

CARACTERÍSTICAS DA TORRE INSTALADA:

REGIÃO INSTALADA: RS
 ALTITUDE DA LINHA DE TRANSMISSÃO:
 ALTITUDE: 14,0000 m

CATEGORIA DO TERRENO: A
 ALTURA MÁXIMA DA TORRE: 14,0000 m

CASO TENHA INFORMAÇÕES DO LOCAL:

VB VENTO: 30 m/s 30,0000 m/s
 TEMP. MIN: -4 °C -4,0000 °C
 TEMP. MED: 18 °C 18,0000 °C
 TEMP. MÁX: 36 °C 36,0000 °C

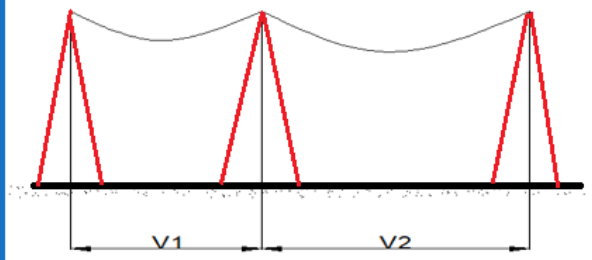
Coefficiente de rugosidade kr= 1,0800
 Coeficiente de correção do período de integração (t) kd= 1,1500
 Coeficiente de correção de altura da torre kh= 1,0284

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 70 – Distância entre as torres.

VÃO DE PESO = VÃO DE VENTO PARA TORRE NIVELADA:

V1 380,0000 m
 V2 380,0000 m

$$V_v = \frac{v1 + v2}{2} = 380,0000 \text{ m}$$


Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 13 apresenta os dados iniciais referentes a geometria do modelo, considerando as coordenadas x, y e z, determinação das barras, grupos, descrição, tipo do perfil escolhido e a incidências da carga de vento nos nós. Coordenadas inseridas em metros [m].

Tabela 13 – Características geométricas do modelo.

(continua)

Junções	x	y	z	Barra	Junção a	Junção b	Grupos	Descrição	Perfil	Ângulo de Vento nas Junções
Junção 1	0	0	0	Barra 1	1	5	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
Junção 2	0	0	1	Barra 2	2	6	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	0
Junção 3	1	0	1	Barra 3	3	7	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Sem Vento
Junção 4	1	0	0	Barra 4	4	8	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 5	0	4	0	Barra 5	5	6	Grupo 2	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
Junção 6	0	4	1	Barra 6	6	7	Grupo 2	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	0
Junção 7	1	4	1	Barra 7	8	7	Grupo 2	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Sem Vento
Junção 8	1	4	0	Barra 8	5	8	Grupo 2	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 9	0	8	0	Barra 9	5	9	Grupo 3	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
Junção 10	0	8	1	Barra 10	6	10	Grupo 3	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	0
Junção 11	1	8	1	Barra 11	7	11	Grupo 3	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Sem Vento
Junção 12	1	8	0	Barra 12	8	12	Grupo 3	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 13	0	12	0	Barra 13	9	10	Grupo 4	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
Junção 14	0	12	1	Barra 14	10	11	Grupo 4	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	0
Junção 15	1	12	1	Barra 15	12	11	Grupo 4	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Sem Vento
Junção 16	1	12	0	Barra 16	9	12	Grupo 4	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 17	0	13	0	Barra 17	9	13	Grupo 5	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
Junção 18	0	13	1	Barra 18	10	14	Grupo 5	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	0
Junção 19	1	13	1	Barra 19	11	15	Grupo 5	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Sem Vento
Junção 20	1	13	0	Barra 20	12	16	Grupo 5	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 21	0	14	0	Barra 21	13	14	Grupo 6	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
Junção 22	0	14	1	Barra 22	14	15	Grupo 6	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	0
Junção 23	1	14	1	Barra 23	16	15	Grupo 6	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Sem Vento
Junção 24	1	14	0	Barra 24	13	16	Grupo 6	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 25	3	14	0,5	Barra 25	13	17	Grupo 7	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 26	3	12	0,5	Barra 26	14	18	Grupo 7	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	90
Junção 27	-2	14	0,5	Barra 27	15	19	Grupo 7	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
Junção 28	-2	12	0,5	Barra 28	16	20	Grupo 7	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Ambos
				Barra 29	17	18	Grupo 8	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 30	18	19	Grupo 8	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 31	20	19	Grupo 8	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 32	17	20	Grupo 8	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 33	17	21	Grupo 9	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 34	18	22	Grupo 9	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 35	19	23	Grupo 9	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 36	20	24	Grupo 9	Montante Vert.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 37	21	22	Grupo 10	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 38	22	23	Grupo 10	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 39	24	23	Grupo 10	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 40	21	24	Grupo 10	Montante Hori.	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 41	19	25	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 42	20	25	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 43	25	23	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 44	24	25	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 45	26	15	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 46	16	26	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	

Tabela 13 – Características geométricas do modelo.

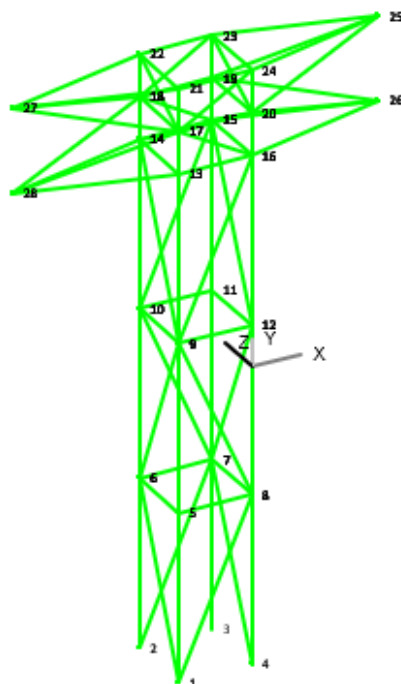
(conclusão)

Junções	x	y	z	Barra	Junção a	Junção b	Grupos	Descrição	Perfil	Ângulo de Vento nas Junções
				Barra 47	26	19	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 48	26	20	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 49	17	27	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 50	18	27	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 51	21	27	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 52	27	22	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 53	13	28	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 54	28	14	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 55	28	17	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 56	28	18	Grupo 11	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 57	1	8	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 58	2	7	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 59	8	9	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 60	7	10	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 61	9	16	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 62	10	15	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 63	16	17	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 64	15	18	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 65	17	24	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 66	18	23	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 67	1	6	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 68	4	7	Grupo 1	Perna Engastada	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 69	6	9	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 70	7	12	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 71	9	14	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 72	12	15	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 73	14	17	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 74	15	20	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 75	17	22	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	
				Barra 76	20	23	Grupo 12	Diagonal	1.3/4"x1.3/4"x3/16	

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 71 representa o modelo 3D gerado pela planilha Excel, dando condições ao usuário de verificar se a estrutura está geometricamente correta. A numeração representa os nós da estrutura.

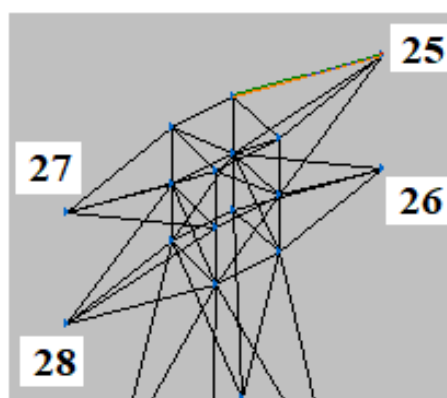
Figura 71 – Modelo 3D Excel



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 72 descreve a mísula de suspensão dos cabos, indicando a posição dos para-raios e cabos condutores. Os nós 27 e 25 representam a posição do para-raios e os nós 28 e 26 os cabos condutores.

Figura 72 – Mísula de suporte de cabos.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 73 representa o formulário de escolha da aplicação das cargas reativas na estrutura, considerado qual cabo será simulado rompendo. No caso do modelo adotado tem-se um cabo condutor rompendo no nó 28 e para-raios no nó 27.

Figura 73 – Formulário simulação de cabos rompendo.

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 74 representa a tabela de majorações dos esforços solicitantes segundo a NBR 8800 (2007), atendendo aos critérios do ELU (estado limite ultimo).

Figura 74 – Tabela de majorações de esforços solicitantes da planilha Excel.

Hipótese 1 Vento 0°	1,40	G Perm.	1,00	1,40	Q Vento
Hipótese 1 Vento 90°	1,40	G Perm.	1,00	1,40	Q Vento
Hipótese 2	1,40	G Perm.	1,00	1,40	Q Temp.
Hipótese 3	1,40	G Perm.	1,00	1,40	Q Temp.
Combinções para efeito de 2° ordem: (Caso não queira, considerar 0 e 1)					
Hipótese 1 Vento 0°	0,00	3%	G Perm.	1,00	E0
Hipótese 1 Vento 90°	0,00	3%	G Perm.	1,00	E0
Hipótese 2	0,00	3%	G Perm.	1,00	E0
Hipótese 3	0,00	3%	G Perm.	1,00	E0

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 75 representa a tela de combinações do Excel considerando quatro hipóteses mais relevantes para o dimensionamento de torres de transmissão. As hipóteses 1 representam a ação do vento na direção 0° e 90°, a hipótese 2 a simulação do cabo condutor rompendo e a hipótese 3 a simulação do cabo para-raios rompendo. Vale salientar que as hipóteses de cabo rompendo geram torção na torre. Valores apresentados em Newton [N].

Figura 75 – Tabela de hipóteses – Excel.

Hipótese 1 Vento 0°		Hipótese 1 Vento 90°		Hipótese 2		Hipótese 3	
F _x	F _y	F _y	F _z	F _y	F _z	F _y	F _z
3391,5908	-264,8079	-264,8079	3391,5908	-264,8079	0,0000	-264,8079	0,0000
2249,6958	-175,6513	-175,6513	0,0000	-175,6513	0,0000	-175,6513	0,0000
0,0000	-86,4947	-86,4947	0,0000	-86,4947	0,0000	-86,4947	0,0000
0,0000	-175,6513	-175,6513	2249,6958	-175,6513	0,0000	-175,6513	0,0000
2769,5021	-216,2366	-216,2366	2769,5021	-216,2366	0,0000	-216,2366	0,0000
5053,2920	-394,5499	-394,5499	0,0000	-394,5499	0,0000	-394,5499	0,0000
0,0000	-572,8632	-572,8632	0,0000	-572,8632	0,0000	-572,8632	0,0000
0,0000	-394,5499	-394,5499	4776,3418	-394,5499	0,0000	-394,5499	0,0000
7337,0819	-572,8632	-572,8632	7337,0819	-572,8632	0,0000	-572,8632	0,0000
5053,2920	-394,5499	-394,5499	0,0000	-394,5499	0,0000	-394,5499	0,0000
0,0000	-216,2366	-216,2366	0,0000	-216,2366	0,0000	-216,2366	0,0000
0,0000	-394,5499	-394,5499	4776,3418	-394,5499	0,0000	-394,5499	0,0000
2509,5989	-195,9440	-195,9440	2509,5989	-195,9440	0,0000	-195,9440	0,0000
4043,1606	-315,6811	-315,6811	0,0000	-315,6811	0,0000	-315,6811	0,0000
0,0000	-435,4182	-435,4182	0,0000	-435,4182	0,0000	-435,4182	0,0000
0,0000	-315,6811	-315,6811	3766,2104	-315,6811	0,0000	-315,6811	0,0000
3943,6131	-307,9086	-307,9086	3943,6131	-307,9086	0,0000	-307,9086	0,0000
3160,2796	-246,7477	-246,7477	0,0000	-246,7477	0,0000	-246,7477	0,0000
0,0000	-185,5867	-185,5867	0,0000	-185,5867	0,0000	-185,5867	0,0000
0,0000	-246,7477	-246,7477	3160,2796	-246,7477	0,0000	-246,7477	0,0000
1401,7981	-109,4493	-109,4493	1401,7981	-109,4493	0,0000	-109,4493	0,0000
1793,4648	-140,0298	-140,0298	0,0000	-140,0298	0,0000	-140,0298	0,0000
0,0000	-170,6103	-170,6103	0,0000	-170,6103	0,0000	-170,6103	0,0000
0,0000	-140,0298	-140,0298	1793,4648	-140,0298	0,0000	-140,0298	0,0000
7053,3731	-6495,7683	-6495,7683	2411,0403	-6495,7683	0,0000	-6495,7683	0,0000
20496,5420	-19999,3685	-19999,3685	2411,0403	-19999,3685	0,0000	-19999,3685	0,0000
9464,4134	-6495,7683	-6495,7683	2411,0403	-6495,7683	0,0000	-6495,7683	92437,2464
22907,5822	-19999,3685	-19999,3685	2411,0403	-19999,3685	123637,2183	-19999,3685	0,0000

Fonte: Produção do próprio autor.

Após determinar a combinações mais relevantes para a estrutura, deve-se calcular a mesma, em que o Excel gera a matriz de rigidez global da estrutura, calcula os deslocamentos nodais e os esforços nas barras. A Figura 76 apresenta a tela de carregamento referente a hipótese 1 Vento 0°.

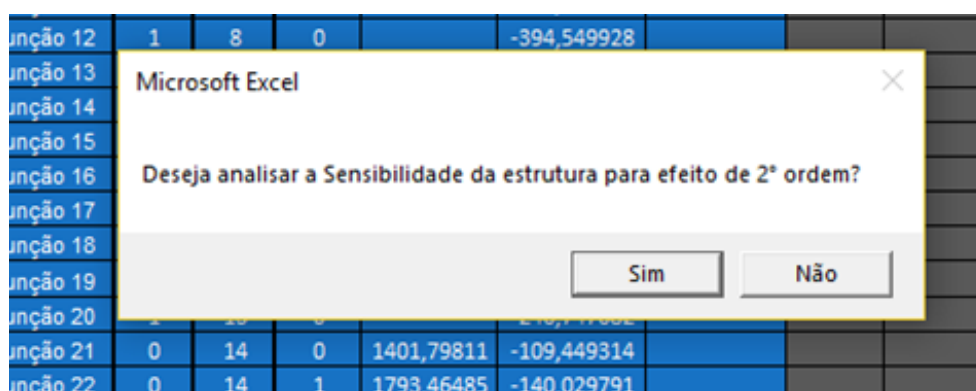
Figura 76 – Hipótese 1 vento 0°.

Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0	3391,59076	-264,807948		0	0	0
Junção 2	0	0	1	2249,69579	-175,651301		0	0	0
Junção 3	1	0	1		-86,494653		0	0	0
Junção 4	1	0	0		-175,651301		0	0	0
Junção 5	0	4	0	2769,50208	-216,236633				
Junção 6	0	4	1	5053,29201	-394,549928				
Junção 7	1	4	1		-572,863223				
Junção 8	1	4	0		-394,549928				
Junção 9	0	8	0	7337,08193	-572,863223				
Junção 10	0	8	1	5053,29201	-394,549928				
Junção 11	1	8	1		-216,236633				
Junção 12	1	8	0		-394,549928				
Junção 13	0	12	0	2509,59894	-195,943967				
Junção 14	0	12	1	4043,16064	-315,681092				
Junção 15	1	12	1		-435,418217				
Junção 16	1	12	0		-315,681092				
Junção 17	0	13	0	3943,61309	-307,908638				
Junção 18	0	13	1	3160,27961	-246,747682				
Junção 19	1	13	1		-185,586727				
Junção 20	1	13	0		-246,747682				
Junção 21	0	14	0	1401,79811	-109,449314				
Junção 22	0	14	1	1793,46485	-140,029791				
Junção 23	1	14	1		-170,610269				
Junção 24	1	14	0		-140,029791				
Junção 25	3	14	0,5	7053,37314	-6495,76832				
Junção 26	3	12	0,5	20496,542	-19999,3685				
Junção 27	-2	14	0,5	9464,41339	-6495,76832				
Junção 28	-2	12	0,5	22907,5822	-19999,3685				

Fonte: Produção do próprio autor.

Após o cálculo da primeira hipótese o programa solicitará do usuário se o mesmo deseja fazer uma análise de sensibilidade da estrutura a deslocamentos. Esta análise é de suma importância para decidir se a estrutura será submetida a análise de segunda ordem ou não.

Figura 77– Tela de decisão para análise de sensibilidade da estrutura.



Fonte: Produção do próprio autor.

E interessante que o usuário sempre escolha a condição sim. A Figura 78 apresenta um pedaço da tela da aba “SENSIBILIDADE AO DESLOCAMENTO”. Na tela original do Excel apresenta todos os dados necessários para o cálculo do parâmetro B_2 . Nesta fase o usuário

deverá selecionar até dez nós para que se possa fazer a análise. Na faixa de cor preta estão determinados os nós analisados.

Figura 78 – Tela aba “SENSIBILIDADE AO DELOCAMENTO” vento 0°.

Barra 6	Barra 14	Barra 22	Barra 30	Barra 38	Barra 8	Barra 16	Barra 24	Barra 32	Barra 40
Barra 30		Barra 38		Barra 8		Barra 16		Barra 24	
Junção 18	Junção 19	Junção 22	Junção 23	Junção 5	Junção 8	Junção 9	Junção 12	Junção 13	Junção 16
13	13	14	14	4	4	8	8	12	12
1	1	1	1	4	4	4	4	4	4
8,0933E-01	8,0947E-01	8,8491E-01	8,8491E-01	1,4121E-01	1,4118E-01	4,0499E-01	4,0499E-01	-3,8647E-04	-3,8647E-04
557,3877	310,6401	310,6401	170,6103	216,2366	394,5499	572,8632	394,5499	195,9440	315,6811
3160,2796	0,0000	1793,4648	0,0000	2769,5021	0,0000	7337,0819	0,0000	2509,5989	0,0000
868,0278	868,0278	481,2503	481,2503	610,7866	610,7866	967,4132	967,4132	511,6251	511,6251
3160,2796	3160,2796	1793,4648	1793,4648	2769,5021	2769,5021	7337,0819	7337,0819	2509,5989	2509,5989
7,5582E-02	7,5441E-02	8,8491E-01	8,8491E-01	2,6379E-01	2,6382E-01	-4,0538E-01	-4,0538E-01	5,5032E-04	5,5032E-04
1349,2781	1349,2781	481,2503	481,2503	2893,9602	2893,9602	2283,1736	2283,1736	1315,7605	1315,7605
4953,7445	4953,7445	1793,4648	1793,4648	17961,5941	17961,5941	15192,0921	15192,0921	7855,0101	7855,0101
1,02482069	1,02477321	1,38764769	1,38764983	1,01265854	1,01266008	0,98239680	0,98239680	1,00002711	1,00002711

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 79 apresenta o cálculo do parâmetro B_2 para a hipótese de vento 0°. Obteve-se um valor de $B_2 = 1,3876$.

Figura 79 – Valor do parâmetro B_2 para vento 0°.

Deslocabilidade Vento 0°:
 $B_2 = 1,3876$

Deslocabilidade Vento 90°:
 $B_2 =$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{Rm} * \frac{\Delta 1h}{h} * \frac{\sum Nsd}{\sum Hsd}}$$

$$\frac{\Delta_{2^a \text{ ordem}}}{\Delta_{1^a \text{ ordem}}}$$

$\leq 1,1 \Rightarrow$ pequena deslocabilidade
 $> 1,1$
 $\leq 1,4 \Rightarrow$ média deslocabilidade
 $> 1,4 \Rightarrow$ grande deslocabilidade

Fonte: Produção do próprio autor.

De maneira análoga aplica-se o mesmo procedimento para a hipótese vento 90°. A Figura 80 apresenta a tela de carregamento referente a hipótese 1 Vento 90°.

Figura 80 – Hipótese 1 vento 90°.

Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0		-264,807948	3391,59076	0	0	0
Junção 2	0	0	1		-175,651301		0	0	0
Junção 3	1	0	1		-86,494653		0	0	0
Junção 4	1	0	0		-175,651301	2249,69579	0	0	0
Junção 5	0	4	0		-216,236633	2769,50208			
Junção 6	0	4	1		-394,549928				
Junção 7	1	4	1		-572,863223				
Junção 8	1	4	0		-394,549928	4776,3418			
Junção 9	0	8	0		-572,863223	7337,08193			
Junção 10	0	8	1		-394,549928				
Junção 11	1	8	1		-216,236633				
Junção 12	1	8	0		-394,549928	4776,3418			
Junção 13	0	12	0		-195,943967	2509,59894			
Junção 14	0	12	1		-315,681092				
Junção 15	1	12	1		-435,418217				
Junção 16	1	12	0		-315,681092	3766,21043			
Junção 17	0	13	0		-307,908638	3943,61309			
Junção 18	0	13	1		-246,747682				
Junção 19	1	13	1		-185,586727				
Junção 20	1	13	0		-246,747682	3160,27961			
Junção 21	0	14	0		-109,449314	1401,79811			
Junção 22	0	14	1		-140,029791				
Junção 23	1	14	1		-170,610269				
Junção 24	1	14	0		-140,029791	1793,46485			
Junção 25	3	14	0,5		-6495,76832	2411,04026			
Junção 26	3	12	0,5		-19999,3685	2411,04026			
Junção 27	-2	14	0,5		-6495,76832	2411,04026			
Junção 28	-2	12	0,5		-19999,3685	2411,04026			

Fonte: Produção do próprio autor.

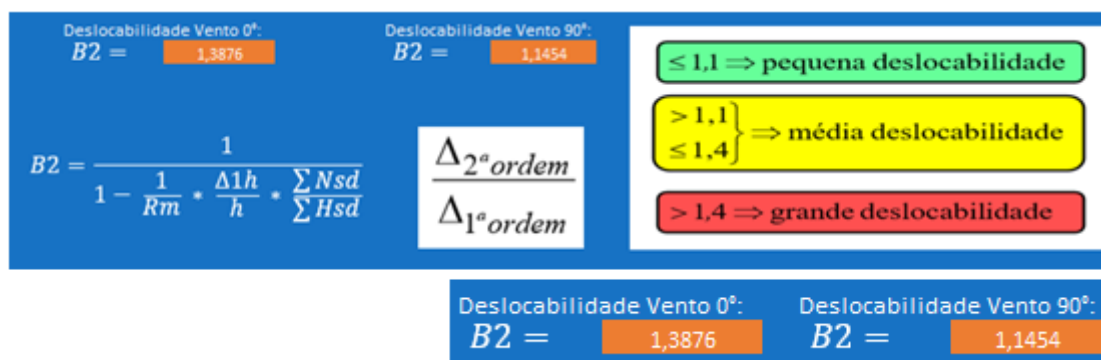
A Figura 81 apresenta um pedaço da tela da aba “SENSIBILIDADE AO DESLOCAMENTO”. Na tela original do Excel apresenta todos os dados necessários para o cálculo do parâmetro B_2 . Nesta fase o usuário deverá selecionar até dez nós para que se possa fazer a análise. Na faixa de cor preta estão determinados os nós analisados.

Figura 81 – Tela aba “SENSIBILIDADE AO DELOCAMENTO” vento 90°.

Barra 5	Barra 13	Barra 21	Barra 29	Barra 37	Barra 7	Barra 15	Barra 23	Barra 31	Barra 39
Barra 30	Barra 38	Barra 7	Barra 15	Barra 23					
Junção 17	Junção 18	Junção 21	Junção 22	Junção 8	Junção 7	Junção 12	Junção 11	Junção 16	Junção 15
13	13	14	14	4	4	8	8	12	12
1	1	1	1	4	4	4	4	4	4
8,0759E-01	8,0933E-01	8,8313E-01	8,8491E-01	1,4118E-01	1,4257E-01	4,0499E-01	4,0520E-01	1,7675E-03	1,7675E-03
557,3877	249,4791	249,4791	140,0298	394,5499	572,8632	394,5499	216,2366	315,6811	435,4182
3943,6131	3160,2796	1401,7981	1793,4648	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
806,8668	806,8668	389,5089	389,5089	967,4132	967,4132	610,7866	610,7866	751,0993	751,0993
7103,8927	7103,8927	3195,2630	3195,2630	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7,5549E-02	7,5582E-02	8,8313E-01	8,8491E-01	2,6382E-01	2,6263E-01	-4,0323E-01	-4,0343E-01	-4,4591E-05	-4,4591E-05
1196,3757	1196,3757	389,5089	389,5089	3072,2735	3072,2735	2104,8603	2104,8603	1494,0738	1494,0738
10299,1556	10299,1556	3195,2630	3195,2630	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,01043240	1,01043694	1,14502150	1,14535528						

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 82 apresenta o cálculo do parâmetro B_2 para a hipótese de vento a 0° e hipótese vento 90° . Obteve-se um valor de $B_2 = 1,3876$ e $1,1454$ respectivamente.

Figura 82 – Valor do parâmetro B_2 para vento 0° e 90° .

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao se analisar o parâmetro B_2 , adota-se sempre o maior valor como referência. $B_2 = 1,3876$ representa uma estrutura com média deslocabilidade. Vale ressaltar que a estrutura modelada possui uma esbelteza satisfatória e o perfil adotado como inicial é o menor da família de cantoneiras de abas iguais do fabricante Gerdau. Diante dessa situação temos uma estrutura com uma rigidez muito baixa.

Para aplicação do MAES em estruturas de média deslocabilidade segue-se as recomendações de Souza, Pereira e Nardim (2016), conforme descrito no quadro 4, ou seja, diminuir a rigidez axial da barra para 0,80EA.

Desta forma o usuário tem que voltar na tela “HIPÓTESES” e selecionar os coeficientes de ponderações para 0,80. Esta seleção faz com que o módulo de elasticidade longitudinal E , seja considerado com 80% do valor e *default*. A Figura 83 apresenta o local correto para o usuário fazer a ponderação de redução de rigidez axial.

Figura 83 – Formulário para redução de rigidez axial.

Combinações para efeito de 2º ordem: (Caso não queira, considerar 0 e 1)					
Hipótese 1 Vento 0°	0,00	3%	G Perm.	0,80	E0
Hipótese 1 Vento 90°	0,00	3%	G Perm.	0,80	E0
Hipótese 2	0,00	3%	G Perm.	0,80	E0
Hipótese 3	0,00	3%	G Perm.	0,80	E0

Fonte: Produção do próprio autor.

Após as devidas ponderações o usuário deverá calcular novamente as hipóteses, agora com 80% da rigidez e fazer novamente a análise de sensibilidade a deslocamento. O valor

encontrado para B_2 na direção vento 0° e vento 90° foi 1,5366 e 1,1885 respectivamente. Analisando os valores, a estrutura continua sendo de média deslocabilidade e neste momento o usuário pode ter dúvidas, pois o parâmetro B_2 aumentou e a mesma não se tornou de grande deslocabilidade.

Os limites de 1,10 e 1,40 são aplicáveis desconsiderando-se as imperfeições iniciais de material, ou seja, tomando as rigidezes originais da estrutura. Se essas imperfeições são consideradas, o que é feito usando-se as rigidezes reduzidas (80% das rigidezes originais), os dois limites passam a ser 1,13 e 1,55, respectivamente. (ARAÚJO, SARMANHO, *et al.*, 2016, p. 108)

Desta forma afirma-se que a estrutura se classifica em média deslocabilidade. A Figura 84 apresenta o novo valor do parâmetro B_2 para a estrutura com rigidez reduzida.

Figura 84 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na sequência o usuário selecionará quais os nós ele restringirá ao deslocamento horizontal e para a estrutura em análise selecionou-se os nós 19, 20, 23 e 24 e aplicou a primeira etapa do MAES considerando a condição *nt – no translation*. Nesta etapa o software automaticamente coloca zero (0) nos nós selecionadas considerando reações de apoios horizontais fictícias e calcula os deslocamentos e esforços solicitantes. A Figura 85 apresenta o formulário para escolha dos nós que se tornam reações fictícias horizontais para a hipótese vento 0° .

Figura 85 – Formulário das reações horizontais fictícias – hipótese vento 0° .

EFEITO DE 2º ORDEM
 MAES - MÉTODO CONFORME NBR8800
 CONSIDERAR EFEITO DE 2º ORDEM
 NAS HIPÓTESES 1 VENTO 0° E 90°
TRAVAMENTO DOS NÓS *nt - no translation*
 Informar os nós para travamento Vento 0°

Junção 23	Junção 24	Junção 19	Junção 20
-----------	-----------	-----------	-----------

Importa e Calcula
 Efeito de 2º ordem
 Hipótese 1 vento 0°

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 86 apresenta a tela do Excel considerando os nós determinados pelo usuário como restrições fictícias horizontais para a hipótese vento 0°.

Figura 86 – Tela Excel – etapa *nt – no translation* – vento 0°.

Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0	3391,59076	-264,807948		0	0	0
Junção 2	0	0	1	2249,69579	-175,651301		0	0	0
Junção 3	1	0	1		-86,494653		0	0	0
Junção 4	1	0	0		-175,651301		0	0	0
Junção 5	0	4	0	2769,50208	-216,236633				
Junção 6	0	4	1	5053,29201	-394,549928				
Junção 7	1	4	1		-572,863223				
Junção 8	1	4	0		-394,549928				
Junção 9	0	8	0	7337,08193	-572,863223				
Junção 10	0	8	1	5053,29201	-394,549928				
Junção 11	1	8	1		-216,236633				
Junção 12	1	8	0		-394,549928				
Junção 13	0	12	0	2509,59894	-195,943967				
Junção 14	0	12	1	4043,16064	-315,681092				
Junção 15	1	12	1		-435,418217				
Junção 16	1	12	0		-315,681092				
Junção 17	0	13	0	3943,61309	-307,908638				
Junção 18	0	13	1	3160,27961	-246,747682				
Junção 19	1	13	1		-185,586727		0		
Junção 20	1	13	0		-246,747682		0		
Junção 21	0	14	0	1401,79811	-109,449314				
Junção 22	0	14	1	1793,46485	-140,029791				
Junção 23	1	14	1		-170,610269		0		
Junção 24	1	14	0		-140,029791		0		
Junção 25	3	14	0,5	7053,37314	-6495,76832				
Junção 26	3	12	0,5	20496,542	-19999,3685				
Junção 27	-2	14	0,5	9464,41339	-6495,76832				
Junção 28	-2	12	0,5	22907,5822	-19999,3685				

TRAVAMENTO DOS NÓS nt - no translation
 Informar os nós para travamento Vento 0°

Junção 23 Junção 24 Junção 19 Junção 20

Importa e Calcula
Efeito de 2º ordem
Hipótese 1 vento 0°

Fonte: Produção do próprio autor.

A próxima etapa do MAES é a condição *lt – lateral translation*. Nesta etapa o software considera o valor das reações fictícias como carregamento único na estrutura, mas com o detalhe de ser ao contrário da reação. As Figuras 87 e 88 apresentam, respectivamente, o botão de acionamento da condição *lt – lateral translation* e a tela do Excel com os carregamentos nos nós referentes a condição de apoio fictício na hipótese vento 0° respectivamente.

Figura 87 – *lt* – lateral translation vento 0°.REAÇÕES DOS NÓS - *lt* lateral translation

Importar e Calcular
Efeito de 2º ordem
vento 0°

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 88 – Tela Excel – etapa *lt* – lateral translation – vento 0°.

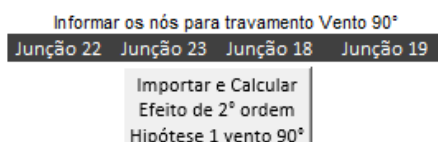
Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0				0	0	0
Junção 2	0	0	1				0	0	0
Junção 3	1	0	1				0	0	0
Junção 4	1	0	0				0	0	0
Junção 5	0	4	0						
Junção 6	0	4	1						
Junção 7	1	4	1						
Junção 8	1	4	0						
Junção 9	0	8	0						
Junção 10	0	8	1						
Junção 11	1	8	1						
Junção 12	1	8	0						
Junção 13	0	12	0						
Junção 14	0	12	1						
Junção 15	1	12	1						
Junção 16	1	12	0						
Junção 17	0	13	0						
Junção 18	0	13	1						
Junção 19	1	13	1	55780,6538					
Junção 20	1	13	0	58532,5762					
Junção 21	0	14	0						
Junção 22	0	14	1						
Junção 23	1	14	1	-13609,362					
Junção 24	1	14	0	-16564,264					
Junção 25	3	14	0,5						
Junção 26	3	12	0,5						
Junção 27	-2	14	0,5						
Junção 28	-2	12	0,5						

Fonte: Produção do próprio autor.

De maneira análoga fez-se os mesmos procedimentos para a hipótese vento 90°. As Figuras 89 e 90 apresentam o formulário para escolha dos nós que se tornam reações fictícias horizontais para a hipótese vento 90° e a tela do Excel considerando os nós determinados pelo usuário como restrições fictícias horizontais para a hipótese vento 90° respectivamente. Os nós escolhidos para análise a vento 90° foram os 18, 19, 22 e 23.

Figura 89 – *nt – no translation* vento 90°.

EFEITO DE 2° ORDEM
 MAES - MÉTODO CONFORME NBR8800
 CONSIDERAR EFEITO DE 2° ORDEM
 NAS HIPÓTESES 1 VENTO 0° E 90°
TRAVAMENTO DOS NÓS *nt - no translation*



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 90 – Tela Excel etapa *nt – no translation* – vento 90°.

Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0		-264,807948	3391,59076	0	0	0
Junção 2	0	0	1		-175,651301		0	0	0
Junção 3	1	0	1		-86,494653		0	0	0
Junção 4	1	0	0		-175,651301	2249,69579	0	0	0
Junção 5	0	4	0		-216,236633	2769,50208			
Junção 6	0	4	1		-394,549928				
Junção 7	1	4	1		-572,863223				
Junção 8	1	4	0		-394,549928	4776,3418			
Junção 9	0	8	0		-572,863223	7337,08193			
Junção 10	0	8	1						
Junção 11	1	8	1						
Junção 12	1	8	0						
Junção 13	0	12	0						
Junção 14	0	12	1						
Junção 15	1	12	1						
Junção 16	1	12	0		-315,681092	3766,21043			
Junção 17	0	13	0		-307,908638	3943,61309			
Junção 18	0	13	1		-246,747682				0
Junção 19	1	13	1		-185,586727				0
Junção 20	1	13	0		-246,747682	3160,27961			
Junção 21	0	14	0		-109,449314	1401,79811			
Junção 22	0	14	1		-140,029791				0
Junção 23	1	14	1		-170,610269				0
Junção 24	1	14	0		-140,029791	1793,46485			
Junção 25	3	14	0,5		-6495,76832	2411,04026			
Junção 26	3	12	0,5		-19999,3685	2411,04026			
Junção 27	-2	14	0,5		-6495,76832	2411,04026			
Junção 28	-2	12	0,5		-19999,3685	2411,04026			

Informar os nós para travamento Vento 90°

Junção 22	Junção 23	Junção 18	Junção 19
-----------	-----------	-----------	-----------

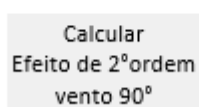
Importar e Calcular
 Efeito de 2° ordem
 Hipótese 1 vento 90°

Fonte: Produção do próprio autor.

As Figuras 91 e 92 apresentam o botão de acionamento da condição *lt* – *lateral translation* para hipótese vento 90° e a tela do Excel com os carregamentos nos nós referentes à condição de apoio fictício na hipótese de vento a 90° respectivamente.

Figura 91 – *lt* – *lateral translation* – vento 90°.

REAÇÕES DOS NÓS - *lt* lateral translation



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 92 – Tela Excel condição *lt* – *lateral translation* – vento 90°.

Junções	x	y	z	Fx	Fy	Fz	UX	UY	UZ
Junção 1	0	0	0				0	0	0
Junção 2	0	0	1				0	0	0
Junção 3	1	0	1				0	0	0
Junção 4	1	0	0				0	0	0
Junção 5	0	4	0						
Junção 6	0	4	1						
Junção 7	1	4	1						
Junção 8	1	4	0						
Junção 9	0	8	0						
Junção 10	0	8	1						
Junção 11	1	8	1						
Junção 12	1	8	0						
Junção 13	0	12	0						
Junção 14	0	12	1						
Junção 15	1	12	1						
Junção 16	1	12	0						
Junção 17	0	13	0						
Junção 18	0	13	1			29081,3159			
Junção 19	1	13	1			27629,9869			
Junção 20	1	13	0						
Junção 21	0	14	0						
Junção 22	0	14	1			-11308,6165			
Junção 23	1	14	1			-10124,0336			
Junção 24	1	14	0						
Junção 25	3	14	0,5						
Junção 26	3	12	0,5						
Junção 27	-2	14	0,5						
Junção 28	-2	12	0,5						

Fonte: Produção do próprio autor.

Após a aplicação dos efeitos de segunda ordem nas hipóteses de vento a 0° e 90°, o usuário deve sequencialmente fazer as hipóteses simulando os cabos rompendo, mas conforme recomendação da NBR 8800 (2007) não existe a necessidade de aplicação dos efeitos de segunda ordem. Na sequência, após a determinação dos esforços solicitantes, o usuário deve seguir para a etapa dimensionamento.

A Figura 93 apresenta a tela de dimensionamento dos perfis, onde o usuário pode fazer as verificações para tração e compressão, bem como escolher diferentes tipos de material. Na sequência das colunas da esquerda para a direita, tem-se o perfil escolhido inicialmente, o redimensionado e um possível perfil para uma futura remodelagem. Percebe-se que de modo geral o software dimensionou todas as barras apresentando perfis mais robustos que o sugerido inicialmente e em especial no grupo 1 apresentou perfis diferentes para o mesmo grupo. Por questão de simetria as quatro pernas da torre devem ter os mesmos perfis e para isso se faz necessário uma remodelagem até que se compatibilize os perfis escolhidos com o perfil final redimensionado. Desta forma o usuário deve indicar na coluna perfil final escolhido o maior perfil dimensionado do grupo e clicar no botão “RECALCULAR HIPÓTESES COM PERFIL REDIMENSIONADO”.

Figura 93 – Tela dimensionamento das barras a tração e compressão.

Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	Esbelteza	Tração	Compressão	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 1/2"	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta	DIMENSIONAMENTO DO PERFIL PARA A ESTRUTURA CONFORME NBR-8800
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 1/2"	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta	SELECIONE O TIPO DE MATERIAL DE CANTONEIRA UTILIZADO
1.3/4"x1.3/4"x3/16	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta	TIPO DE AÇO: ASTM A 572 GRAU 50
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	Menu Inicial
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	REINICIA HISTÓRICO DE PERFIL
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	Verificar tração
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 1/2"	Grupo 3		OK	Suporta	Suporta	Verificar Compressão
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 1/2"	Grupo 3		OK	Suporta	Suporta	RECALCULAR HIPÓTESES COM PERFIL REDIMENSIONADO
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 5/16"	Grupo 3		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 5/16"	Grupo 3		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	5" x 24,1	Grupo 5		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	6" x 36	Grupo 5		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 5/16"	Grupo 5		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	3" x 3" x 5/16"	Grupo 5		OK	Suporta	Suporta	
1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 6		OK	Suporta	Suporta	

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir desta fase, teve-se que repetir todos os passos anteriormente executados incluindo as análises de segunda ordem através do MAES. Na primeira interação o parâmetro B_2 diminuiu consideravelmente, visto que o fato de utilizar perfis mais rígidos tornou a estrutura menos deslocável, mas ainda classificada como de média deslocabilidade. As

Figuras 94 e 95 apresentam os valores do parâmetro B_2 para primeira interação, considerando rigidez bruta e rigidez reduzida a 80% respectivamente.

Figura 94 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez bruta – 1ª interação.

Deslocabilidade Vento 0°:	Deslocabilidade Vento 90°:
$B_2 = 1,1513$	$B_2 = 1,0556$

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 95 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida 80% – 1ª interação.

Deslocabilidade Vento 0°:	Deslocabilidade Vento 90°:
$B_2 = 1,1965$	$B_2 = 1,0705$

Fonte: Produção do próprio autor.

Após a primeira interação dimensionou-se novamente as barras e o grupo 1 manteve-se, mas desta vez houve divergência dentro do grupo 3. De maneira análoga faz-se uma nova interação. A Figura 96 apresenta a tela de dimensionamento das barras a tração e compressão.

Figura 96 – Tela dimensionamento das barras a tração e compressão – 1ª interação.

Barra	Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	Esbeltez	Tração	Compressão
1	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
2	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
3	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
4	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
5	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
6	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
7	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
8	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
9	3" x 3" x 1/2"	4" x 16,8	Grupo 3	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
10	3" x 3" x 1/2"	4" x 16,8	Grupo 3	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
11	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 3	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
12	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 3	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
13	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
14	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
15	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
17	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
18	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
19	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
20	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta

Fonte: Produção do próprio autor.

Para a segunda interação o parâmetro B_2 diminuiu novamente, fato que se explica facilmente, ou seja, a estrutura está mais rígida e conseqüentemente menos deslocável. As

Figuras 97 e 98 apresentam os valores do parâmetro B_2 para a segunda interação, considerando rigidez bruta e rigidez reduzida a 80% respectivamente. A estrutura continua se classificando como de média deslocabilidade e consequentemente deve-se aplicar o MAES.

Figura 97 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez bruta – 2ª interação.

Deslocabilidade Vento 0°:	Deslocabilidade Vento 90°:
$B_2 =$ 1,1375	$B_2 =$ 1,0510

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 98 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida 80% – 2ª interação.

Deslocabilidade Vento 0°:	Deslocabilidade Vento 90°:
$B_2 =$ 1,1780	$B_2 =$ 1,0645

Fonte: Produção do próprio autor.

Após a segunda interação, notou-se que durante o rearranjo estrutural dos perfis, o grupo 5 que é um montante vertical logo acima do grupo 3 possui um perfil maior. Desta forma faz necessária uma nova remodelagem com uma nova interação. A Figura 99 apresenta a tela de dimensionamento das barras a tração e compressão.

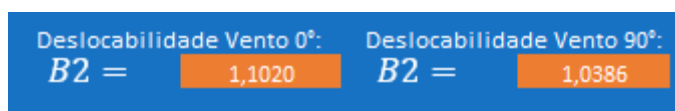
Figura 99 – Tela dimensionamento das barras a tração e compressão - 2ª interação.

Barra	Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	Esbeltez	Tração	Compressão
1	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
2	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
3	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
4	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
5	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 2	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
6	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 2	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
7	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 2	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
8	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 2	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
9	4" x 16,8	4" x 16,8	Grupo 3	4" x 16,8	OK	Suporta	Suporta
10	4" x 16,8	4" x 16,8	Grupo 3	4" x 16,8	OK	Suporta	Suporta
11	4" x 16,8	4" x 16,8	Grupo 3	4" x 16,8	OK	Suporta	Suporta
12	4" x 16,8	4" x 16,8	Grupo 3	4" x 16,8	OK	Suporta	Suporta
13	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 4	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
14	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 4	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
15	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 4	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	Grupo 4	1.3/4" x 1.3/4" x 3/16	OK	Suporta	Suporta
17	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
18	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
19	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
20	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
21	6" x 36	6" x 36	Grupo 6	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
22	6" x 36	6" x 36	Grupo 6	6" x 36	OK	Suporta	Suporta

Fonte: Produção do próprio autor.

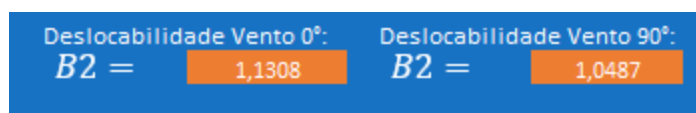
Para a terceira interação o parâmetro B_2 diminuiu novamente, chegando muito próximo do limite entre estrutura de pequena / média deslocabilidade. As Figuras 100 e 101 apresentam os valores do parâmetro B_2 para a terceira interação, considerando rigidez bruta e rigidez reduzida a 80% respectivamente. A estrutura continua se classificando como de média deslocabilidade e conseqüentemente deve-se aplicar o MAES.

Figura 100 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez bruta – 3ª interação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 101 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida 80% – 3ª interação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após todos os procedimentos e análises necessárias, houve convergência no dimensionamento dos perfis, ou seja, o perfil escolhido tornou-se o perfil dimensionado. Mas por questões de conservadorismos fez-se mais uma interação e o valor de B_2 também convergiu para o mesmo valor obtido na terceira interação. A Figura 102 apresenta os valores do parâmetro B_2 para a quarta interação.

Figura 102 – Valor do parâmetro B_2 para rigidez reduzida – 4ª interação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Diante da análise realizada a estrutura foi dimensionada considerando os parâmetros de segunda ordem e é classificada como estrutura de média deslocabilidade. A Tabela 14 apresenta os perfis dimensionados segundo os parâmetros da NBR 8800 (2007).

Tabela 14 – Perfis dimensionados segundo NBR 8800 (2007).

(continua)							
Barra	Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	Esbeltez	Tração	Compressão
1	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta

Tabela 14 – Perfis dimensionados segundo NBR 8800 (2007).

(continuação)							
Barra	Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	Esbeltez	Tração	Compressão
2	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
3	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
4	8" x 57,9	8" x 57,9	Grupo 1	8" x 57,9	OK	Suporta	Suporta
5	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
6	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
7	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
8	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 2	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
9	6" x 36	6" x 36	Grupo 3	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
10	6" x 36	6" x 36	Grupo 3	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
11	6" x 36	6" x 36	Grupo 3	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
12	6" x 36	6" x 36	Grupo 3	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
13	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
14	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
15	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 4	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta
17	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
18	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
19	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
20	6" x 36	6" x 36	Grupo 5	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
21	6" x 36	6" x 36	Grupo 6	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
22	6" x 36	6" x 36	Grupo 6	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
23	6" x 36	6" x 36	Grupo 6	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
24	6" x 36	6" x 36	Grupo 6	6" x 36	OK	Suporta	Suporta
25	5" x 24,1	5" x 24,1	Grupo 7	5" x 24,1	OK	Suporta	Suporta
26	5" x 24,1	5" x 24,1	Grupo 7	5" x 24,1	OK	Suporta	Suporta
27	5" x 24,1	5" x 24,1	Grupo 7	5" x 24,1	OK	Suporta	Suporta
28	5" x 24,1	5" x 24,1	Grupo 7	5" x 24,1	OK	Suporta	Suporta
29	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 8	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
30	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 8	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
31	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 8	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
32	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 8	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
33	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 9	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
34	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 9	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
35	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 9	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
36	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 9	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
37	2" x 2" x 5/16"	2" x 2" x 5/16"	Grupo 10	2" x 2" x 5/16"	OK	Suporta	Suporta
38	2" x 2" x 5/16"	2" x 2" x 5/16"	Grupo 10	2" x 2" x 5/16"	OK	Suporta	Suporta
39	2" x 2" x 5/16"	2" x 2" x 5/16"	Grupo 10	2" x 2" x 5/16"	OK	Suporta	Suporta
40	2" x 2" x 5/16"	2" x 2" x 5/16"	Grupo 10	2" x 2" x 5/16"	OK	Suporta	Suporta
41	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta

Tabela 14 – Perfis dimensionados segundo NBR 8800 (2007).

Barra	Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	(conclusão)		
					Esbeltez	Tração	Compressão
42	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
43	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
44	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
45	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
46	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
47	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
48	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
49	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
50	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
51	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
52	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
53	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
54	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
55	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
56	3" x 3" x 1/2"	3" x 3" x 1/2"	Grupo 11	3" x 3" x 1/2"	OK	Suporta	Suporta
57	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 1	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
58	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 1	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
59	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
60	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
61	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
62	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
63	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
64	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
65	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
66	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
67	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 1	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
68	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 1	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
69	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
70	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
71	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
72	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
73	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
74	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
75	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta
76	5" x 29,8	5" x 29,8	Grupo 12	5" x 29,8	OK	Suporta	Suporta

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 15 apresenta os perfis verificados no software METÁLICA 3D usando os mesmos critérios da NBR 8800 (2007), onde todas as barras foram validadas. Os perfis

obtidos no dimensionamento nas planilhas elaboradas no Excel foram implementados de forma idêntica no software METÁLICA 3D, considerando todas as condições de contorno como carregamentos, coeficientes de ponderações, vínculos reativos, propriedades mecânicas e geométricas das barras, onde todos os perfis atenderam os critérios de esbeltez e resistência para as barras sujeitas a esforços de compressão e resistência para esforço de tração. Não foram consideradas análise e dimensionamento das ligações.

Tabela 15 – Perfis metálicos tipo cantoneira – METÁLICA 3D.

(continua)

Material		Peça (Ni/Nf)	Perfil(Série)	Comprimento (m)	Volume (m ³)	Peso (kg)
Tipo	Designação					
Aço laminado	A-572 345MPa	N1/N5	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.025	194.68
		N2/N6	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.025	194.68
		N3/N7	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.025	194.68
		N4/N8	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.025	194.68
		N5/N6	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14
		N6/N7	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14
		N8/N7	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14
		N5/N8	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14
		N5/N9	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13
		N6/N10	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13
		N7/N11	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13
		N8/N12	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13
		N9/N10	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14
N10/N11	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14		
N12/N11	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14		
N9/N12	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.000	3.14		
N9/N13	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13		

Tabela 15 – Perfis metálicos tipo cantoneira – METÁLICA 3D.

(continuação)

Material		Peça (Ni/Nf)	Perfil(Série)	Comprimento (m)	Volume (m³)	Peso (kg)
Tipo	Designação					
		N10/N14	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13
		N11/N15	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13
		N12/N16	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.000	0.018	144.13
		N13/N14	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.005	36.03
		N14/N15	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.005	36.03
		N16/N15	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.005	36.03
		N13/N16	L 152x152x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.005	36.03
		N13/N17	L 127x127x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.003	24.02
		N14/N18	L 127x127x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.003	24.02
		N15/N19	L 127x127x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.003	24.02
		N16/N20	L 127x127x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.003	24.02
		N17/N18	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N18/N19	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N20/N19	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N17/N20	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N17/N21	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N18/N22	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N19/N23	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N20/N24	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.002	13.89
		N21/N22	L 51x51x7.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.001	5.82
		N22/N23	L 51x51x7.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.001	5.82

Tabela 15 – Perfis metálicos tipo cantoneira – METÁLICA 3D.

(continuação)

Material		Peça (Ni/Nf)	Perfil(Série)	Comprimento (m)	Volume (m³)	Peso (kg)
Tipo	Designação					
		N24/N23	L 51x51x7.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.001	5.82
		N21/N24	L 51x51x7.9 (Cantoneiras de abas iguais)	1.000	0.001	5.82
		N19/N25	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N20/N25	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N25/N23	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N24/N25	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N26/N15	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N16/N26	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N26/N19	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N26/N20	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N17/N27	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N18/N27	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N21/N27	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N27/N22	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N13/N28	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N28/N14	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.062	0.004	28.64
		N28/N17	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N28/N18	L 76x76x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	2.291	0.004	31.84
		N1/N8	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.026	200.67
		N2/N7	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.026	200.67
		N8/N9	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08

Tabela 15 – Perfis metálicos tipo cantoneira – METÁLICA 3D.

(conclusão)

Material		Peça (Ni/Nf)	Perfil(Série)	Comprimento (m)	Volume (m ³)	Peso (kg)
Tipo	Designação					
		N7/N10	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08
		N9/N16	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08
		N10/N15	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08
		N16/N17	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.001	4.44
		N15/N18	L 44x44x4.8 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.001	4.44
		N17/N24	L 38x38x3.2 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.000	2.58
		N18/N23	L 38x38x3.2 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.000	2.58
		N1/N6	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.026	200.67
		N4/N7	L 203x203x15.9 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.026	200.67
		N6/N9	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08
		N7/N12	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08
		N9/N14	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08
		N12/N15	L 152x152x12.7 (Cantoneiras de abas iguais)	4.123	0.015	120.08
		N14/N17	L 38x38x3.2 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.000	2.58
		N15/N20	L 38x38x3.2 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.000	2.58
		N17/N22	L 38x38x3.2 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.000	2.58
		N20/N23	L 38x38x3.2 (Cantoneiras de abas iguais)	1.414	0.000	2.58

Notação:

Ni: Nó inicial

Nf: Nó final

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 16 apresenta perfis dimensionados no Excel e verificados no METALICA 3D.

Tabela 16 – Tabela de resistência – METÁLICA 3D.

				(continua)			
Barra	η (%)	Esforço N (kN)		Barra	η (%)	Esforço N (kN)	
N1/N5	19.61	348.345	Passa	N24/N23	4.00	-3.605	Passa
N2/N6	34.75	-250.583	Passa	N21/N24	2.95	6.799	Passa
N3/N7	77.05	-555.713	Passa	N19/N25	11.01	-12.106	Passa
N4/N8	78.79	-568.149	Passa	N20/N25	7.18	-7.896	Passa
N5/N6	7.71	-3.140	Passa	N25/N23	1.81	9.922	Passa
N6/N7	9.96	-4.052	Passa	N24/N25	1.95	10.739	Passa
N8/N7	10.72	-4.362	Passa	N26/N15	21.89	-28.801	Passa
N5/N8	7.86	-3.198	Passa	N16/N26	15.87	-20.884	Passa
N5/N9	24.45	348.484	Passa	N26/N19	4.82	26.486	Passa
N6/N10	24.09	343.298	Passa	N26/N20	4.37	23.993	Passa
N7/N11	52.45	-190.708	Passa	N17/N27	6.67	-7.334	Passa
N8/N12	52.67	-191.517	Passa	N18/N27	11.48	-12.619	Passa
N9/N10	0.00	0.000	Passa	N21/N27	1.28	7.008	Passa
N10/N11	0.00	0.000	Passa	N27/N22	1.24	6.793	Passa
N12/N11	0.00	0.000	Passa	N13/N28	24.15	-31.780	Passa
N9/N12	0.00	0.000	Passa	N28/N14	25.13	-33.062	Passa
N9/N13	3.79	-13.798	Passa	N28/N17	4.22	23.169	Passa
N10/N14	21.18	-76.996	Passa	N28/N18	4.89	26.855	Passa
N11/N15	52.39	-190.491	Passa	N1/N8	20.47	201.511	Passa
N12/N16	52.57	-191.123	Passa	N2/N7	10.30	198.244	Passa
N13/N14	0.54	7.708	Passa	N8/N9	68.76	-186.171	Passa
N14/N15	2.98	-36.118	Passa	N7/N10	67.02	-181.463	Passa
N16/N15	0.36	5.065	Passa	N9/N16	13.54	155.919	Passa
N13/N16	2.75	-33.341	Passa	N10/N15	13.94	160.627	Passa
N13/N17	1.80	17.102	Passa	N16/N17	93.39	-21.453	Passa
N14/N18	2.60	-19.937	Passa	N15/N18	71.78	-16.490	Passa
N15/N19	2.88	-22.106	Passa	N17/N24	21.08	15.188	Passa
N16/N20	3.17	-24.374	Passa	N18/N23	17.64	12.704	Passa
N17/N18	0.99	-3.361	Passa	N1/N6	8.45	4.044	Passa
N18/N19	2.40	13.175	Passa	N4/N7	4.86	93.570	Passa
N20/N19	0.97	-3.294	Passa	N6/N9	30.48	-82.521	Passa
N17/N20	2.63	14.455	Passa	N7/N12	27.90	-75.529	Passa
N17/N21	0.03	-0.109	Passa	N9/N14	4.54	52.269	Passa
N18/N22	0.50	-1.693	Passa	N12/N15	4.85	55.835	Passa

Tabela 17 – Tabela de resistência – METÁLICA 3D.

				(continua)			
Barra	η (%)	Esforço N (kN)		Barra	η (%)	Esforço N (kN)	
N19/N23	2.76	-9.342	Passa	N14/N17	86.64	-8.536	Passa
N20/N24	3.21	-10.879	Passa	N15/N20	83.32	-8.209	Passa
N21/N22	3.44	-3.101	Passa	N17/N22	4.90	-0.483	Passa
N22/N23	2.86	6.590	Passa	N20/N23	4.28	3.084	Passa

Referências:

N: Esforço axial (kN)

η : Aproveitamento da resistência. A barra cumpre as condições de resistência da Norma se cumprir que $\eta \leq 100\%$.

Fonte: Produção do próprio autor.

Como o objetivo proposto no trabalho trata-se da análise de estabilidade global e dimensionamento de torre metálica treliçada, seguindo a NBR 8800 (2007), utilizou-se o METÁLICA 3D, visto que o mesmo utiliza a NBR 8800 (2007) como referência para dimensionamento, enquanto o SAP2000 utiliza somente as normas americanas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O setor energético no Brasil é de grande importância para o desenvolvimento do país, e além da preocupação em gerar a energia deve-se também haver uma preocupação com a transmissão da mesma.

Diante desta necessidade é essencial que se tenha maior segurança nos projetos de torres de LTEE, visto que a principal ação que incide diretamente sobre as torres de transmissão é a ação do vento, ação esta que possui inúmeras incertezas. Em diversos estudos relacionados a LTEE pelo mundo as incertezas são enormes, levando sempre a estudos criteriosos com análise experimental em laboratório.

O incentivo à pesquisa nesta área é fundamental para o desenvolvimento do setor, principalmente na elaboração de software de simulações que possam averiguar diferentes soluções de materiais e intensidades de carregamentos. Os softwares disponíveis no mercado além de caros existem diversas restrições que fazem com que o usuário fique refém de inúmeras atualizações que não tem mais fim. Pensando desta forma o presente trabalho visando o desenvolvimento da pesquisa educacional propôs uma solução em plataforma Excel, pois é um software de fácil acesso, custo baixo, bom manuseio e ideal para implementação de MEF e simulações. Mas cabe ressaltar que o mesmo possui limitações vistas à capacidade operacional de resolver grandes matrizes.

A implementação de toda análise matricial em MEF se deve à brilhante dissertação de mestrado de Marcos Seiti Suzuki, o qual serviu de base, consulta e orientação para toda a programação VBA das matrizes de rigidez. Da mesma forma como este trabalho será divulgado amplamente de modo a nortear outros trabalhos relacionados ao tema específico.

A literatura técnica apresenta diversos desastres com LTEE em que o fator marcante é a ação do vento e muitos pesquisadores e projetistas reclamam, pois não sabem com agir corretamente com essa ação com inúmeras incertezas. E o estudo de estabilidade global é de extrema importância, visto que uma deformação excessiva devido a uma carga incidente de vento pode amplificar significativamente os esforços solicitantes.

O trabalho proposto abrange inúmeras situações adversas que podem ocorrer em uma torre de transmissão, incluindo simulações com cabos. Seja de forma individual, seja em pares. Possibilidades de diferentes análises em qualquer região do país, variando temperatura e velocidade do vento.

O mesmo foi validado nas considerações de deslocamento nodal, forças reativas e esforços solicitantes com outros dois softwares, o Metálica 3D e um software tradicional na

área de elementos finitos o SAP2000, apresentando erro em casas decimais, pois Metálica 3D trunca o valor na terceira casa decimal e o SAP2000 e Excel apresenta a solução com inúmeras casas.

Para a análise de estabilidade global, ou seja, o objetivo principal deste trabalho foi baseado em todas as recomendações da NBR 8800 (2007), onde se permite com muita segurança aplicar o MAES (método de amplificação de esforços) baseado em critérios de deslocabilidade da estrutura. O mesmo foi validado através de uma simulação, com uma torre treliçada com grau de esbeltez significativo, que conforme iria aumentando a rigidez gradual da estrutura, a mesma se comportava de forma mais estável, conseguindo a convergência do parâmetro de deslocabilidade B_2 , bem como o perfil final da barra.

As barras foram todas dimensionadas para esforços de tração e compressão, e validadas no software Metálica 3D, visto que este utiliza os mesmos critérios de dimensionamento previsto na NBR 8800 (2007).

O software elaborado no Excel pode proporcionar os usuários diversos estudos propondo diversas correlações entre altura e quantidades de diagonais de travamentos, pois uma estrutura pode ter menos barras, porém a mesma deverá ser mais rígida de forma a garantir a estabilidade da mesma, podendo o usuário tomar a decisão de qual é o modelo economicamente mais estável e atendendo com segurança os requisitos mínimos da NBR 8800 (2007).

Sugere-se como trabalhos futuros, que se dê continuidade neste estudo científico, podendo reproduzi-lo de forma consciente, para implementação de outras particularidades como: dimensionamento de ligações, dimensionamento de fundações utilizando interação solo estrutura.

A grande contribuição que o trabalho gerou para a comunidade científica é que diversos softwares educacionais *freeware* não calculam o grau de deslocabilidade e muito menos a estabilidade global da estrutura.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. C. F. D. **Estruturas Isostáticas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 168 p.
- ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. D. **Curso de análise estrutural**. Notas de aula - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2013.
- ARAÚJO, A. H. M. D. et al. **Projetos de estruturas de edificações com perfis tubulares de aço**. Belo Horizonte: Ed. do Autor, 2016. 598 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422**: Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 57 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8850**: Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 18 p.
- 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: ABNT, 2007. 237 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8842**: Suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 5 p.
- AZEVEDO, A. F. L. C. **Análise tridimensional de estruturas metálicas incluindo os efeitos de segunda ordem**. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) - Universidade do Porto. Porto, p. 162. 1993.
- BRITO, L. D. **Recomendações para projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010.
- BROMBERGER, F.; OLIVEIRA, A. D. **Estrutura do Sistema Elétrico Brasileiro**. Notas de Aula. [S.l.]. 2012. <http://pt.slideshare.net/tecnicoslg/estrutura-do-sistema-eletrico-brasileiro>.
- CABLEMAX CABOS DE AÇO E ACESSÓRIOS LTDA. Cordoalhas - CableMax. **CableMAX - Cabos de Aço**, 2010? Disponível em: <<http://www.cabosdeacocablemax.com.br/cordoalhas.html#1x19>>. Acesso em: 10 agosto 2018.
- CARAZZAI, E. H. Ventos de até 116 km/h derrubam torres de energia no Paraná. **Uol - Folha de São Paulo**, 19 Agosto 2011. Disponível em:

<<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/962556-ventos-de-ate-116-kmh-derrubam-torres-de-energia-no-parana.shtml>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

COLUNA de madeira da linha de transmissão da eletricidade. **Dreamstime**, 23 Junho 2013? Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/fotografia-de-stock-coluna-de-madeira-da-linha-de-transmissao-da-eletricidade-image31835642>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

COPPERTHREE - FIOS E CABOS ELÉTRICOS. Cabos NUS com Alma de Aço (CAA). **Copperthee - Fios e Cabos Elétricos**, 2018? Disponível em: <<http://copperthree.com.br/wp-content/uploads/2016/09/CABOS-NUS-COM-ALMA-DE-ACO-CAA2.pdf>>. Acesso em: 05 Agosto 2018.

COUCEIRO, I. et al. Structural optimization of lattice steel transmission towers. **Engineering Structures**, 117, 21 Março 2016. 274-286.

EL DAMATTY, A. A.; HAMADA, A. Failure analysis of guyed transmission lines during F2 tornado event. **Engineering Structures**, 85, 2015. 11-25. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01410296/85>>.

EL DAMATTY, A. A.; HAMADA, A. F2 Tornado velocity profiles critical for transmission line structures. **Engineering Structures**, 106, 2016. 436-449. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01410296/106>>.

ELAWADY, A.; EL DAMATTY, A. Longitudinal force on transmission towers due to non-symmetric downburst conductor loads. **Engineering Structures**, 127, 2016. 206-226. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01410296/127>>.

ENGELMIG ENERGIA. Serviço Emergencial na LT 440 kV Bauru-Salto Grande. **Engelmig Energia**, 2016. Disponível em: <<http://www.engelmig.com.br/servico-emergencial-na-lt-440-kv-bauru-salto-grande/>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

FALCON, G. A. S.; SILVA, J. G. S. Metodologia de análise para o projeto ótimo de torres de aço com a consideração da estabilidade global da estrutura. **Revista Internacional de Método Numérico para Cálculo y Diseño em Ingeniería**, Rio de Janeiro, v. 20, p. 327-340, 2004.

FERNANDES, L. M.; SILVA, P. O. D.; DIACENCO, A. A. Métodos dos Elementos Finitos Aplicado à Barras e Treliças. **Revista Científic@ Universitas**, Itajuba, 2016. 4.

FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. D. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. Itajuba: Edgard Blücher, 1982.

G1 PR. Torres de Furnas derrubadas por tempestade no PR são reconstruídas. **G1**, 25 Setembro 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pr/oeste-sudoeste/noticia/2014/09/torres-de-furnas-derrubadas-por-tempestade-no-pr-sao-reconstruidas.html>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

GALVÃO, A. D. S. **Formulações Não-Lineares de Elementos Finitos para Análise**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 239. 2000.

GERDAU S.A. Gerdau, 2017? Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt#>>. Acesso em: 09 Dezembro 2017.

GILBERT, A. M.; LEET, K. M.; UANG, C.-M. **Fundamentos de Análise Estrutural**. 3a. ed. [S.l.]: AMGH, 2009. 793 p.

GONTIJO, C. R. **Contribuição à análise e projeto de torres autoportantes de linhas de transmissão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 129. 1994.

HAMADA, A. et al. The response of a guyed transmission line system to boundary layer. **Engineering Structures**, 139, 24 Fevereiro 2017. 135-152.

HUTTON, D. V. **Fundamentals of Finite Element Analysis**. New York: McGraw-Hill, 2004. 494 p.

IGLESIA, S. M. O efeito P-Delta nas estruturas dos edifícios. **AltoQi - Tecnologia aplicada a engenharia**, Agosto 2016. Disponível em: <<http://maisengenharia.altoqi.com.br/wp-content/uploads/2016/08/Ebook-O-Efeito-P-Delta.pdf>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

JUN, L. et al. The comparison of conductor stress calculation methods for overhead line under extreme weather conditions. [S.l.]: IEEE PES Asia-Pacific, 2013. p. 1-6.

JUNIOR, J. K. **Incertezas de modelo na análise de torres metálicas de linhas de transmissão**. Tese (Doutor em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 362. 2007.

KASSIMALI, A. **Análise estrutural**. Tradução de Noveritis do Brasil. 5a. ed. São Paulo: Cengage, 2015. 734 p.

LABEGALINI, P. et al. **Projeto mecânico dos linhas aéreas de transmissão**. 2a. ed. São Paulo: Blucher, 1992. 528 p.

LAKSHMANAN, N. et al. Studies on failure of transmission line towers in testing. **Engineering Structures**, 35, 2012. 55-70. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01410296/35>>.

LIANG, S. et al. Investigation on wind tunnel tests of a full aeroelastic model of electrical transmission tower-line system. **Engineering Structures**, 85, 2014. 63-72.

LUOYANG ASIAN SUN INDUSTRIAL GROUP CO., LTD. Linha de transmissão aérea condutor de alumínio desencapado da potência do cabo ACSR. **Made-in-china.com**, 2017? Disponível em: <http://pt.made-in-china.com/co_lyasiansun/product_Overhead-Power-Transmission-Line-Bare-Aluminum-Cable-ACSR-Conductor_esshhyny.html>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

MARTHA, L. F. C. R. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 524 p.

MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. **Metodologia de Pesquisa - Estratégias, métodos e técnicas para pesquisa científica em engenharia de produção**. Universidade Federal de Itajuba. Itajuba. 2007.

NOVAES, R. Transmissão de energia elétrica. **Wikieletrica**, 18 Agosto 2016. Disponível em: <<http://wikieletrica.com/transmissao-de-energia-eletrica.html>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

ONS. Diretrizes para a elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão. **ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico**, 2013. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/conhecimento/acervo-digital/documentos-e-publicacoes?categoria=Notas+T%C3%A9cnicas+de+Transmiss%C3%A3o>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

PORTAL Met@lica, 2018? Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php>. Acesso em: 20 agosto 2018.

RB Infraenergia, 2017? Disponível em: <<http://www.rb-infraenergia.com/produtos>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

SETOR ENERGÉTICO, SITE SUSTENTÁVEL. Recomposição de torres em Goiás foram concluídas, diz Furnas. **Setor Energético, Site Sustentável**, 29 Outubro 2015. Disponível em: <<http://www.setorenergetico.com.br/empresas/recomposicao-de-torres-em-goias-foram-concluidas-diz-furnas/9837/>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

SILVA, D. C. M. D. Transmissão de energia elétrica. **Brasil Escola**, 2017? Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/transmissao-energia-eletrica.htm>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

SILVA, R. C. D.; MARCHI NETO, I. D.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 59, 21 January 2016. 324-341.

SOUZA, A. S. C. D.; GONÇALVES, R. M. Treliças Especiais - Aspectos Gerais, Comportamento Estrutural e Informações para Projetos. **Portal Met@lica**, 2018? Disponível em: <www.metalica.com.br/trelicas-especiais>. Acesso em: 19 agosto 2018.

SOUZA, A. S. C. D.; PEREIRA, M. F.; NARDIN, S. D. Análise Inelástica de Segunda Ordem em Pórticos Planos de Aço. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 12, p. 17-30, jun-dez 2016. Disponível em: <<http://revistas.ufg.emnuvens.com.br/reec/index>>.

SOUZA, R. R. D. et al. A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures. **Engineering Structures**, 111, 06 Janeiro 2016. 162-184.

SÜSSEKIND, J. C. **Estruturas isostáticas**. Porto Alegre: Editora Globo, v. 1, 1984. 366 p.

SUZUKI, M. S. **Ánalyse de Estruturas Reticuladas Utilizando o Software Excel pelo Método dos Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p. 141. 2014.

TIAN, L. et al. Influence of spatial variation of ground motions on dynamic responses of supporting towers of overhead electricity transmission systems: An experimental study. **Engineering Structures**, 128, 22 Setembro 2016. 67-81.

TIAN, L.; GAI, X.; QU, B. Shake table tests of steel towers supporting extremely long-span electricity transmission lines under spatially correlated ground motions. **Engineering Structures**, 132, 10 Dezembro 2016. 791-807.

TORRES de Transmissão de Energia. **Portal Met@lica**, 2017? Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/torres-de-transmissao-de-energia>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

TORT, C.; SAHIN, S.; HASANÇEBI, O. Optimun design od steel tattice transmission line towers using simulated anealing and PLS-TOWER. **Computers & Structures**, 179, 2017. 75-94.

VANIN, V.; MARTIN, Z. C. P. **Subsídios para o projeto estrutural de torres de transmissão**. Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, 6. São Paulo: ABCEM. setembro 2014. p. 547-574.

VAZ, L. E. **Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VIEGAS, A. Tempestade derruba torres de transmissão de energia sobre rodovia em MS. **G1**, 18 Maio 2015. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mato-grosso-do-sul/noticia/tempestade-derruba-quatro-torres-de-transmissao-de-energia-sobre-rodovia-em-ms.ghtml>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

VIERO, E. H. **Isostática**: passo a passo. 3a. ed. Caxias do Sul: EDUCS, 2011. 224 p.

YANG, S. C.; HONG, H. P. Nonlinear inelastic responses of transmission tower-line system under downburt wind. **Engineering Structures**, 123, 14 Junho 2016. 490-500.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ITENS DA NBR 8800 – NORMAS METÁLICA

[...]

4.7.6.1 Coeficientes de ponderação das ações no estado limite último (ELU)

Os valores-base para verificação dos estados limites últimos são apresentados nas tabelas 17 e 18, para o produto $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$ e para γ_{f2} , respectivamente. O produto $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$ é representado γ_g ou γ_q . O coeficiente γ_2 é igual ao fator de combinação ψ_0 .

As tabelas 17 e 18 foram adaptadas para atender somente os itens relacionados ao presente estudo.

Tabela 18 – Valores de coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f1}\gamma_{f3}$.

Combinações	Ações permanentes (γ_g)					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
	Ações variáveis (γ_q)					
	Efeito da temperatura	Ação do vento	Ações truncadas	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
	Normais	1,20	1,40	1,20	1,50	

Fonte: Adaptado – NBR 8800 (2007).

Tabela 19 – Valores dos fatores de combinação Ψ_0 e de redução Ψ_1 e Ψ_2 para ações variáveis.

Ações		γ_R
		Ψ_0
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6

Fonte: Adaptado – NBR 8800 (2007).

[...]

4.7.7.2 Combinações últimas

Uma combinação última de ações pode ser classificada em normal, especial, de construção e excepcional.

4.7.7.2.1 Combinações últimas normais

As combinações últimas normais decorrem do uso previsto para a edificação.

Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas sejam necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados limites últimos aplicáveis. Em cada combinação devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas como secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

Para cada combinação, aplica-se a seguinte expressão:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j} F_{Qj,k})$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ são os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada como principal para a ação;

$F_{Qj,k}$ são os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

4.8 Resistências

4.8.1 Valores das resistências

4.8.1.1 Valores característicos

4.8.1.1.1 As resistências dos materiais são representadas pelos valores característicos f_k , definidos como aqueles que em um lote de material, têm determinada probabilidade de serem ultrapassados, no sentido desfavorável para a segurança.

4.8.1.2 Valores de cálculo

4.8.1.2.1 A resistência de cálculo f_d de um material é definida como:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

Nesta expressão, $\gamma_m = \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3}$

Onde:

γ_{m1} é a parcela do coeficiente de ponderação que considera a variabilidade da resistência dos materiais envolvidos;

γ_{m2} é a parcela do coeficiente de ponderação que considera a diferença entre resistência do material no corpo de prova e na estrutura;

γ_{m3} é a parcela do coeficiente de ponderação que considera os desvios gerados na construção e as aproximações feitas em projetos do ponto de vista das resistências.

Tabela 20 – Valores de coeficientes de ponderação das resistências γ_m .

Combinações	Aço estrutural	
	γ_a	
	Escoamento e instabilidade	Ruptura
	γ_{a1}	γ_{a2}
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

Fonte: Adaptado – NBR 8800 (2007).

4.9 Estabilidade e análise estrutural

4.9.1 Generalidades

O objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações na estrutura, visando efetuar verificações de estados limites últimos e de serviço.

A análise estrutural deve ser feita com um modelo realista, que permita representar a resposta da estrutura e dos materiais estruturais. Onde necessário, a interação solo-estrutura e o comportamento das ligações devem ser contemplados no modelo.

4.9.2.2 Quanto ao efeito dos deslocamentos, os esforços internos podem ser determinados por:

- a) análise linear (teoria de primeira ordem), com base na geometria indeformada da estrutura;
- b) análise não-linear, com base na geometria deformada da estrutura.

A análise não-linear deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma significativa os esforços internos. Essa análise pode ter como base teorias geometricamente exatas, teorias aproximadas ou adaptações a resultados da teoria de primeira ordem. Nesta norma, por simplicidade, os três tipos de análise são denominados de segunda ordem.

Os efeitos decorrentes dos deslocamentos horizontais dos nós da estrutura são ditos efeitos globais de segunda ordem ($P-\Delta$) e os decorrentes da não-retilinidade dos eixos das barras, efeitos locais de segunda ordem ($P-\delta$).

A classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais é dada na subseção 4.9.4.

4.9.2.3 Métodos de análise que considerem direta ou indiretamente a influência da geometria deformada da estrutura (efeitos $P-\delta$ e $P-\Delta$), das imperfeições iniciais, do comportamento das ligações e da redução de rigidez dos elementos componentes, quer pela não-linearidade do material, quer pelo efeito das tensões residuais, podem ser utilizados. Os métodos aproximados apresentados na subsecção 4.9.7 satisfazem essas exigências.

[...]

4.9.4 Classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

4.9.4.1 Para efeito desta Norma, as estruturas são classificadas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais em estruturas de pequena deslocabilidade, média deslocabilidade ou grande deslocabilidade.

4.9.4.2 Uma estrutura é classificada como de pequena deslocabilidade quando, em todos os seus andares, a relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, em todas as combinações últimas de ações estipuladas em 4.7.7.2, for igual ou inferior a 1,1.

4.9.4.3 Uma estrutura é classificada como de média deslocabilidade quando a máxima relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, considerando todos os andares e todas as combinações últimas de ações estipuladas em 4.7.7.2, for superior a 1,1 e igual ou inferior a 1,4.

4.9.4.4 Uma estrutura é classificada como de grande deslocabilidade quando a máxima relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, considerando todos os andares e todas as combinações últimas de ações estipuladas em 4.7.7.2, for superior a 1,4.

4.9.4.5 A classificação da estrutura deve ser obtida para as combinações últimas de ações estipuladas em 4.7.7.2 em que os deslocamentos horizontais provenientes das forças horizontais tenham os mesmos sentidos dos decorrentes das cargas gravitacionais.

4.9.4.6 A classificação da estrutura depende da combinação última de ações considerada. Por simplicidade, essa classificação pode ser feita uma única vez, tomando-se a combinação de ações que fornece, além de forças horizontais, a maior resultante de carga gravitacional.

4.9.4.7 Para a classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais, as imperfeições iniciais de material, indicadas em 4.9.7, não necessitam ser consideradas na análise.

4.9.4.8 A relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, mencionada em 4.9.4.2, 4.9.4.3 e 4.9.4.4, pode ser aproximada de maneira aceitável pelo valor do coeficiente B2, calculado de acordo com o anexo D, sem a consideração das imperfeições iniciais de material indicadas em 4.9.7.

[...]

4.9.7 Determinação dos esforços solicitantes para estados limites últimos.

4.9.7.1 Estruturas de pequena deslocabilidade e média deslocabilidade.

4.9.7.1.1 Nas estruturas de pequena deslocabilidade e média deslocabilidade, os efeitos das imperfeições geométricas iniciais devem ser levados em conta diretamente na análise por meio da consideração, em cada andar, de um deslocamento horizontal relativo entre os níveis inferior e superior (deslocamento interpavimento) de $h/333$, sendo h a altura do andar (distância entre eixos de vigas). Admite-se também que esses efeitos sejam levados em conta por meio da aplicação, em cada andar, de uma força horizontal equivalente, denominada aqui força nocional, igual a 0,3% do valor das cargas gravitacionais de cálculo aplicadas em todos os pilares e outros elementos resistentes a cargas verticais, no andar considerado. Não é necessário somá-las às reações horizontais de apoio. Os efeitos das imperfeições geométricas iniciais deverão ser considerados independentemente em duas direções ortogonais em planta da estrutura. Além disso, esses efeitos podem ser entendidos como um carregamento lateral mínimo da estrutura, exceto nas estruturas de pequena deslocabilidade, se for utilizada a condição prevista em 4.9.7.1.4.

4.9.7.1.2 Nas estruturas de média deslocabilidade, os efeitos das imperfeições iniciais de material devem ser levados em conta na análise reduzindo-se a rigidez à flexão e a rigidez axial das barras para 80% dos valores originais. Nas estruturas de pequena deslocabilidade, esses efeitos não precisam ser considerados na análise.

4.9.7.1.3 Os esforços solicitantes devem ser obtidos considerando-se os efeitos globais e locais de segunda ordem. O método da amplificação dos esforços solicitantes, dado no anexo D, pode ser considerado uma aproximação aceitável para análise de segunda ordem. Ao se aplicar esse método a estruturas de média deslocabilidade, os coeficientes B1 e B2 devem ser calculados com as rigidezes reduzidas de acordo com 4.9.7.1.2.

4.9.7.1.4 Nas estruturas de pequena deslocabilidade, os efeitos globais de segunda ordem podem ser desconsiderados, desde que sejam atendidas as seguintes exigências:

a) as forças axiais de cálculo de todas as barras cuja rigidez à flexão contribua para a estabilidade lateral da estrutura, em cada uma das combinações últimas de ações estipulada

em 4.7.7.2, não sejam superiores a 50% da força axial correspondente ao escoamento da seção transversal dessas barras;

b) os efeitos das imperfeições iniciais sejam adicionados às respectivas combinações, inclusive àquelas em que atuem ações variáveis devidas ao vento.

Os efeitos locais de segunda ordem devem ser considerados amplificando-se os momentos fletores pelos coeficientes B1, calculados de acordo com o anexo D, em todas as barras da estrutura.

4.9.7.2 Estruturas de grande deslocabilidade.

Nas estruturas de grande deslocabilidade, deve ser feita uma análise rigorosa levando-se em conta as não linearidades geométricas e de material. Opcionalmente, a critério do responsável técnico pelo projeto estrutural, poderá ser utilizado o procedimento de análise apresentado em 4.9.7.1 para as estruturas de média deslocabilidade, desde que os efeitos das imperfeições geométricas iniciais sejam adicionados às combinações últimas de ações em que atuem ações variáveis devidas ao vento.

5 Condições específicas para o dimensionamento de elementos de aço.

[...]

5.2 Barras prismáticas submetidas à força axial de tração.

5.2.1 Generalidades.

5.2.1.1 A presente subseção aplica-se a barras prismáticas submetidas à força axial de tração, incluindo barras ligadas por pinos e barras redondas com extremidades rosqueadas.

5.2.1.2 No dimensionamento, deve ser atendida a condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$$

Onde:

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

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

Devem ainda ser observadas as considerações relacionadas a limitação da esbeltez.

5.2.2 Força axial resistente de cálculo.

A força axial de tração resistente de cálculo, $N_{t,Rd}$, a ser usada no dimensionamento, exceto para barras redondas com extremidades rosqueadas e barras ligadas por pinos, é o menor dos valores obtidos, considerando-se os estados limites últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, de acordo com as expressões indicadas a seguir:

para escoamento da seção bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$$

para ruptura da seção líquida

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}}$$

onde:

A_g é a área bruta da seção transversal da barra;

A_e é a área líquida efetiva da seção transversal da barra, determinada conforme 5.2.3;

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

f_u é a resistência à ruptura do aço.

5.2.3 Área líquida efetiva

A área líquida efetiva de uma barra, A_e , é dada por:

$$A_e = C_t A_n$$

onde:

A_n é a área líquida da barra, determinada conforme 5.2.4;

C_t é um coeficiente de redução da área líquida, determinado conforme 5.2.5.

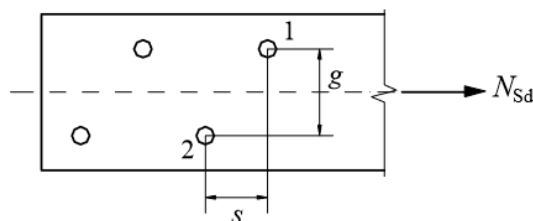
5.2.4 Área Líquida

5.2.4.1 Em regiões com furos, feitos para ligação ou para qualquer outra finalidade, a área líquida, A_n , de uma barra é a soma dos produtos da espessura pela largura líquida de cada elemento, calculada como segue:

a) em ligações parafusadas, a largura dos furos deve ser considerada 2,0 mm maior que a dimensão máxima desses furos, definida em 6.3.6, perpendicular à direção da força aplicada (alternativamente, caso se possa garantir que os furos sejam executados com broca, pode-se usar a largura igual à dimensão máxima);

b) no caso de uma série de furos distribuídos transversalmente ao eixo da barra, em diagonal a esse eixo ou em ziguezague, a largura líquida dessa parte da barra deve ser calculada deduzindo-se da largura bruta a soma das larguras de todos os furos em cadeia, e somando-se para cada linha ligando dois furos, a quantidade $s^2/4g$; sendo s e g , respectivamente, os espaçamentos longitudinal e transversal (gabarito) entre esses dois furos. A Figura 103 demonstra corretamente as dimensões s e g ;

Figura 103 – Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2.



Fonte: Adaptado – Furações e gabaritos – NBR 8800 (2007).

c) a largura líquida crítica daquela parte da barra será obtida pela cadeia de furos que produza a menor das larguras líquidas, para as diferentes possibilidades de linhas de ruptura;

d) para cantoneiras, o gabarito g dos furos em abas opostas deve ser considerado igual à soma dos gabaritos, medidos a partir da aresta da cantoneira, subtraída de sua espessura;

[...]

5.2.4.2 Em regiões em que não existam furos, a área líquida, A_n , deve ser tomada igual à área bruta da seção transversal, A_g .

[...]

5.2.8 Limitação do índice de esbeltez.

5.2.8.1 Recomenda-se que o índice de esbeltez das barras tracionadas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração correspondente (L/r), excetuando-se tirantes de barras redondas pré-tensionadas ou outras barras que tenham sido montadas com pré-tensão, não supere 300 (ver 5.2.8.3).

[...]

5.3 Barras prismáticas submetidas à força axial de compressão

5.3.1 Generalidades

A presente subseção aplica-se a barras prismáticas submetidas à força axial de compressão. No dimensionamento dessas barras, deve ser atendida a condição:

$$N_{c,sd} \leq N_{c,Rd}$$

onde:

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

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo, determinada conforme 5.3.2.

Devem ainda ser observadas as condições estabelecidas em 5.3.4, relacionadas à limitação da esbeltez.

5.3.2 Força axial resistente de cálculo

A força axial de compressão resistente de cálculo, $N_{c,Rd}$, de uma barra, associada aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local, deve ser determinada pela expressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}}$$

onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão, dado em 5.3.3;

Q é o fator de redução total associado à flambagem local, cujo valor deve ser obtido do Anexo F;

A_g é a área bruta da seção transversal da barra.

5.3.3 Fator de redução χ

5.3.3.1 O fator de redução associado à resistência à compressão, χ , depende da curva de dimensionamento à compressão (a, b, c ou d), a qual é função do tipo de seção transversal, do modo de instabilidade e do eixo em relação ao qual a instabilidade ocorre, de acordo com a Tabela 4. Seu valor é dado por:

$$\chi = \frac{1}{\beta + \sqrt{\beta^2 - \lambda_0^2}} \leq 1,0$$

Com

$$\beta = 0,5[1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2]$$

onde α é um coeficiente relacionado à curva de dimensionamento à compressão e λ_0 é o índice de esbeltez reduzido, dados respectivamente em 5.3.3.2 e 5.3.3.3.

O valor de χ pode ser também obtido da Figura xxxxxx ou das Tabelas 5a a 5d, para os casos em que λ_0 é, no máximo, igual a 3,0.

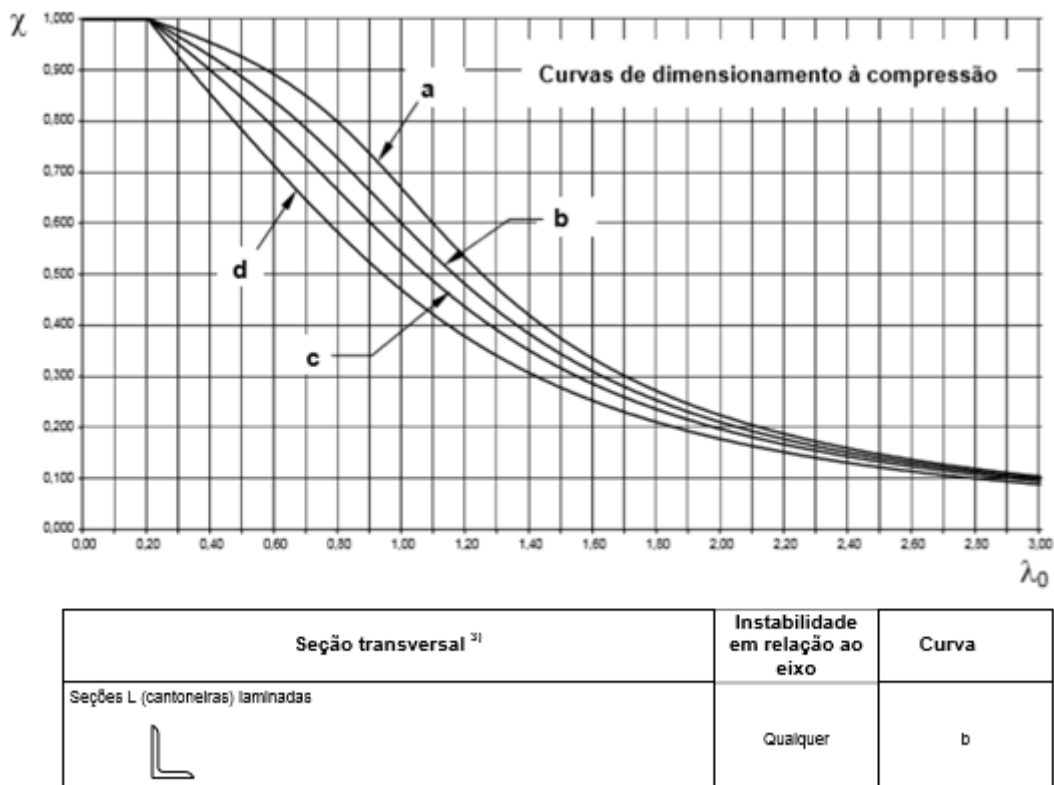
5.3.3.2 O coeficiente α , nos casos de instabilidade por flexão, é igual a 0,21, 0,34, 0,49 e 0,76, respectivamente para as curvas a, b, c e d de dimensionamento à compressão. Nos casos de instabilidade por torção ou por flexotorção, α deve ser tomado igual ao da curva relacionada à instabilidade por flexão em relação ao eixo y.

5.3.3.3 O índice de esbeltez reduzido, λ_0 , para barras comprimidas é dado por:

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

Onde N_e é a força axial de flambagem elástica, obtida conforma o Anexo E.

Figura 104 – Curvas de dimensionamento à compressão.



Fonte: Adaptado – NBR 8800 (2007).

5.3.4 Limitação do índice de esbelteza.

5.3.4.1 O índice de esbelteza das barras comprimidas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado e o raio de giração correspondente (L/r), não deve ser superior a 200. Em elementos isolados, conforme definição dada em 4.9.5.3, adicionalmente, recomenda-se que o índice de esbelteza, agora dado por kL/r , onde K é fornecido por E.2.1.1 (Anexo E), não supere 200.

[...]

Anexo D (normativo)

Método da amplificação dos esforços solicitantes

D.1 Generalidades

D.1.1 Neste Anexo é apresentado o método da amplificação dos esforços solicitantes, para execução de análise elástica aproximada de segunda ordem, levando em conta os efeitos globais $P-\Delta$ e local $P-\delta$.

D.1.2 Ao se usar o método deste Anexo, deve-se fazer atuar na estrutura a combinação apropriada de ações de cálculo, determinada de acordo com 4.7.7.2, constituída por ações

verticais e horizontais, quando existentes, considerando-se o efeito das imperfeições geométricas iniciais e das imperfeições iniciais de material conforme 4.9.7.

D.2 Uso do método

D.2.1 Em cada andar das estruturas analisadas, o momento fletor e a força axial solicitantes de cálculo, M_{Sd} e N_{Sd} devem ser determinados por (Figura 105):

$$M_{Sd} = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$$

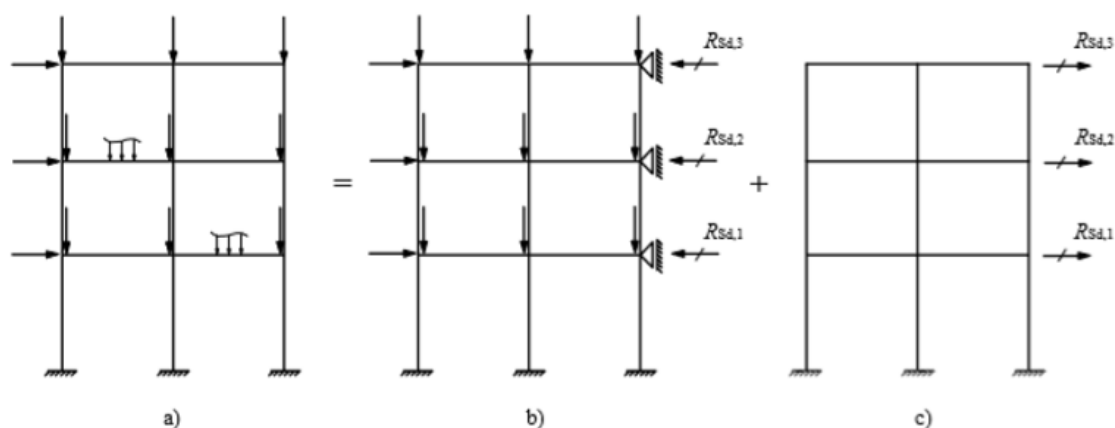
$$N_{Sd} = N_{nt} + B_2 N_{lt}$$

Onde B_1 e B_2 são dados, respectivamente em D.2.2 e D.2.3. e:

M_{nt} e N_{nt} são, respectivamente, o momento fletor e a força axial solicitantes de cálculo, obtidos por análise elástica de primeira ordem, com os nós da estrutura impedidos de se deslocar horizontalmente (usando-se, na análise, contenções horizontais fictícias em cada andar – Figura 105-b);

M_{lt} e N_{lt} são, respectivamente, o momento fletor e a força axial solicitantes de cálculo, obtidos por análise elástica de primeira ordem, correspondente apenas ao efeito dos deslocamentos horizontais dos nós da estrutura (efeito das reações das contenções fictícias aplicadas em sentido contrário, nos mesmos pontos onde tais contenções foram colocadas – Figura 105-c);

Figura 105 – Estrutura original decomposta na estrutura nt e na estrutura lt .



Fonte: Adaptado – NBR 8800 (2007).

[...]

D.2.3 O coeficiente B_2 é dado por:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_m} \frac{\Delta_{1h}}{h} \frac{\sum N_{Sd}}{\sum H_{Sd}}}$$

onde:

$\sum N_{Sd}$ é o somatório das forças axiais solicitantes de cálculo em todos os pilares e outros elementos resistentes a cargas verticais (inclusive nos pilares e outros elementos que não pertençam ao sistema resistente a ações horizontais), no andar considerado;

R_m é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde o sistema resistente a ações horizontais é constituído apenas por subestruturas de contraventamento formadas por pórticos nos quais a estabilidade lateral é assegurada pela rigidez à flexão das barras e pela capacidade de transmissão de momentos das ligações e igual a 1,0 para todas as outras estruturas;

Δ_{1h} é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento) do andar considerado, obtido da análise de primeira ordem. Se Δ_{1h} possuir valores diferentes em um mesmo andar, deve ser tomado um valor ponderado para esse deslocamento, em função da proporção das cargas gravitacionais aplicadas ou, de modo conservador, o maior valor;

$\sum H_{Sd}$ é a força cortante no andar, produzida pelas forças horizontais atuantes, usadas para determinar Δ_{1h} ;

h é a altura do andar (distância entre eixos de vigas).

D.2.4 A força cortante solicitante de cálculo pode ser tomada igual à da análise elástica de primeira ordem.

Anexo E (normativo)

Força axial de flambagem elástica e coeficiente de flambagem

E.1 Valores da força axial de flambagem elástica

E.1.4 Cantoneiras simples conectadas por uma aba

E.1.4.1 Os efeitos da excentricidade da força de compressão atuante em uma cantoneira simples podem ser considerados por meio de um comprimento de flambagem equivalente, desde que a mesma:

- a) seja carregada nas extremidades através da mesma aba;
- b) seja conectada por solda ou por pelo menos 2 parafusos na direção da solicitação;
- c) não esteja solicitada por ações transversais intermediárias.

Nesse caso, a força axial de flambagem elástica da cantoneira, N_e , é dada por:

$$N_e = \frac{\pi^2 E I_{x1}}{(K_{x1} L_{x1})^2}$$

onde:

I_{x1} é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada;

$K_{x1} L_{x1}$ é o comprimento de flambagem equivalente.

E.1.4.3 Para cantoneiras de abas iguais ou de abas desiguais conectadas pela aba de maior largura, que são diagonais ou montantes de treliças espaciais com as barras adjacentes conectadas do mesmo lado das chapas de nó ou das cordas:

$$a) \text{ quando: } 0 \leq \frac{L_{x1}}{r_{x1}} \leq 75: K_{x1} L_{x1} = 60 r_{x1} + 0,80 L_{x1}$$

$$a) \text{ quando: } \frac{L_{x1}}{r_{x1}} > 75: K_{x1} L_{x1} = 45 r_{x1} + L_{x1} \leq 200 r_{x1}$$

E.2 Valores do coeficiente de flambagem

E.2.1 Coeficiente de flambagem por flexão

E.2.1.1 No Quadro 05 são fornecidos os valores teóricos do coeficiente de flambagem por flexão, K_x ou K_y , para seis casos ideais de condições de contorno de elementos isolados (ver 4.9.5.3), nos quais a rotação e a translação das extremidades são totalmente livres ou totalmente impedidas. Caso não se possa assegurar a perfeição do engaste, devem ser usados os valores recomendados apresentados.

Quadro 5 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio						
	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: Adaptado – NBR 8800 (2007).

APÊNDICE B – TABELAS DE REFERÊNCIA

Tabela 21 – Dimensões padrões de cantoneiras com abas iguais.

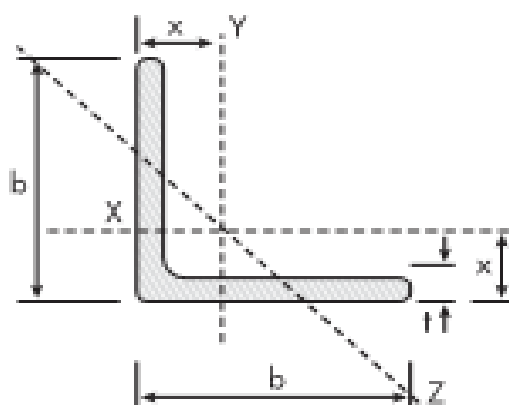
(continua)

b		Peso Nominal	t		Área	$I_x=I_y$	$W_x=W_y$	$r_x=r_y$	r_z min.	α
pol	mm	kg/m	pol	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
5/8"	15,88	0,57		2,5						
3/4"	19,05	0,71		2,5						
1/2"	12,70	0,55	1/8"	3,18	0,70	0,10	0,11	0,37	0,25	0,43
5/8"	15,88	0,71	1/8"	3,18	0,90	0,20	0,19	0,47	0,32	0,51
3/4"	19,05	0,87	1/8"	3,18	1,11	0,36	0,27	0,57	0,38	0,59
7/8"	22,20	1,04	1/8"	3,18	1,32	0,53	0,38	0,66	0,46	0,66
1"	25,40	1,19	1/8"	3,18	1,43	0,63	0,49	0,79	0,48	0,76
		1,73	3/16"	4,76	2,19	1,25	0,66	0,76	0,48	0,81
		2,22	1/4"	6,35	2,84	1,66	0,66	0,76	0,48	0,86
1.1/4"	31,75	1,50	1/8"	3,18	1,93	1,67	0,62	0,97	0,64	0,89
		2,20	3/16"	4,76	2,77	2,50	1,15	0,97	0,61	0,97
		2,86	1/4"	6,35	3,62	3,33	1,47	0,94	0,61	1,02
1.1/2"	38,10	1,83	1/8"	3,18	2,32	3,33	1,15	1,17	0,76	1,07
		2,68	3/16"	4,76	3,42	4,58	1,64	1,17	0,74	1,12
		3,48	1/4"	6,35	4,45	5,83	2,13	1,15	0,74	1,19
1.3/4"	44,45	2,14	1/8"	3,18	2,71	5,41	1,64	1,40	0,89	1,22
		3,15	3/16"	4,76	4,00	7,50	2,30	1,37	0,89	1,30
		4,12	1/4"	6,35	5,22	9,57	3,13	1,35	0,86	1,35
2"	50,80	2,46	1/8"	3,18	3,10	7,91	2,13	1,60	1,02	1,40
		3,63	3/16"	4,76	4,58	11,70	3,13	1,58	1,02	1,45
		4,74	1/4"	6,35	6,06	14,60	4,10	1,55	0,99	1,50
		5,83	5/16"	7,94	7,42	17,50	4,91	1,53	0,99	1,55
		6,99	3/8"	9,52	8,76	20,00	5,73	1,50	0,99	1,63
2.1/2"	63,50	4,57	3/16"	4,76	5,80	23,00	4,91	1,98	1,24	1,75
		6,10	1/4"	6,35	7,67	29,00	6,40	1,96	1,24	1,83
		7,44	5/16"	7,94	9,48	35,00	7,87	1,93	1,24	1,88
		8,78	3/8"	9,52	11,16	41,00	9,35	1,91	1,22	1,93
		5,52	3/16"	4,76	7,03	40,00	7,21	2,39	1,50	2,08
3"	76,20	7,29	1/4"	6,35	9,29	50,00	9,50	2,36	1,50	2,13
		9,07	5/16"	7,94	11,48	62,00	11,60	2,34	1,50	2,21
		10,71	3/8"	9,52	13,61	75,00	13,60	2,31	1,47	2,26
		14,00	1/2"	12,7	17,74	91,00	18,00	2,29	1,47	2,36
		8,56	1/4"	6,35	10,90	83,70	13,00	2,77	1,76	2,46
3.1/2"	88,90	10,59	5/16"	7,94	13,50	102,00	16,00	2,75	1,75	2,52
		12,58	3/8"	9,52	16,00	121,00	19,20	2,75	1,75	2,58
		9,81	1/4"	6,35	12,51	125,00	16,40	3,17	2,00	2,77
4"	101,60	12,19	5/16"	7,94	15,48	154,00	21,30	3,15	2,00	2,84
		14,57	3/8"	9,52	18,45	183,00	24,60	3,12	2,00	2,90
		16,80	7/16"	11,11	21,35	208,00	29,50	3,12	1,98	2,95
		19,03	1/2"	12,7	24,19	233,00	32,80	3,10	1,98	3,00
		12,34	1/4"	6,35	15,73	251,63	27,09	4,00	2,53	3,41
5"	127,00	15,31	5/16"	7,94	19,50	308,00	33,40	3,97	2,53	3,47
		18,30	3/8"	9,52	23,29	362,00	39,50	3,94	2,51	3,53
		24,10	1/2"	12,7	30,64	470,00	52,50	3,91	2,49	3,63
		29,80	5/8"	15,88	37,80	566,00	64,00	3,86	2,46	3,76
		23,52	7/16"	11,11	26,96	416,68	45,71	3,93	2,50	3,58
6"	152,40	22,20	3/8"	9,52	28,10	641,00	57,40	4,78	3,02	4,17
		29,20	1/2"	12,7	37,09	828,00	75,40	4,72	3,00	4,27
		36,00	5/8"	15,88	45,86	1007,00	93,50	4,67	2,97	4,39
		42,70	3/4"	19,05	54,44	1173,00	109,90	4,65	2,97	4,52
8"	203,20	43,70	5/8"	15,88	62,90	2472,40	168,90	6,31	4,01	5,66
		57,90	3/4"	19,05	73,81	2901,10	199,90	6,27	3,99	5,79

Tabela 20 – Dimensões padrões de cantoneiras com abas iguais.

(conclusão)

b	Peso Nominal	t	Área	$I_x=I_y$	$W_x=W_y$	$r_x=r_y$	r_x min.	x
mm	kg/m	mm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm
40,00	1,87	3,00	2,31	3,58	1,24	1,24	0,79	1,11
	2,42	4,00	3,08	4,47	1,55	1,22	0,79	1,15
	3,00	5,00	3,75	5,56	1,97	1,22	0,79	1,18
45,00	2,12	3,00	2,61	5,16	1,58	1,41	0,89	1,23
	2,77	4,00	3,44	6,67	2,07	1,39	0,89	1,28
	3,38	5,00	4,3	7,84	2,43	1,35	0,87	1,40
50,00	2,36	3,00	2,91	7,15	1,96	1,57	0,99	1,35
	3,09	4,00	3,84	9,26	2,57	1,55	0,99	1,40
	3,77	5,00	4,80	11,00	3,05	1,54	0,97	1,42
60,00	4,47	6,00	5,69	12,80	3,72	1,51	0,97	1,56
	3,64	4,00	4,64	16,31	3,75	1,88	1,19	1,65
	4,57	5,00	5,82	19,40	4,45	1,82	1,17	1,64
65,00	5,42	6,00	6,91	22,80	5,29	1,82	1,17	1,82
	3,96	4,00	5,04	20,90	4,42	2,03	1,29	1,77
	4,98	5,00	6,34	24,70	5,20	2,01	1,28	1,77
75,00	5,91	6,00	7,44	30,00	6,44	2,01	1,28	1,84
	5,71	5,00	7,27	38,70	7,06	2,31	1,48	2,02
	6,87	6,00	8,72	45,70	8,40	2,30	1,48	2,05
80,00	7,92	7,00	10,10	52,60	9,73	2,28	1,46	2,09
	6,08	5,00	7,75	48,60	8,35	2,50	1,59	2,18
	7,25	6,00	9,24	57,30	9,91	2,49	1,58	2,22
90,00	8,49	7,00	10,80	64,20	11,10	2,44	1,57	2,21
	8,30	6,00	10,60	80,30	12,20	2,76	1,78	2,41
	9,50	7,00	12,10	94,80	14,60	2,80	1,78	2,51
100,00	10,90	8,00	13,90	104,00	16,10	2,74	1,75	2,50
	9,14	6,00	11,64	114,40	15,70	3,13	1,99	2,72
	10,70	7,00	13,70	128,00	17,50	3,06	1,97	2,69
12,20	8,00	15,50	145,00	19,90	3,06	1,96	1,96	2,74
	13,50	9,00	17,20	164,30	22,90	3,09	1,97	2,83



Fonte: (GERDAU S.A., 2017?)

Tabela 22 – Cabos condutores CAA para linhas transmissão.

(conclusão)

**Condutor:** Alumínio tipo redondo compactado.**Acondicionamento:** Em carretéis de madeira ou rolos, com lances definidos pelo cliente.**Norma Aplicável:** NBR 7270**Aplicações:** Instalações aéreas de baixa, média e alta tensão em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Código	Seção		Formação			Diâmetro do cabo (mm)	Carga de Ruptura (kN)	Capacidade de corrente	Resistência Máx. a 20°C (Ohm/Km)	Peso total (Kg/Km)
	AWG/KCM	(mm²)	Nº fios	Diâmetro (mm)						
Cabos - CAA										
Wren	8	9,77	6	X	1,33	4,00	3,35	-	3,42747	34
Warbler	7	10,55	6	X	1,50	4,49	3,26	-	2,71924	43
Turkey	6	13,30	6	X	1,68	5,04	5,28	95	2,15699	54
Thrush	5	16,77	6	X	1,89	5,66	6,71	115	1,71067	68
Swan	4	21,15	6	X	2,12	6,36	8,39	130	1,35640	85
Swanate	4	21,15	7	X	1,96	6,53	10,52	130	1,35640	100
Swallow	3	26,67	6	X	2,38	7,14	10,22	150	1,07566	108
Sparrow	2	33,59	6	X	2,67	7,01	12,68	175	0,85406	136
Sparete	2	33,59	7	X	2,47	8,24	16,13	175	0,85406	159
Robin	1	42,41	6	X	3,00	9,00	15,81	200	0,67644	171
Raven	1/0	53,52	6	X	3,37	10,11	19,35	230	0,53602	216
Quail	2/0	67,33	6	X	3,78	11,34	23,59	265	0,42608	272
Pigeon	3/0	85,12	6	X	4,25	12,75	29,41	310	0,33703	344
Penguin	4/0	107,20	6	X	4,77	14,31	37,09	350	0,26761	433
Waxwing	266,8	135,19	18	X	3,09	15,451	30,27	430	0,21325	431
Owl	266,8	135,19	6	X	5,36	16,09	42,93	410	0,21220	511
Partridge	266,8	135,19	26	X	2,57	16,28	50,25	440	0,21430	546
Ostrich	300,0	152,01	26	X	2,73	17,27	56,57	470	0,19058	615
Piper	300,0	152,01	30	X	2,54	17,78	69,75	480	0,19105	700
Merlin	336,4	170,45	18	X	3,47	17,35	38,22	500	0,16914	544
Linnet	336,4	170,45	26	X	2,89	18,31	62,73	510	0,16996	690
Oriole	336,4	170,45	30	X	2,69	18,83	77,45	515	0,17038	785
Chickadee	397,5	201,41	18	X	3,77	18,85	44,34	555	0,14314	641
Brant	397,5	201,41	24	X	3,27	19,62	64,70	565	0,14384	763
Ibis	397,5	201,41	26	X	3,14	19,88	72,13	570	0,14384	814
Lark	397,5	201,41	30	X	2,92	20,44	90,33	575	0,14419	925
Pelican	477,0	241,70	18	X	4,14	20,70	52,34	615	0,11928	773
Flicker	477,0	241,70	24	X	3,58	21,49	76,78	635	0,11986	915
Hawk	477,0	241,70	26	X	3,44	21,80	86,73	640	0,11986	978
Hen	477,0	241,69	30	X	3,20	22,40	105,2	645	0,12016	1111
Heron	500,0	253,35	30	X	3,28	22,95	109,2	665	0,11463	1155
Osprey	556,5	281,98	18	X	4,47	22,35	60,98	690	0,10224	902
Parakeet	556,5	281,98	24	X	3,87	23,22	88,29	700	0,10274	1068
Dove	556,5	281,98	26	X	3,72	23,55	101,1	710	0,10274	1142
Eagle	556,5	281,98	30	X	3,46	24,22	122,9	710	0,10299	1298
Wood Duck	605,0	306,55	54	X	2,69	24,20	119,4	735	0,094505	1160
Peacock	605,0	306,55	24	X	4,03	24,19	95,88	740	0,094505	1160
Squab	605,0	306,55	26	X	3,87	24,51	108,1	745	0,094505	1237

Tabela 21 – Cabos condutores CAA para linhas transmissão.

(conclusão)

Swift	636,0	322,26	36	X	3,38	23,66	60,68	745	0,089460	961
King Bird	636,0	322,26	18	X	4,78	23,90	69,67	750	0,089460	1030
Rook	636,0	322,26	24	X	4,14	24,84	101,1	765	0,089898	1223
Grosbeak	636,0	322,26	26	X	3,97	25,15	111,9	775	0,089898	1302
Egret	636,0	322,26	30	X	3,70	25,90	140,5	775	0,090117	1472
Flamingo	666,6	337,76	24	X	4,23	25,38	105,5	790	0,085772	1276
Gannet	666,6	337,76	26	X	4,07	25,75	117,3	795	0,085772	1367
Starlin	715,5	362,54	26	X	4,21	26,68	125,9	835	0,079910	1465
Coot	795,0	402,83	36	X	3,77	26,39	74,75	835	0,071567	1195
Cuckoo	795,0	402,83	24	X	4,62	27,74	123,9	886	0,071918	1523
Drake	795,0	402,83	26	X	4,44	28,11	139,6	890	0,071918	1626
Tern	795,0	403,77	45	X	3,38	27,03	95,26	884	0,07176	1337
Condor	795,0	402,84	54	X	3,08	27,74	125,49	889	0,07191	1523
Mallard	795,0	402,84	30	X	4,14	28,96	170,88	918	0,07208	1839
Ruddy	900,0	455,50	45	X	3,59	28,74	106,06	958	0,06161	1510
Canary	900,0	456,06	54	X	3,28	29,51	141,96	961	0,06351	1725
Rail	954,0	483,84	45	X	3,70	29,61	112,54	993	0,05988	1603
Cardinal	954,0	484,53	54	X	3,38	30,42	147,08	996	0,05966	1831
Ortolan	1033,5	523,90	45	X	3,85	30,78	123,27	1043	0,05331	1732
Curlew	1033,5	522,51	45	X	3,85	31,59	153,11	1047	0,05532	1974
Bluejay	1113,0	565,49	54	X	3,51	31,98	130,14	1092	0,05124	1871
Finch	1113,0	563,93	54	X	3,65	32,84	174,00	1093	0,05161	2131
Bunting	1192,5	565,49	54	X	3,51	31,98	130,14	1092	0,05124	1871
Grackie	1192,5	604,26	54	X	3,77	33,99	186,46	1093	0,04817	2182
Bittern	1272,0	644,40	45	X	4,27	34,17	148,11	1155	0,04496	2135
Pheasant	1272,0	644,75	54	X	3,90	35,10	189,57	1187	0,04516	2434
Dipper	1351,5	684,84	45	X	4,40	35,20	161,09	1229	0,04230	2266
Martin	1351,5	684,71	54	X	4,02	36,17	206,04	1232	0,04250	2585
Bobolink	1431,0	725,27	45	X	4,53	36,24	164,63	1272	0,03995	2402
Plover	1431,0	725,10	54	X	4,14	37,21	218,50	1275	0,04013	2739
Nuthatch	1510,5	765,35	45	X	4,65	37,24	178,46	1300	0,03784	2533
Parrot	1510,5	765,35	54	X	4,25	38,23	230,07	1320	0,03802	2888
Lapwing	1590,0	807,53	45	X	4,78	38,22	238,59	1354	0,03588	2672
Falcon	1590,0	806,23	54	X	3,36	39,26	183,02	1359	0,03586	3032
Chukar	1780,0	902,70	84	X	3,70	40,69	226,95	1453	0,03245	3088
Bluebird	2156,0	1092,31	84	X	4,07	44,75	268,34	1623	0,02681	3041
Kiwi	2167,0	1098,27	72	X	4,41	44,07	221,61	1607	0,02684	3429
Thrasher	2312,0	1171,42	76	X	4,43	45,77	252,32	1675	0,02485	3761

Notas: Outras seções e formações poderão ser confeccionadas, mediante consulta técnica.

Fonte: (COPPERTHREE - FIOS E CABOS ELÉTRICOS, 2018?) – Cabo condutor CAA fabricante Copper Three

Tabela 23 – Cordoalha para para-raios.

Diâmetro		Carga de Ruptura (t)			Peso Aprox.	Massa Mínima Camada Zinco (g/m ²)		
Pol	mm	S.M	H.S	E.H.S	Kg/m	"Classe A"	" Classe B"	"Classe C"
3/16	4,76	0,863	1,29	1,81	0,108	155	310	465*
1/4	6,35	1,43	2,16	3,02	0,180	185	370	555*
5/16	7,94	2,43	3,63	5,10	0,305	245	490	735*
3/8	9,53	3,16	4,91	7,00	0,406	260	520	780*
7/16	11,11	4,25	6,59	9,45	0,593	275	550	825*
1/2	12,70	5,50	8,55	12,23	0,769	275	550	825*
5/8	15,88	8,66	13,42	19,23	1,209	305	610	915*

Fonte: (CABLEMAX CABOS DE AÇO E ACESSÓRIOS LTDA., 2010?)

Tabela 24 – Propriedades mecânicas dos aços.

Propriedades Mecânicas Cantoneira			
Propriedades Mecânicas	Lista de Escoamento (MPa)	Lista de Resistência (MPa)	Alongamento após ruptura, % (lo=200mm)
ASTM A36	250	400	18
ASTM A 572 Grau 50	345	450	18
AÇO COR 500	370	500	

Fonte: Adaptado - NBR 8800 (2007)

APÊNDICE C – FORMULAÇÕES E DADOS

Serão apresentados as formulações e dados utilizados para o desenvolvimento do software de cálculo de torres de transmissão de energia.

Funções utilizadas:

- Lista: Cria uma lista com os dados na própria pasta de trabalho;
- Índice e Correspondência: Procura os valores referentes as células em destaque e preenche os campos automaticamente com os dados;

=PROCV(valor de pesquisa; intervalo contendo o valor de pesquisa; o número da coluna no intervalo que contém o valor de retorno; opcionalmente especificar VERDADEIRO para uma correspondência aproximada ou FALSO para uma correspondência exata).

- Cálculo de Matrizes;
- Operações Matemáticas;
- Rotinas VBA;

1. USERFORM DE ABERTURA

Nesta etapa todos os caminhos são apresentados ao usuário para que sejam inseridos os dados referentes ao projeto e análise da torre de transmissão desejada.

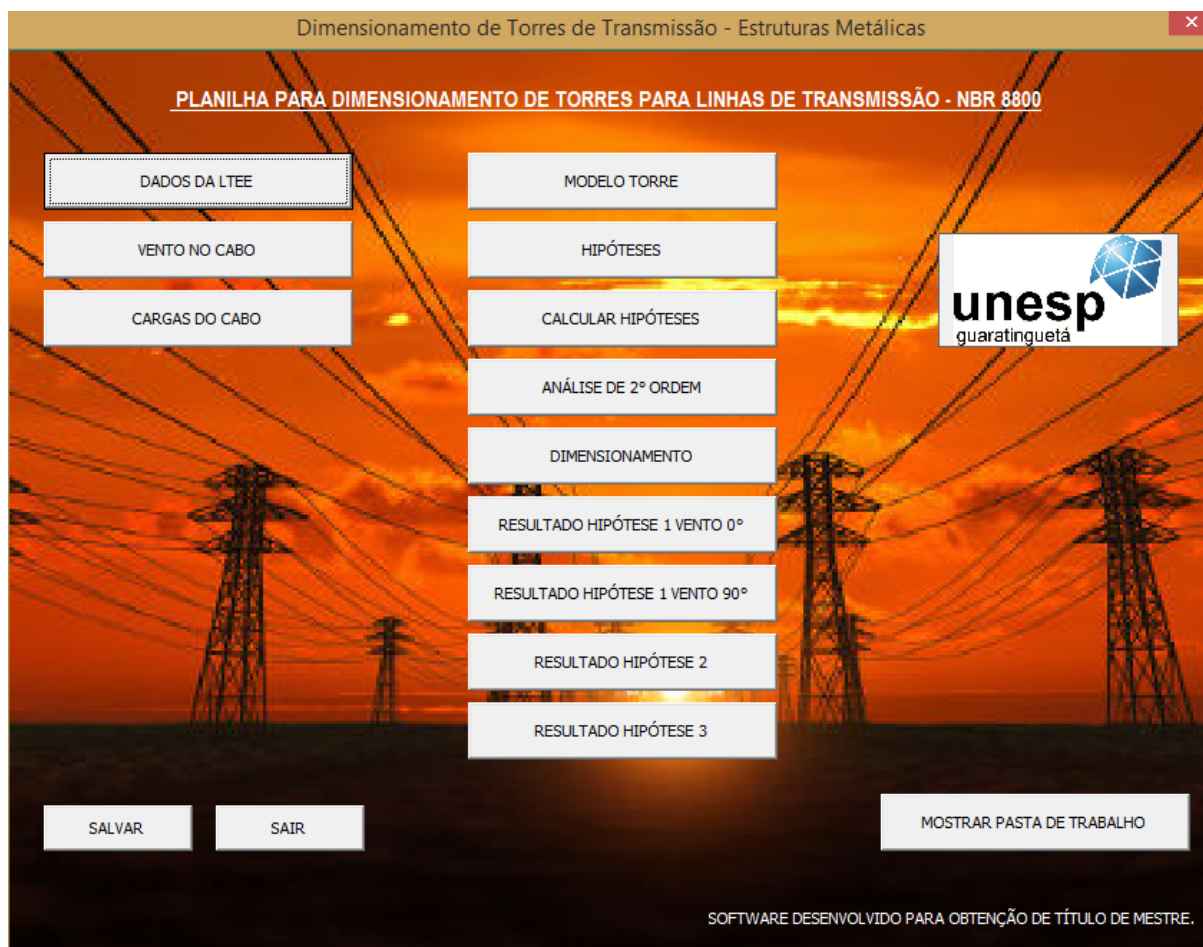
O *userform* é um formulário que o programador consegue personalizar conforme os dados que deseja inserir na pasta de trabalho.

Botões utilizados:

- DADOS DAS LTEE - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “Geral” para inserir os dados referente a linha de transmissão de energia.
- VENTO NO CABO - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “VENTO” contendo os cálculos referente a NBR – 5422 para determinação da carga de vento nos cabos e na torre de transmissão.
- CARGAS DO CABO - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “CARGAS” contendo os cálculos para determinação dos carregamento gerados pelos os cabos e acessórios na torre de transmissão.
- MODELO TORRE - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “DESENHO” para inserir os dados para a modelagem da torre de transmissão junto com sua descrição e perfil inicial.

- **HIPÓTESES** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “HIPÓTESE” contendo os as combinações das Hipóteses de dimensionamento das ações sofridas pelas torres de transmissões de energia.
- **CALCULAR HIPÓTESES** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “Dados” contendo a formatação para os cálculos das combinações geradas contemplando os efeitos de primeira e segunda ordem.
- **SENSIBILIDADE AO DESLOCAMENTO** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “2° ORDEM” contendo os cálculos para a análise de sensibilidade ao deslocamento da estrutura da torre de transmissão calculada.
- **DIMENSIONAMENTO** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “DIMENSIONAMENTO” contendo o perfil inicial utilizado e as verificações e resultados para as análises de tração, compressão e esbeltez dos perfis.
- **RESULTADO HIPÓTESE 1 VENTO 0°** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “RESULTADO VENTO 0” contendo o resultado do cálculo da hipótese 1 vento 0° pela análise de primeira ordem.
- **RESULTADO HIPÓTESE 1 VENTO 90°** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “RESULTADO VENTO 90” contendo o resultado do cálculo da hipótese 1 vento 90° pela análise de primeira ordem.
- **RESULTADO HIPÓTESE 2°** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “RESULTADO HIPÓTESE 2” contendo o resultado do cálculo da hipótese 2 pela análise de primeira ordem.
- **RESULTADO HIPÓTESE 3°** - botão utilizado para iniciar a planilha de trabalho “RESULTADO HIPÓTESE 3” contendo o resultado do cálculo da hipótese 2 pela análise de primeira ordem.
- **SALVAR** – botão utilizado para salvar o trabalho feito no software.
- **MOSTRAR PASTA DE TRABALHO** – botão utilizado para mostrar toda a pasta de trabalho contendo todas as planilha e métodos utilizados para o desenvolvimento do software.
- **SAIR** – botão utilizado para sair do software.

Figura 106 – Tela Inicial do Software.



Fonte: Produção do próprio autor.

2. PLANILHA “GERAL”

Planilha contendo os dados gerais da linha de transmissão onde a torre de energia será instalada.

Células destacadas com a cor “Preta” são células utilizadas para inserirem ou escolherem os dados para os cálculos. Nela pode constar lista ou somente o campo em branco.

As formulas utilizadas nas células para o cálculo estão em destaque na planilha e através da função PROCV e LISTA do Excel os dados são alterados conforme o banco de dados inseridos na planilha de “REFERENCIA” contendo o banco de dados de todos os materiais utilizados no software.

- **Cabo CAA utilizado:** Lista com os cabos de transmissão utilizado nas redes de transmissão de energia. Os dados são gerados a partir a planilha “REFERENCIA” contendo o banco de dados do software.

CABO CAA PRÉ DIMENSIONADO: CAA 9
 CABO CAA UTILIZADO: CAA 9
 CABO PARA RAIOS UTILIZADOS: CAA 9
 CAA 10
 CAA 11
 CAA 12
 CAA 13
 CAA 14
 CAA 15
 CAA 16

- **Cabo para raio utilizado:** Lista com os cabos para raio utilizado nas redes de transmissão de energia. Os dados são gerados a partir a planilha “REFERENCIA” de banco de dados do software.

CABO CAA PRÉ DIMENSIONADO: CAA 9
 CABO CAA UTILIZADO: CAA 9
 CABO PARA RAIOS UTILIZADOS: PARA RAIOS 3
 PARA RAIOS 1
 PARA RAIOS 2
 PARA RAIOS 4
 PARA RAIOS 5
 PARA RAIOS 6
 PARA RAIOS 7
 CARACTERÍSTICAS DA TORRE INSTALADA: PR
 REGIÃO INSTALADA: PR

- **Região Instalada:** Lista contendo todas as regiões do Brasil e conforme a região escolhida é gerado os valores de vento e temperaturas correspondentes.

REGIÃO INSTALADA: PR
 ALTITUDE DA LINHA DE TRANSMISSÃO: PR
 ALTITUDE= 50,0000
 CATEGORIA DO TERRENO: PR
 PE
 PI
 RJ
 RN
 RS
 RO
 RR

CASO TENHA INFORMAÇÕES DO LOCAL:

VB VENTO:	36 m/s	20,0000 m/s
TEMP. MIN:	-4 °C	-4,0000 °C
TEMP. MED:	16 °C	18,0000 °C
TEMP. MÁX:	36 °C	36,0000 °C

- **Categoria do Terreno:** Lista contendo os tipos de categorias e conforme é escolhida a categoria são gerados os coeficientes K para cálculo da velocidade de vento de Projeto.

CATEGORIA DO TERRENO: A
 ALTURA MÁXIMA DA TORRE: 20,0000 m

Tipos de Categoria dos terrenos:
 A - VASTAS EXTENSÕES DE ÁGUA; ÁREAS PLANAS COSTEIRAS; DESERTOS PLANOS.
 B - TERRENO ABERTO COM POUCOS OBSTACULOS.
 C - TERRENO COM OBSTACULOS NUMEROSOS E PEQUENOS.
 D - ÁREAS URBANIZADAS; TERRENOS COM MUITAS ÁRVORES ALTAS

Coeficiente de rugosidade $k_r = 1,0800$
 Coeficiente de correção do período de integração (t) $k_d = 1,1500$
 Coeficiente de correção de altura da torre $k_h = 1,0595$

Figura 107 – Tela de inserção de dados da linha de transmissão.

Menu Inicial

DADOS PRELIMINARES DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

CAPACIDADE DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

POTÊNCIA: MVA

LT: kV

CIRCUITOS:

DETERMINAÇÃO DA CORRENTE COM CAPACIDADE DE 85%:

$$I = \frac{N}{\sqrt{3} \times V} = 213,3686 \text{ A}$$

CORRENTE POR CABO

$$i = \frac{I}{n} = 213,3686 \text{ A}$$

CABO CAA PRÉ DIMENSIONADO:

CABO CAA UTILIZADO:

CABO PARA RAIOS UTILIZADO:

ISOLADOR DE SUSPENSÃO PADRÃO:

PESO: 4,60 kg

DIAMETRO: 0,2550 m

PASSO: 0,1460 m

DADOS CABO CAA

PESO: 0,2160 kg/m

DIAMETRO: 0,0101 m

CARGA RUP: 19350 N

DADOS CABO PARA RAIOS

PESO: 0,3050 kg/m

DIAMETRO: 0,0079 m

CARGA RUP: 50031 N

CARACTERÍSTICAS DA TORRE INSTALADA:

REGIÃO INSTALADA:

ALTITUDE DA LINHA DE TRANSMISSÃO:

ALTITUDE= m

VB VENTO: 36 m/s m/s

TEMP. MIN: -4 °C °C

TEMP. MED: 16 °C °C

TEMP. MÁX: 36 °C °C

CATEGORIA DO TERRENO:

ALTURA MÁXIMA DA TORRE: m

CASO TENHA INFORMAÇÕES DO LOCAL:

Coefficiente de rugosidade kr= 1,0800

Coefficiente de correção do período de integração (t) kd= 1,1500


Coefficiente de correção de altura da torre kh= 1,0595

VÃO DE PESO = VÃO DE VENTO PARA TORRE NIVELADA:

V1 m

V2 m

$$Vv = \frac{v1 + v2}{2} = 10,0000 \text{ m}$$



Fonte: Produção do próprio autor.

3. PLANILHA “VENTO”

Planilha contendo os cálculos de vento através dos dados gerais da linha de transmissão onde a torre de energia será instalada.

As fórmulas para o cálculo estão em destaque na planilha.

Figura 108 – Tela de cálculos de vento.

CALCULO DE TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA - NBR 5422

AÇÕES DO VENTO ATUANTES NA TORRE DE TRANSMISSÃO

VELOCIDADE DE VENTO DE PROJETO Menu Inicial

$Vp = kr * kd * kh * Vb = 26,3171 \text{ m/s}$

AÇÃO DO VENTO;
 PRESSÃO DINÂMICA: $p = \frac{1,293}{1+0,00367T} * \left(\frac{16000+64T-ALT}{16000+64T+ALT} \right) = 1,2073 \text{ kg/m}^3$

$qo = \frac{p V^2}{2} = 418,0645 \text{ N/m}^2$

VENTO NOS CABOS CONDUTORES:

$Fvcc = qo * a * d = 4,3295 \text{ N/m}$ $a = 1,02$ $p =$ Massa específica do ar

VENTO NOS CABOS PARA RAIOS:

$Fvcpr = qo * a * d = 3,4002 \text{ N/m}$ $a =$ fator de efetividade

VENTO NOS ISOLADORES:

$Fvi = qo * C * S = 18,6774 \text{ N}$ $S = 0,0372$ $C = 1,2$

$d =$ diâmetro do cabo
 $C =$ Coeficiente de arrasto
 $S =$ Seção transversal

Fonte: Produção do próprio autor.

4. PLANILHA “CARGAS”

Planilha contendo os cálculos das cargas solicitantes através dos dados gerais da linha de transmissão onde a torre de energia será instalada e do vento calculado.

As fórmulas para o cálculo estão em destaque na planilha.

Figura 109 – Tela de cálculos de cargas solicitantes.

CALCULO DE TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA - NBR 5422

AÇÕES ATUANTES NA TORRE DE TRANSMISSÃO

CARGAS VERTICAIS:
 PESO CABO CONDUTOR:

$$P_{cc} = p + Vv = 21,1824 \text{ N}$$

PESO CABO PARA RAI0

$$P_{cpr} = p + Vv = 29,9103 \text{ N}$$

PESO CADEIA DE ISODALOR

$$P_{ci} = p + g = 135,3318 \text{ N}$$

CARGAS TRANSVERSAIS:
 FORÇA DO VENTO CABO CONDUTOR:

$$P_{cc} = p + Vv = 43,2948 \text{ N}$$

FORÇA DO VENTO NO CABO PARA RAI0

$$P_{cpr} = p + Vv = 34,0021 \text{ N}$$

FORÇA DO VENTO NA CADEIA DE ISODALOR

$$P_{ci} = p + n = 56,0323 \text{ N}$$

CARGAS LONGITUDINAIS:
 TRAÇÃO CABO CONDUTOR:
 HIPOTESE : CARGA MAXIMA: 35% CARGA DE RUPTURA VENTO MAXIMO

$$T_o = 0,35 * Ca.Rup = 6772,5000 \text{ N}$$

$$T = \frac{T_o}{\cos \alpha} = 6772,5002 \text{ N} \quad \alpha = 0,0002 \text{ rad}$$

TRAÇÃO CABO PARA RAI0:
 HIPOTESE : CARGA MAXIMA: 35% CARGA DE RUPTURA VENTO MAXIMO

$$T_o = 0,35 * Ca.Rup = 17510,8500 \text{ N}$$

$$T = \frac{T_o}{\cos \alpha} = 17510,8501 \text{ N} \quad \alpha = 0,0001 \text{ rad}$$

Fonte: Produção do próprio autor.

5. PLANILHA “DESENHO”

Planilha contendo os dados para a modelagem da torre de transmissão de energia, descrição e escolha do perfil utilizado.

Os dados são introduzidos nos campos em destaque da cor “Preta”, e através de uma rotina de VBA o desenho é modelado em 3D.

As listas de descrição e perfil foram criadas pela função Lista do Excel onde os dados foram inseridos previamente através da planilha “REFERENCIA” onde consta o banco de dados utilizados pelo software.

- **Junções:** Campo para inserir as coordenadas das junções da estrutura..

Junções	x	y	z
Junção 1	0	0	0
Junção 2	0	0	3
Junção 3	3	0	3

- **Barras:** Campo para inserir a junção inicial e final da barra.

Barra	Junção a	Junção b	C
Barra 1	1	5	0
Barra 2	2	6	0
Barra 3	3	7	0
Barra 4	4	8	0

- **Descrição:** Lista criada para a descrição dos componentes da torre de transmissão.

Descrição	
Perna Articulado	1.3
Montante Vert.	
Montante Hori.	
Perna Articulado	
Perna Engastada	
Diagonal	
Perna Articulado	1.3

- **Perfil:** Lista contendo os perfis de cantoneiras. Perfis retirados da planilha “REFERÊNCIA” onde consta o banco de dados do software.

Perfil	Angulo
2" x 2" x 1/4"	
2" x 2" x 1/4"	
2" x 2" x 5/16"	
2" x 2" x 3/8"	
2. 1/2"x2. 1/2"x3/16"	
2. 1/2"x2. 1/2"x1/4"	
2. 1/2"x2. 1/2"x5/16"	
2. 1/2"x2. 1/2"x3/8"	
3" x 3" x 3/16"	
1.3/4"x1.3/4"x3/16"	

- **Ângulo de Vento nas Junções:** Lista criada com os ângulos incidentes de vento na torre de transmissão.

Ângulo de Vento nas Junções
Ambos
0
90
Ambos
Sem Vento

- **Quantidade de barras e junções:** Conta a quantidade total de barras e junções para cálculo das matrizes.

Nº de barras	52
Nº de junções	21

Figura 110 – Tela de inserção de dados da modelagem da torre.

Junções	x	y	z	Barra	Junção a	Junção b	Grupos	Descrição	Perfil	Angulo de Vento nas Junções
Junção 1	0	0	0	Barra 1	1	5	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	Ambos
Junção 2	0	0	3	Barra 2	2	6	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	Ambos
Junção 3	3	0	3	Barra 3	3	7	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	Ambos
Junção 4	3	0	0	Barra 4	4	8	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	Ambos
Junção 5	0,5	3	0,5	Barra 5	6	7	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 6	0,5	3	2,5	Barra 6	8	7	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 7	2,5	3	2,5	Barra 7	5	8	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 8	2,5	3	0,5	Barra 8	5	6	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 9	0,5	5	0,5	Barra 9	6	10	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 10	0,5	5	2,5	Barra 10	7	11	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 11	2,5	5	2,5	Barra 11	8	12	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 12	2,5	5	0,5	Barra 12	5	9	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 13	0,5	7	0,5	Barra 13	10	11	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 14	0,5	7	2,5	Barra 14	12	11	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 15	2,5	7	2,5	Barra 15	9	12	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 16	2,5	7	0,5	Barra 16	9	10	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 17	-1,5	7	1,5	Barra 17	10	14	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 18	-1,5	5	1,5	Barra 18	11	15	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 19	4,5	7	1,5	Barra 19	12	16	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 20	4,5	5	1,5	Barra 20	9	13	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
Junção 21	1,5	9	1,5	Barra 21	14	15	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	Ambos
				Barra 22	16	15	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 23	13	16	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 24	13	14	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 25	10	17	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 26	9	17	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 27	13	17	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 28	17	14	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 29	18	10	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 30	9	18	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 31	6	18	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 32	5	18	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 33	19	15	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 34	16	19	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 35	11	19	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 36	12	19	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 37	20	11	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 38	12	20	Grupo 1	Perna Articulado	1,3/4"x1,3/4"x3/16	
				Barra 39	7	20	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 40	8	20	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 41	10	15	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	
				Barra 42	7	10	Grupo 1	Perna Articulado	2" x 2" x 1/4"	

Fonte: Produção do próprio autor.

6. PLANILHA “ESTRUTURA”

Planilha utilizada para obtenção de dados e auxílio nos cálculos das ações do peso e vento na torre de transmissão.

Essa planilha recebe os dados do desenho e calcula a carga de peso e vento conforme o perfil escolhido.

- Cálculo do peso:

Q	R	S	T	U	V	W
CC Rompido	PR Rompido	Final	Final	Final	REAÇÃO 2° Ord.	REAÇÃO 2° Ord.
Fz	Fz	Fx 0°	Fz 90°	Fy	Vento 0	Vento 90
0,0000	0,0000	327,2946	327,2946	71,6359	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	327,2946	327,2946	71,6359	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	327,2946	327,2946	71,6359	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	327,2946	327,2946	71,6359	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	1503,6949	1503,6949	299,7717	7544,1728	37,4703

8. PLANILHA HIPÓTESES

Planilha para escolha das junções cujo as cargas dos cabos serão inseridas. Apresenta todas as hipóteses calculadas e multiplicadas pelas suas combinações.

ESCOLHA AS JUNÇÕES COM AS CARGAS PONTUAIS DOS CABOS:

Circuito 1: Fase 1 Fase 2 Fase 3

Cabo condutor: Junção 18

Cabo para raio: Junção 15

Condutor rompido: Junção 18

Circuito 2: Fase 1 Fase 2 Fase 3

Cabo condutor: Junção 20

Cabo para raio: Junção 17

Condutor rompido: Junção 20

Combinações:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q1} \Psi_{p1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \Psi_{bi} Q_{ki}$$

Hipótese 1 Vento 0°	1,40	G Perm.	1,00	1,40	Q Vento
Hipótese 1 Vento 90°	1,40	G Perm.	1,00	1,40	Q Vento
Hipótese 2	1,40	G Perm.	0,60	1,40	Q Temp.
Hipótese 3	1,40	G Perm.	0,60	1,40	Q Temp.

Hipótese 1 Vento 0°		Hipótese 1 Vento 90°		Hipótese 2		Hipótese 3	
Fx	Fy	Fy	Fz	Fy	Fz	Fy	Fz
458,2124	-100,2903	-100,2903	458,2124	-100,2903	0,0000	-100,2903	0,0000
458,2124	-100,2903	-100,2903	458,2124	-100,2903	0,0000	-100,2903	0,0000
458,2124	-100,2903	-100,2903	458,2124	-100,2903	0,0000	-100,2903	0,0000
458,2124	-100,2903	-100,2903	458,2124	-100,2903	0,0000	-100,2903	0,0000
2105,1728	-419,6803	-419,6803	2105,1728	-419,6803	0,0000	-419,6803	0,0000
1684,6882	-327,6477	-327,6477	1684,6882	-327,6477	0,0000	-327,6477	0,0000
2105,1728	-419,6803	-419,6803	2105,1728	-419,6803	0,0000	-419,6803	0,0000

9. PLANILHA DADOS

Planilha para cálculo utilizando o método de elementos finitos. Cálculo realizado por métodos de rotinas utilizando o VBA.

Rotina CALCULAR gera as matrizes para cálculo e a planilha com os devidos resultados.

Sub Calcular() principal rotina de calculo do software, outras rotinas são somente para inserirem os dados e realizarem os cálculos.

```

Sub Calcular()
If Cells(7, 8) = 0 Or Cells(8, 8) = 0 Then ' Se não houver barras ou junções sai da rotina
Exit Sub
End If
Dim antes As Variant
antes = Now
Application.Calculation = xlManual ' Calculo manual
Application.EnableEvents = False
Worksheets("Matriz").Cells.Delete Shift:=xlUp 'Planilha Matriz é limpa
'Criação de vairáveis
Dim matriz() As String
Dim inversa() As Variant
Dim contorno() As Variant
Dim k As Double
Dim v1 As Integer
Dim v2 As Integer
Dim a As Integer
Dim b As Integer
Dim l As Integer
Dim n As Integer
Dim juncao As Integer
Dim barra As Integer
Dim r As Integer
Dim c1 As Integer
Dim c2 As Integer
Dim c3 As Integer
Dim c As Integer
Dim d As Integer
Dim ColunaUX As Integer
barra = Cells(7, 8)
juncao = Cells(8, 8)
ReDim matriz(3 * juncao - 1, 3 * juncao - 1)
'coloca em todos os campos do array matriz o sinal =
For a = 0 To 3 * juncao - 1
    For b = 0 To 3 * juncao - 1
        matriz(a, b) = "="
    Next b
Next a
c1 = Cells.Find(what:="k").Column 'coluna onde está k
'Loop para montar a matriz de rigidez
For n = 1 To barra
k = Cells(n + 1, Cells.Find(what:="k").Column).Value 'VALOR DE K DO ELEMENTO N
a = Cells(n + 1, Cells.Find(what:="Nó a").Column).Value 'no a
b = Cells(n + 1, Cells.Find(what:="Nó b").Column).Value 'no b
r = n + 1 'linha da celula do elemento
    For v1 = 0 To 2
        For v2 = 0 To 2
            c2 = Cells.Find(what:="CosZ").Column - v1
            c3 = Cells.Find(what:="CosZ").Column - v2
            matriz(3 * a - v1 - 1, 3 * a - v2 - 1) = matriz(3 * a - v1 - 1, 3 * a - v2 - 1) & "+DADOS!R" &
r & "C" & c1 & "*DADOS!R" & r & "C" & c2 & "*DADOS!R" & r & "C" & c3
        Next v2
    Next v1
Next n

```

```

    matriz(3 * a - v1 - 1, 3 * b - v2 - 1) = matriz(3 * a - v1 - 1, 3 * b - v2 - 1) & "-DADOS!R" &
r & "C" & c1 & "*DADOS!R" & r & "C" & c2 & "*DADOS!R" & r & "C" & c3
    matriz(3 * b - v1 - 1, 3 * a - v2 - 1) = matriz(3 * b - v1 - 1, 3 * a - v2 - 1) & "-DADOS!R" &
r & "C" & c1 & "*DADOS!R" & r & "C" & c2 & "*DADOS!R" & r & "C" & c3
    matriz(3 * b - v1 - 1, 3 * b - v2 - 1) = matriz(3 * b - v1 - 1, 3 * b - v2 - 1) & "+DADOS!R" &
r & "C" & c1 & "*DADOS!R" & r & "C" & c2 & "*DADOS!R" & r & "C" & c3
    Next v2
    Next v1
Next n
'Loop para colocar zeros nas matrizes vazias
For a = 0 To 3 * juncao - 1
    For b = 0 To 3 * juncao - 1
        If matriz(a, b) = "" Then
            matriz(a, b) = 0
        End If
    Next b
Next a
'Transcreve o array matriz para a planilha matriz
For a = 1 To 3 * juncao
    For b = 1 To 3 * juncao
        Worksheets("Matriz").Cells(a, b).FormulaR1C1 = matriz(a - 1, b - 1)
    Next b
Next a
'aplica condição de contorno
ColunaUX = Cells.Find(what:="UX").Column
For a = 1 To 3 * juncao
    For b = 1 To 3 * juncao
        If a = b Then
            matriz(a - 1, b - 1) = "=IF(AND(DADOS!R" & (a - 1) \ 3 + 2 & "C" & (ColunaUX + (b - 1)
Mod 3) & "=0,DADOS!R" & (a - 1) \ 3 + 2 & "C" & (ColunaUX + (b - 1) Mod 3) & "<>""""),1,R[-" &
(3 * juncao + 1) & "]C)"
        Else
            matriz(a - 1, b - 1) = "=IF(OR(and(DADOS!R" & (a - 1) \ 3 + 2 & "C" & (ColunaUX + (a -
1) Mod 3) & "=0,DADOS!R" & (a - 1) \ 3 + 2 & "C" & (ColunaUX + (a - 1) Mod 3) &
"<>""""),and(DADOS!R" & (b - 1) \ 3 + 2 & "C" & (ColunaUX + (b - 1) Mod 3) & "=0,DADOS!R" &
(b - 1) \ 3 + 2 & "C" & (ColunaUX + (b - 1) Mod 3) & "<>"""")),0,R[-" & (3 * juncao + 1) & "]C)"
        End If
    Next b
Next a
'transcreve matriz condição de contorno
For a = 1 To 3 * juncao
    For b = 1 To 3 * juncao
        Worksheets("Matriz").Cells(3 * juncao + a + 1, b).FormulaR1C1 = matriz(a - 1, b - 1)
    Next b
Next a
Range(Cells(1, 46), Cells(3 * juncao, 3 * juncao + 46)).Font.ColorIndex = 2
'verifica a versão do Excel e escreve a inversa na planilha Matriz
Dim versao As Integer
versao = Application.Version
With Worksheets("Matriz")
    If juncao <= 17 Or versao >= 120 Then
        .Range(.Cells(6 * juncao + 3, 1), .Cells(9 * juncao + 2, 3 * juncao)).FormulaArray =
"=MINVERSE(R" & 3 * juncao + 2 & "C1:R" & 6 * juncao + 1 & "C" & 3 * juncao & ")" 'cria matriz
inversa da matriz condição de contorno
    Else

```

```

'calcula matriz inversa da matriz de contorno
ReDim inversa(3 * juncao - 1, 3 * juncao - 1)
ReDim contorno(3 * juncao - 1, 3 * juncao - 1)
For a = 0 To 3 * juncao - 1
    For b = 0 To 3 * juncao - 1
        contorno(a, b) = Worksheets("Matriz").Cells(a + 3 * juncao + 2, b + 1)
        If a = b Then
            inversa(a, a) = 1
        Else
            inversa(a, b) = 0
        End If
    Next b
Next a
For l = 0 To 3 * juncao - 1
    For a = l To 3 * juncao - 1
        If contorno(a, l) <> 0 And contorno(a, l) <> 1 Then
            k = contorno(a, l)
            For b = 0 To 3 * no - 1
                contorno(a, b) = contorno(a, b) / k
                inversa(a, b) = inversa(a, b) / k
            Next b
        End If
    Next a
    For a = l + 1 To 3 * juncao - 1
        If contorno(a, l) <> 0 Then
            For b = 0 To 3 * juncao - 1
                contorno(a, b) = contorno(a, b) - contorno(l, b)
                inversa(a, b) = inversa(a, b) - inversa(l, b)
            Next b
        End If
    Next a
Next l
For l = 0 To 3 * juncao - 2
    For a = 0 To 3 * juncao - 2 - l
        If contorno(a, 3 * juncao - 1 - l) <> 0 Then
            k = contorno(a, 3 * juncao - 1 - l)
            For b = 0 To 3 * no - 1
                contorno(a, b) = contorno(a, b) - k * contorno(3 * juncao - 1 - l, b)
                inversa(a, b) = inversa(a, b) - k * inversa(3 * juncao - 1 - l, b)
            Next b
        End If
    Next a
Next l
'transcreve a matriz inversa
For a = 1 To 3 * juncao
    For b = 1 To 3 * juncao
        Worksheets("Matriz").Cells(a + 6 * juncao + 2, b) = inversa(a - 1, b - 1)
    Next b
Next a
MsgBox "Matriz Inverso maior que 52x52 na versao " & Application.Version & " portanto será
utilizado um novo método de cálculo."
End If
End With
For a = 1 To 3 * juncao
    For b = 1 To 3 * juncao

```

```

    If a = b Then
        Worksheets("Matriz").Cells(a + 9 * juncao + 3, b) = "=IF(AND(DADOS!R" & (a - 1) \ 3 + 2
& "C" & (ColunaUX + (b - 1) Mod 3) & "=0,DADOS!R" & (a - 1) \ 3 + 2 & "C" & (ColunaUX + (b -
1) Mod 3) & "<>""""),0,R[-" & (3 * juncao + 1) & "]C)"
    Else
        Worksheets("Matriz").Cells(a + 9 * juncao + 3, b) = "=R[-" & (3 * juncao + 1) & "]C"
    End If
Next b
Next a
'Formatação da planilha matriz
With Worksheets("Matriz")
    With .Range(.Cells(1, 1), .Cells(3 * juncao, 3 * juncao))
        .Interior.ColorIndex = 24
        .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
        .Columns.AutoFit
    End With
    With .Range(.Cells(3 * juncao + 2, 1), .Cells(6 * juncao + 1, 3 * juncao))
        .Interior.ColorIndex = 17
        .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
    End With
    With .Range(.Cells(6 * juncao + 3, 1), .Cells(9 * juncao + 2, 3 * juncao))
        .Interior.ColorIndex = 22
        .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
    End With
    With .Range(.Cells(9 * juncao + 4, 1), .Cells(12 * juncao + 3, 3 * juncao))
        .Interior.ColorIndex = 20
        .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
    End With
    .Rows("1:9").Insert Shift:=xlDown
    .Range("B2").FormulaR1C1 = "Legenda"
    .Range("C4:H4").Merge
    .Range("C5:H5").Merge
    .Range("C6:H6").Merge
    .Range("B4").Interior.ColorIndex = 24
    .Range("B5").Interior.ColorIndex = 17
    .Range("B6").Interior.ColorIndex = 22
    .Range("B7").Interior.ColorIndex = 20
    .Range("C4").FormulaR1C1 = "Matriz Rigidez do elemento"
    .Range("C5").FormulaR1C1 = "Matriz Condição de Contorno do elemento"
    .Range("C6").FormulaR1C1 = "Matriz Inversa da Matriz Condição de Contorno do elemento"
    .Range("C7").FormulaR1C1 = "Matriz Final da estrutura"
    With .Range("A1:H8")
        .Borders(xlEdgeLeft).Weight = xlMedium
        .Borders(xlEdgeTop).Weight = xlMedium
        .Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
        .Borders(xlEdgeRight).Weight = xlMedium
    End With
End With
'formatação da planilha resultado
With Worksheets("Resultado")
    .Range("J:BA").Clear

```

```

.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
With .Range(.Cells(1, 10), .Cells(3 * juncao + 1, 13))
    .Borders.LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeLeft).Weight = xlMedium
    .Borders(xlEdgeTop).Weight = xlMedium
    .Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
    .Borders(xlEdgeRight).Weight = xlMedium
    .Interior.ColorIndex = 23
    .Font.ColorIndex = 2
End With
With .Range(.Cells(1, 14), .Cells(juncao + 1, 25))
    .Borders.LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeLeft).Weight = xlMedium
    .Borders(xlEdgeTop).Weight = xlMedium
    .Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
    .Borders(xlEdgeRight).Weight = xlMedium
    .Interior.ColorIndex = 23
    .Font.ColorIndex = 2
End With
.Range(.Cells(1, 14), .Cells(juncao + 1, 14)).Borders(xlEdgeRight).Weight = xlMedium
.Range(.Cells(1, 23), .Cells(juncao + 1, 23)).Borders(xlEdgeLeft).Weight = xlMedium
.Range(.Cells(1, 18), .Cells(juncao + 1, 18)).Borders(xlEdgeRight).Weight = xlMedium
.Range(.Cells(1, 14), .Cells(1, 20)).Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
.Range(.Cells(1, 10), .Cells(1, 20)).Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
.Range(.Cells(2, 10), .Cells(4, 13)).Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
.Range(.Cells(2, 10), .Cells(4, 13)).AutoFill Destination:=.Range(.Cells(2, 10), .Cells(3 * juncao,
13))
.Range("J1").FormulaR1C1 = "Junções"
.Range("K1").FormulaR1C1 = "Carregamento"
.Range("L1").FormulaR1C1 = "Deslocamento"
.Range("M1").FormulaR1C1 = "Reações"
.Range("N1").FormulaR1C1 = "Juncões"
.Range("O1").FormulaR1C1 = "UX"
.Range("P1").FormulaR1C1 = "UY"
.Range("Q1").FormulaR1C1 = "UZ"
.Range("R1").FormulaR1C1 = "Zeros"
.Range("S1").FormulaR1C1 = "UX'"
.Range("T1").FormulaR1C1 = "UY'"
.Range("U1").FormulaR1C1 = "X'"
.Range("V1").FormulaR1C1 = "Y'"
.Range("W1").FormulaR1C1 = "FX"
.Range("X1").FormulaR1C1 = "FY"
.Range("Y1").FormulaR1C1 = "FZ"
.Range("AH1").FormulaR1C1 = "UXi"
.Range("AI1").FormulaR1C1 = "UYi"
.Range("AJ1").FormulaR1C1 = "UZi"
.Range("AK1").FormulaR1C1 = "UXj"
.Range("AL1").FormulaR1C1 = "UYj"
.Range("AM1").FormulaR1C1 = "UZj"
.Range("AN1").FormulaR1C1 = "Deslocamento"
.Range("AO1").FormulaR1C1 = "Deformação"
.Range("AP1").FormulaR1C1 = "Força Axial"
.Range("AQ1").FormulaR1C1 = "Tensão Normal"
'Vetores deslocamento, Reações e coordenadas para plotar

```

```

.Range(.Cells(2, 12), .Cells(3 * juncao + 1, 12)).FormulaArray = "=MMULT(Matriz!R" & 9 *
juncao + 13 & "C1:R" & 12 * juncao + 12 & "C" & 3 * juncao & ",R2C11:R" & 3 * juncao + 1 &
"C11)"
.Range(.Cells(2, 13), .Cells(3 * juncao + 1, 13)).FormulaArray = "=MMULT(Matriz!R10C1:R" & 3
* juncao + 9 & "C" & 3 * juncao & ",R2C12:R" & 3 * juncao + 1 & "C12)-R2C11:R" & 3 * juncao +
1 & "C11"
.Range(.Cells(2, 19), .Cells(juncao + 1, 20)).FormulaArray = "=MMULT(R2C15:R" & juncao + 1
& "C18*10000*R25C3+DADOS!R2C11:R" & juncao + 1 & "C14,R2C7:R5C9)"
.Range(.Cells(2, 21), .Cells(juncao + 1, 22)).FormulaArray = "=MMULT(DADOS!R2C11:R" &
juncao + 1 & "C14,R2C7:R5C9)"
'Escreve coluna Nós, UX, UY, UZ, FX, FY, FZ, Carregamento no nós
For a = 1 To juncao
.Cells(3 * a - 1, 10).FormulaR1C1 = "X" & i
.Cells(3 * a, 10).FormulaR1C1 = "Y" & i
.Cells(3 * a + 1, 10).FormulaR1C1 = "Z" & i
.Cells(a + 1, 14) = a
.Range(.Cells(a + 1, 15), .Cells(a + 1, 17)).FormulaArray = "=TRANSPOSE(R" & 3 * a - 1 &
"C12:R" & 3 * a + 1 & "C12)"
.Cells(a + 1, 18) = 0
.Range(.Cells(a + 1, 23), .Cells(a + 1, 25)).FormulaArray = "=TRANSPOSE(R" & 3 * a - 1 &
"C13:R" & 3 * a + 1 & "C13)"
.Cells(3 * a - 1, 11).FormulaR1C1 = "=DADOS!R" & a + 1 & "C" &
Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="FX").Column
.Cells(3 * a, 11).FormulaR1C1 = "=DADOS!R" & a + 1 & "C" &
Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="FY").Column
.Cells(3 * a + 1, 11).FormulaR1C1 = "=DADOS!R" & a + 1 & "C" &
Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="FZ").Column
Next a
'Reproduz as colunas Elementos, Área, Modulo E, Comprimento L e K
.Cells(1, 27).FormulaR1C1 = "=DADOS!RC" &
Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="Barras").Column
.Cells(1, 28).FormulaR1C1 = "=DADOS!RC" & Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="Nó
a").Column
.Cells(1, 29).FormulaR1C1 = "=DADOS!RC" & Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="Nó
b").Column
.Cells(1, 30).FormulaR1C1 = "=DADOS!RC" &
Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="Área").Column
.Cells(1, 31).FormulaR1C1 = "=DADOS!RC" & Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="Modulo
E").Column
.Cells(1, 32).FormulaR1C1 = "=DADOS!RC" &
Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="Comprimento L").Column
.Cells(1, 33).FormulaR1C1 = "=DADOS!RC" &
Worksheets("DADOS").Cells.Find(what:="k").Column
.Range(.Cells(1, 27), .Cells(1, 33)).AutoFill Destination:=.Range(.Cells(1, 27), .Cells(barra + 1,
33))
'Preenche as colunas dos deslocamentos nodais dos elemetos
For a = 1 To barra
.Cells(a + 1, 34).FormulaR1C1 = "=R" & 3 * Worksheets("DADOS").Cells(a + 1, 25) - 1 &
"C12"
.Cells(a + 1, 35).FormulaR1C1 = "=R" & 3 * Worksheets("DADOS").Cells(a + 1, 25) & "C12"
.Cells(a + 1, 36).FormulaR1C1 = "=R" & 3 * Worksheets("DADOS").Cells(a + 1, 25) + 1 &
"C12"
.Cells(a + 1, 37).FormulaR1C1 = "=R" & 3 * Worksheets("DADOS").Cells(a + 1, 26) - 1 &
"C12"
.Cells(a + 1, 38).FormulaR1C1 = "=R" & 3 * Worksheets("DADOS").Cells(a + 1, 26) & "C12"

```

```

.Cells(a + 1, 39).FormulaR1C1 = "=R" & 3 * Worksheets("DADOS").Cells(a + 1, 26) + 1 &
"C12"
Next a
'Preenche as celulas dos deslocamentos, deformação, forças axiais e tensão Normal
.Cells(2, 40).FormulaArray = "=MMULT((R[0]C37:R[0]C39-
R[0]C34:R[0]C36),TRANSPOSE(DADOS!R[0]C33:R[0]C35))"
.Cells(2, 41).FormulaR1C1 = "=RC40/RC32"
.Cells(2, 42).FormulaR1C1 = "=RC40*RC33"
.Cells(2, 43).FormulaR1C1 = "=RC41*RC31"
If barra <> 1 Then
.Range(.Cells(2, 40), .Cells(2, 43)).AutoFill Destination:=.Range(.Cells(2, 40), .Cells(barra +
1, 43))
End If
'Formatação
With .Range("AA1:AQ1")
.Font.ColorIndex = 2
.Interior.ColorIndex = 23
End With
With .Range("J1:Y1")
.Font.ColorIndex = 2
.Interior.ColorIndex = 23
End With
With .Range(.Cells(1, 27), .Cells(barra + 1, 43))
.Borders.LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeLeft).Weight = xlMedium
.Borders(xlEdgeTop).Weight = xlMedium
.Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
.Borders(xlEdgeRight).Weight = xlMedium
.Interior.ColorIndex = 23
.Font.ColorIndex = 2
End With
.Range(.Cells(1, 27), .Cells(1, 43)).Borders(xlEdgeBottom).Weight = xlMedium
.Range("AZ2:BA5").FormulaArray = "=MMULT({0,0,0;1,0,0;0,1,0;0,0,1},R13C7:R15C9)"
.Range("AR2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC25,R2C14:R" & juncao + 1 & "C20,6)"
.Range("AS2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC25,R2C14:R" & juncao + 1 & "C20,7)"
.Range("AT2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC26,R2C14:R" & juncao + 1 & "C20,6)"
.Range("AU2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC26,R2C14:R" & juncao + 1 & "C20,7)"
.Range("AV2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC25,R2C14:R" & juncao + 1 & "C22,8)"
.Range("AW2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC25,R2C14:R" & juncao + 1 & "C22,9)"
.Range("AX2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC26,R2C14:R" & juncao + 1 & "C22,8)"
.Range("AY2").FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(DADOS!RC26,R2C14:R" & juncao + 1 & "C22,9)"
If barra <> 1 Then
.Range("AR2:AY2").AutoFill Destination:=.Range(.Cells(2, 44), .Cells(barra + 1, 51))
End If
.Range(.Cells(2, 44), .Cells(barra + 1, 53)).Font.ColorIndex = 2
.Range("AX2:BA5").Font.ColorIndex = 2
End With
Application.Calculation = xlAutomatic
Application.EnableEvents = True
End Sub

```


- Botão Importar e calcular a hipótese 1 vento 0°

EFEITO DE 1° ORDEM

Importar e Calcular
Hipótese 1 vento 0°

```

Sub ImportaHipotese1vento0()
  Sheets("HIPOTESES").Select ' copia os esforços da hipotese
  Range("I3:K500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DADOS").Select ' cola o resultado da hipotese
  Range("Q2:S500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
  Sheets("ESTRUTURA").Select ' copia o modulo de elasticidade
  Range("V2:V500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DADOS").Select ' cola o modulo de elasticidade
  Range("AK2:AK2500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
Dim no1 As Integer
Dim no2 As Integer
Dim no3 As Integer
Dim no4 As Integer
no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no1 + 1, 20) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no2 + 1, 20) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no3 + 1, 20) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no4 + 1, 20) = ""
no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no1 + 1, 22) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no2 + 1, 22) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no3 + 1, 22) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no4 + 1, 22) = ""
Call Calcular
  Sheets("Resultado").Select
  Range("J1:AQ500").Select ' copia o resultado da hipotese
  Selection.Copy
  Sheets("RESULTADO VENTO 0").Select ' cola o resultado da hipotese
  Range("A1:AH500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

```

```

Range("A1").Select
Sheets("DADOS").Select
MsgBox ("Cálculo Hipótese 1 Vento 0° realizado com sucesso")
    Sheets("DADOS").Select
Range("AA1").Select
If MsgBox("Deseja analisar a Sensibilidade da estrutura para efeito de 2° ordem?", vbYesNo) =
vbYes Then
Sheets("2° ORDEM").Select
Else
Exit Sub
End If
End Sub

```

- Botão Importar e calcular hipótese 1 vento 90°:

Importar e Calcular
 Hipótese 1 vento 90°

```

Sub ImportaHipotese1vento90()
    Sheets("HIPOTESSES").Select ' copia os esforços da hipotese
    Range("M3:O500").Select
    Selection.Copy
    Sheets("DADOS").Select ' cola os esforços da hipotese
    Range("Q2:S500").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    Sheets("ESTRUTURA").Select ' copia o modulo de elasticidade
    Range("W2:W500").Select
    Selection.Copy
    Sheets("DADOS").Select ' cola o modulo de elasticidade
    Range("AK2:AK2500").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    Sheets("DADOS").Select
    Dim no1 As Integer
    Dim no2 As Integer
    Dim no3 As Integer
    Dim no4 As Integer
    no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
    Cells(no1 + 1, 20) = ""
    no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
    Cells(no2 + 1, 20) = ""
    no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
    Cells(no3 + 1, 20) = ""
    no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
    Cells(no4 + 1, 20) = ""
    no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
    Cells(no1 + 1, 22) = ""
    no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
    Cells(no2 + 1, 22) = ""
    no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
    Cells(no3 + 1, 22) = ""

```

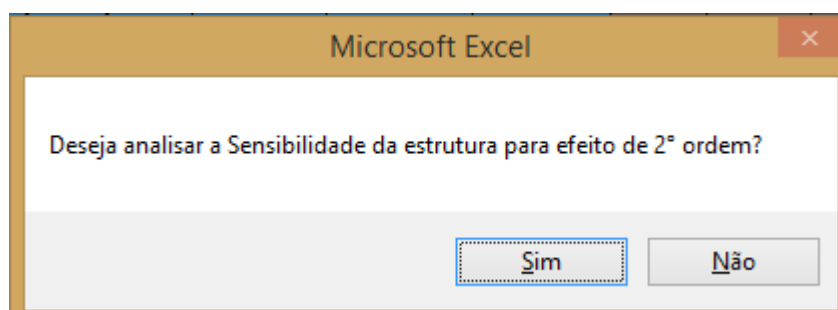
```

no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no4 + 1, 22) = ""
Call Calculat
Sheets("Resultado").Select
Range("J1:AQ500").Select ' copia o resultado da hipotese
Selection.Copy
Sheets("RESULTADO VENTO 90").Select ' cola o resultado da hipotese
Range("A1:AH500").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Range("A1").Select
Sheets("DADOS").Select
MsgBox ("Cálculo Hipótese 1 Vento 90° realizado com sucesso")
Range("AA1").Select
If MsgBox("Deseja analisar a Sensibilidade da estrutura para efeito de 2° ordem?", vbYesNo) =
vbYes Then
Sheets("2° ORDEM").Select
Else
Exit Sub
End If
End Sub

```

- Mensagem para análise de segunda ordem:

Após os cálculos da Hipótese 1 Vento 0° e Vento 90°, é exibido a *msgbox* (caixa de mensagem) para análise de segunda ordem



Se a resposta for sim você é transferido para a planilha de segunda ordem para análise da sensibilidade ao deslocamento da estrutura.

Nesta planilha é possível escolher as barras a serem analisadas e resultado é calculado automaticamente. Fórmula de cálculo consta na planilha.

SENSIBILIDADE AO DESLOCAMENTO DA ESTRUTURA EFEITO DE 2ºORDEM

Deslocabilidade Vento 0°:

Selecione a Barra horizontal à ser analisada:					Barra 52	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 6	Barra 7	
Junção 16	Junção 21	Junção 6	Junção 7	Junção 8	Junção 7	Junção 5	Junção 8	Junção 8	Junção 7	Junção 5	Junção 8
h=	7	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Δ1h=	1,5259E-05	1,5259E-05	1,2207E-04	1,2207E-04	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00
Nsd=	206,3173	118,1489	1351,6477	419,6803	5632,2870	419,6803	4700,3197	5632,2870	5632,2870	419,6803	4700,3197
Hsd=	14769,4498	96,6110	660,6882	5177,1728	7714,3427	5177,1728	3014,8272	7714,3427	7714,3427	5177,1728	3014,8272
B2=	1,00000004	1,00000244	1,00009794	1,00000388	1,00000000	1,00000000	1,00000000	1,00000000	1,00000000	1,00000000	1,00000000

Deslocabilidade Vento 90°:

Selecione a Barra horizontal à ser analisada:					Barra 52	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 6	Barra 7	
Junção 16	Junção 21	Junção 6	Junção 7	Junção 8	Junção 7	Junção 5	Junção 8	Junção 8	Junção 7	Junção 5	Junção 8
h=	7	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Δ1h=	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05	9,1553E-05
Nsd=	10410,4209	548,6197	12615,6477	4003,6803	6143,7130	4003,6803	24156,3197	6143,7130	6143,7130	4003,6803	24156,3197
Hsd=	18340,7736	2376,6169	4096,0000	4608,0000	5632,0000	4608,0000	0,0000	5632,0000	5632,0000	4608,0000	0,0000
B2=	1,00000873	1,00000276	1,00011059	1,00003120	1,00003917	1,00003120	#DIV/0!	1,00003917	1,00003917	1,00003120	#DIV/0!

- Botão Importar e calcular hipótese 2:

Importar e Calcular
Hipótese 2

```

Sub ImportaHipotese2()
  Sheets("HIPOTEESES").Select
  Range("Q3:S500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DADOS").Select
  Range("Q2:S500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
  Sheets("ESTRUTURA").Select
  Range("X2:X500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DADOS").Select
  Range("AK2:AK2500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
  Sheets("DADOS").Select
  Dim no1 As Integer
  Dim no2 As Integer
  Dim no3 As Integer
  Dim no4 As Integer
  no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
  Cells(no1 + 1, 20) = ""

```

```

no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no2 + 1, 20) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no3 + 1, 20) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no4 + 1, 20) = ""
no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no1 + 1, 22) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no2 + 1, 22) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no3 + 1, 22) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no4 + 1, 22) = ""
Call Calcula
Sheets("Resultado").Select
    Range("J1:AQ500").Select
    Selection.Copy
    Sheets("RESULTADO HIPÓTESE 2").Select
    Range("A1:AH500").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Range("A1").Select
Sheets("DADOS").Select
MsgBox ("Cálculo Hipótese 2 realizado com sucesso")
Range("AA1").Select
End Sub

```

- Botão rotina Importar e calcular hipótese 3

Importar e Calcular
Hipótese 3

```

Sub ImportaHipotese3()
    Sheets("HIPOTEESES").Select
    Range("U3:W500").Select
    Selection.Copy
    Sheets("DADOS").Select
    Range("Q2:S500").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
    Sheets("ESTRUTURA").Select
    Range("Y2:Y500").Select
    Selection.Copy
    Sheets("DADOS").Select
    Range("AK2:AK2500").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
Dim no1 As Integer
Dim no2 As Integer

```

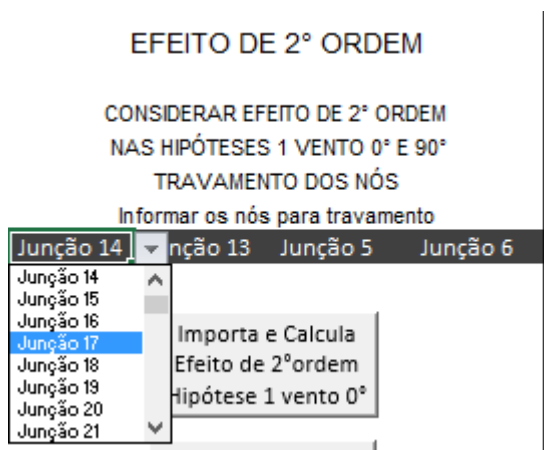
```

Dim no3 As Integer
Dim no4 As Integer
no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no1 + 1, 20) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no2 + 1, 20) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no3 + 1, 20) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no4 + 1, 20) = ""
no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no1 + 1, 22) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no2 + 1, 22) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no3 + 1, 22) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no4 + 1, 22) = ""
Call Calcular
Sheets("Resultado").Select
    Range("J1:AQ500").Select
    Selection.Copy
    Sheets("RESULTADO HIPÓTESE 3").Select
    Range("A1:AH500").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
MsgBox ("Cálculo Hipótese 3 realizado com sucesso")
Range("AA1").Select
End Sub

```

Após analisar a sensibilidade ao deslocamento e realizado o cálculo de efeito da segunda ordem.

Etapa 1: Escolha das junções para o travamento do nós. Lista com todas as junções projetadas através da planilha de desenho.



Etapa 2: Executar os seguintes botões:

- Botão Importar e calcular o efeito de 2º ordem hipótese 1 vento 0°.

Utiliza a rotina abaixo de importa e calcular os esforços com as junções selecionadas para o travamento.

Importa e Calcula
Efeito de 2º ordem
Hipótese 1 vento 0°

```

Sub HIPOTESEVENTO02ORDEM()
Sheets("HIPOTEESES").Select ' copia os esforços da hipotese
  Range("I3:K500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DADOS").Select ' cola os esforços da hipotese
  Range("Q2:S500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
Dim no1 As Integer
Dim no2 As Integer
Dim no3 As Integer
Dim no4 As Integer
no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TRAVA NO EM X
Cells(no1 + 1, 20) = "0"
no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TRAVA NO EM X
Cells(no2 + 1, 20) = "0"
no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TRAVA NO EM X
Cells(no3 + 1, 20) = "0"
no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TRAVA NO EM X
Cells(no4 + 1, 20) = "0"
no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no1 + 1, 22) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no2 + 1, 22) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no3 + 1, 22) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no4 + 1, 22) = ""
Call Calcular
Sheets("Resultado").Select
  Range("J1:AQ500").Select ' copia o resultado da hipotese
  Selection.Copy
  Sheets("RESULTADO 2º ORDEM NÓS VENTO 0").Select
  Range("A1:AH500").Select ' cola o resultado da hipotese
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
MsgBox ("Cálculo Hipótese 1 vento 90° análise de 2º ordem realizado com sucesso")
Range("AA1").Select
End Sub

```

- Botão Importar e calcular o efeito de 2° ordem hipótese 1 vento 90°.

Utiliza a rotina abaixo de importa e calcular os esforços com as junções selecionadas para o travamento.

Importar e Calcular
Efeito de 2° ordem
Hipótese 1 vento 90°

```
Sub HIPOTESEVENTO902ORDEM()
  Sheets("HIPOTESSES").Select ' copia os esforços da hipotese
  Range("M3:O500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DADOS").Select ' cola os esforços da hipotese
  Range("Q2:S500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
  Application.CutCopyMode = False
  Sheets("DADOS").Select
  Dim no1 As Integer
  Dim no2 As Integer
  Dim no3 As Integer
  Dim no4 As Integer
  no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
  Cells(no1 + 1, 20) = ""
  no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
  Cells(no2 + 1, 20) = ""
  no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
  Cells(no3 + 1, 20) = ""
  no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
  Cells(no4 + 1, 20) = ""
  no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TRAVA NO EM Z
  Cells(no1 + 1, 22) = "0"
  no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TRAVA NO EM Z
  Cells(no2 + 1, 22) = "0"
  no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TRAVA NO EM Z
  Cells(no3 + 1, 22) = "0"
  no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TRAVA NO EM Z
  Cells(no4 + 1, 22) = "0"
  Call Calcular
  Sheets("Resultado").Select
  Range("J1:AQ500").Select ' copia o resultado da hipotese
  Selection.Copy
  Sheets("RESULTADO 2° ORDEM NÓS VENTO 90").Select
  Range("A1:AH500").Select ' cola o resultado da hipotese
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
  Application.CutCopyMode = False
  Sheets("DADOS").Select
  MsgBox ("Cálculo Hipótese 1 vento 90° análise de 2° ordem realizado com sucesso")
  Range("AA1").Select
End Sub
```

Etapa 3: Executar os seguintes botões:

- Botão Importar e calcular o efeito de 2° ordem hipótese 1 vento 0°.

Utiliza a rotina abaixo de importa e calcular os esforços com as reações do resultado do travamento dos nós vento 0°.

REAÇÕES DOS NÓS TRAVADOS
1° PASSO: RETIRAR TODAS AS CARGAS
2° PASSO: INSERIR AS REAÇÕES NAS
JUNÇÕES QUE FORAM TRAVADAS

Importar e Calcular
Efeito de 2° ordem
vento 0°

```
Sub HIPOTSE2ORDEMVENTO0REAÇÃO()
Sheets("DADOS").Select
  Range("Q2:S500").Select
  Selection.ClearContents
  Sheets("ESFORÇOS").Select ' copia os esforços da hipotese
  Range("V3:V500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DADOS").Select ' cola os esforços da hipotese
  Range("Q2:Q500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
Dim no1 As Integer
Dim no2 As Integer
Dim no3 As Integer
Dim no4 As Integer
no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no1 + 1, 20) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no2 + 1, 20) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no3 + 1, 20) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no4 + 1, 20) = ""
no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no1 + 1, 22) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no2 + 1, 22) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no3 + 1, 22) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no4 + 1, 22) = ""
Call Calcular
Sheets("Resultado").Select
  Range("J1:AQ500").Select ' copia o resultado da hipotese
  Selection.Copy
  Sheets("RESULTADO 2° O. REAÇÃO VENTO 0").Select
  Range("A1:AH500").Select ' cola o resultado da hipotese
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
```

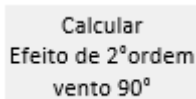
```

Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
MsgBox ("Cálculo Hipótese 1 vento 0° análise de 2° ordem realizado com sucesso")
Range("AA1").Select
End Sub

```

- Botão Calcular o efeito de 2° ordem hipótese 1 vento 90°.

Utiliza a rotina abaixo de importa e calcular os esforços com as reações do resultado do travamento dos nós vento 90°.



```

Sub HIPOTSE2ORDEMVENTO90REAÇÃO()
Sheets("DADOS").Select
Range("Q2:S500").Select
Selection.ClearContents
Sheets("ESFORÇOS").Select ' copia os esforços da hipotese
Range("W3:W500").Select
Selection.Copy
Sheets("DADOS").Select ' cola os esforços da hipotese
Range("S2:S500").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Sheets("DADOS").Select
Dim no1 As Integer
Dim no2 As Integer
Dim no3 As Integer
Dim no4 As Integer
no1 = Range("J:J").Find(Range("F26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no1 + 1, 20) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no2 + 1, 20) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no3 + 1, 20) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I26")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM X
Cells(no4 + 1, 20) = ""
no1 = Range("J:J").Find(Range("F31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no1 + 1, 22) = ""
no2 = Range("J:J").Find(Range("G31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no2 + 1, 22) = ""
no3 = Range("J:J").Find(Range("H31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no3 + 1, 22) = ""
no4 = Range("J:J").Find(Range("I31")).Row ' TIRA O NO TRAVADO EM Z
Cells(no4 + 1, 22) = ""
Call Calcular
Sheets("Resultado").Select
Range("J1:AQ500").Select ' copia o resultado da hipotese
Selection.Copy
Sheets("RESULTADO 2° O. REAÇÃO VENTO 90").Select
Range("A1:AH500").Select ' cola o resultado da hipotese

```

```

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
Range("A1").Select
Sheets("DADOS").Select
MsgBox ("Cálculo Hipótese 1 vento 90° análise de 2° ordem realizado com sucesso")
Range("AA1").Select
End Sub
    
```

10. PLANILHA MATRIZ

Planilha gerada através da rotina de cálculo das hipóteses de carregamentos.

Figura 111 – Planilha das matrizes geradas pelo cálculo das hipóteses.

Legenda														
		Matriz Rigidez do elemento												
		Matriz Condição de Contorno do elemento												
		Matriz Inversa da Matriz Condição de Contorno do elemento												
		Matriz Final da estrutura												
1,03E+06	6,21E+06	1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,03E+06	-6,21E+06
6,21E+06	3,73E+07	6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,21E+06	-3,73E+07
1,03E+06	6,21E+06	1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,03E+06	-6,21E+06
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E+06	6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,21E+06	3,73E+07	-6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,03E+06	-6,21E+06	1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E+06	-6,21E+06	1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,21E+06	3,73E+07	-6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E+06	-6,21E+06	1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E+06	-6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,21E+06	3,73E+07	6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
-1,03E+06	-6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,90E+07	-1,17E+07
-6,21E+06	-3,73E+07	-6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,17E+07	1,17E+07
-1,03E+06	-6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-7,94E+06	3,68E+06
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,03E+06	-6,21E+06	1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,21E+06	-3,73E+07	6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E+06	6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,03E+06	6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,21E+06	-3,73E+07	6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,03E+06	6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-1,03E+06	6,21E+06	1,03E+06	-4,00E+07	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,21E+06	-3,73E+07	-6,21E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E+06	-6,21E+06	-1,03E+06	0,00E+00	0,00E+00

Fonte: Produção do próprio autor.

11. PLANILHA RESULTADO, RESULTADO VENTO 0, RESULTADO VENTO 90, RESULTADO HIPOTESE 2, RESULTADO HIPOTESE 3, RESULTADO 2° ORDEM NOS VENTO 0°, RESULTADO 2° ORDEM NOS VENTO 90°, RESULTADO 2° O. REAÇÃO VENTO 0. RESULTADO 2° O. REAÇÃO VENTO 90.

Planilhas geradas através dos cálculos de todas as hipóteses de primeira e segunda ordem.

Exemplo:

Figura 112 – Exemplo de planilhas geradas dos cálculos das hipóteses.

Junções	Carregamento	Deslocamento	Reações	Junções	UX	UY	UZ	FX	FY	FZ
X	0	0	8	1	0	0	0	8	48	8
Y	0	0	48	2	0	0	0	-21,5	-124	21,5
Z	0	0	8	3	0	0	0	18,25	-109	18,25
X	0	0	-21,5	4	0	0	0	-33	194	33
Y	0	0	-124	5	1577534730	2,46E+08	-3,1E+09	0	40	54,52972722
Z	0	0	21,5	6	-416190760,1	-4,4E+08	-3,1E+09	0	0	-17,52972722
X	0	0	18,25	7	-416190760,1	-2,5E+08	-1,1E+09	-4	-34	27
Y	0	0	-109	8	1577534730	4,4E+08	-1,1E+09	6	-6	7
Z	0	0	18,25	9	1383977401	2,46E+08	-2,4E+09	0	20	16
X	0	0	-33	10	-609748088,4	-4,4E+08	-2,4E+09	0	-36	32
Y	0	0	194	11	-609748088,4	-2,5E+08	-3,8E+08	20	44	-50
Z	0	0	33	12	1383977401	4,4E+08	-3,8E+08	12	40	-10
X	0	1577534730	0	13	1190420073	2,46E+08	-1,7E+09	-15,62070665	6,758586704	-35,47205488
Y	0	246386482,1	40	14	-803305416,6	-4,4E+08	-1,7E+09	-21,63639618	-7,272792363	12,96092376
Z	37,47027278	-3055853622	54,52972722	15	-803305416,6	-2,5E+08	3,11E+08	37,65769445	-28,3153889	-6,342305551
X	0	-416190760,1	0	16	1190420073	4,4E+08	3,11E+08	55,64200492	-55,78400983	34,35799508
Y	0	-439943810,4	0	17	193557328,2	-2,9E+08	-3,7E+09	4	-4	0
Z	49,52972722	-3055853622	-17,52972722	18	387114656,5	-2,9E+08	-4,4E+09	-2	8	-64
X	0	-416190760,1	-4	19	193557328,2	2,9E+08	2,3E+09	-34	-12	0
Y	0	-246386482,1	-34	20	387114656,5	2,9E+08	1,62E+09	8	10	-24
Z	0	-1062128133	27	21	1,28579E-05	5,87E-08	-3,2E-05	-4,792596535	14,61360439	6,718620933

Barras	Nó a	Nó b	Área	Modulo E	Comprimento L	k	UXi	UYi	UZi	UXj	UYj	UZj	Deslocamento	Deformação	Força Axial	Tensão Normal
1	1	5	0,000606	2E+11	3,082207001	39322472	0	0	0	1,58E+09	2,46E+08	-3,1E+09	-1,3113E-06	-4,25443E-07	-51,56364409	-85088,5216
2	2	6	0,000606	2E+11	3,082207001	39322472	0	0	0	-4,2E+08	-4,4E+08	-3,1E+09	3,33786E-06	1,08294E-06	131,2529122	216588,9641
3	3	7	0,000606	2E+11	3,082207001	39322472	0	0	0	-4,2E+08	-2,5E+08	-1,1E+09	2,83122E-06	9,18569E-07	111,3305952	183713,8534
4	4	8	0,000606	2E+11	3,082207001	39322472	0	0	0	1,58E+09	4,4E+08	-1,1E+09	-5,0962E-06	-1,65342E-06	-200,3950713	-330684,9362
5	6	7	0,0004	2E+11	2	40000000	-4,2E+08	-4,4E+08	-3,1E+09	-4,2E+08	-2,5E+08	-1,1E+09	1,2517E-06	6,25849E-07	50,06790161	125169,754
6	8	7	0,0004	2E+11	2	40000000	1,58E+09	4,4E+08	-1,1E+09	-4,2E+08	-2,5E+08	-1,1E+09	5,96046E-07	2,98023E-07	23,84185791	59604,64478
7	5	8	0,0004	2E+11	2	40000000	1,58E+09	2,46E+08	-3,1E+09	1,58E+09	4,4E+08	-1,1E+09	-9,53674E-07	-4,76837E-07	-38,14697266	-95367,43164
8	5	6	0,0004	2E+11	2	40000000	1,58E+09	2,46E+08	-3,1E+09	-4,2E+08	-4,4E+08	-3,1E+09	9,53674E-07	4,76837E-07	38,14697266	95367,43164
9	6	10	0,0004	2E+11	2	40000000	-4,2E+08	-4,4E+08	-3,1E+09	-6,1E+08	-4,4E+08	-2,4E+09	2,08616E-06	1,04308E-06	83,44650269	208616,2567
10	7	11	0,0004	2E+11	2	40000000	-4,2E+08	-2,5E+08	-1,1E+09	-6,1E+08	-2,5E+08	-3,8E+08	1,43051E-06	7,15256E-07	57,22045898	143051,1475
11	8	12	0,0004	2E+11	2	40000000	1,58E+09	4,4E+08	-1,1E+09	1,38E+09	4,4E+08	-3,8E+08	-1,3113E-06	-6,55651E-07	-52,4520874	-131130,2185
12	5	9	0,0004	2E+11	2	40000000	1,58E+09	2,46E+08	-3,1E+09	1,38E+09	2,46E+08	-2,4E+09	1,13249E-06	5,66244E-07	45,29953003	113248,8251
13	10	11	0,0004	2E+11	2	40000000	-6,1E+08	-4,4E+08	-2,4E+09	-6,1E+08	-2,5E+08	-3,8E+08	-1,19209E-07	-5,96046E-08	-4,768371582	-11920,92896
14	12	11	0,0004	2E+11	2	40000000	1,38E+09	4,4E+08	-3,8E+08	-6,1E+08	-2,5E+08	-3,8E+08	4,17233E-07	2,08616E-07	16,68930054	41723,25134
15	9	12	0,0004	2E+11	2	40000000	1,38E+09	2,46E+08	-2,4E+09	1,38E+09	4,4E+08	-3,8E+08	0	0	0	0
16	9	10	0,0004	2E+11	2	40000000	1,38E+09	2,46E+08	-2,4E+09	-6,1E+08	-4,4E+08	-2,4E+09	0	0	0	0
17	10	14	0,0004	2E+11	2	40000000	-6,1E+08	-4,4E+08	-2,4E+09	-8E+08	-4,4E+08	-1,7E+09	-6,55651E-07	-3,27826E-07	-26,2260437	-65565,10925
18	11	15	0,0004	2E+11	2	40000000	-6,1E+08	-2,5E+08	-3,8E+08	-8E+08	-2,5E+08	3,11E+08	-2,38419E-07	-1,19209E-07	-9,536743164	-23841,85791
19	12	16	0,0004	2E+11	2	40000000	1,38E+09	4,4E+08	-3,8E+08	1,19E+09	4,4E+08	3,11E+08	-1,49012E-06	-7,45058E-07	-59,60464478	-149011,6119
20	9	13	0,0004	2E+11	2	40000000	1,38E+09	2,46E+08	-2,4E+09	1,19E+09	2,46E+08	-1,7E+09	-1,13249E-06	-5,66244E-07	-45,29953003	-113248,8251
21	14	15	0,0004	2E+11	2	40000000	-8E+08	-4,4E+08	-1,7E+09	-8E+08	-2,5E+08	3,11E+08	1,19209E-07	5,96046E-08	4,768371582	11920,92896

Fonte: Produção do próprio autor.

12. PLANILHA FORÇA AXIAL

Planilha para armazenamento dos dados das planilhas de resultados e banco de dados para a planilha de dimensionamento.

Figura 113 – Armazenamento dos dados das planilhas de resultados.

Barra	Hipótese 1 Vento 0°	Hipótese 1 Vento 90°	Hipótese 1 2° ordem Vento 0° Nó travado	Hipótese 1 2° ordem Vento 90° Nó travado	Hipótese 1 2° ordem Vento 0° Reação	Hipótese 1 2° ordem Vento 90° Reação	Hipótese 1 2° ordem Vento 0° Final	Hipótese 1 2° ordem Vento 90° Final	Hipótese 2 Cabo condutor rompido	Hipótese 3 Cabo para raio rompido	Força axial Tração Maior	Força axial Compressão Maior
Barra 1	6900,1531	15600,34614	-655,6786106	34818,93662	6000,13313	-51,56364409	5345,042199	34818,93662	5400,119817	21600,47927	34818,93662	-655,6786106
Barra 2	15900,3528	3600,079878	-528,5273519	-38446,84915	15900,3528	131,2529122	15373,38279	-38446,84915	1200,026626	-33000,73222	15900,3528	-38446,84915
Barra 3	-8400,186382	-28800,63902	-2984,831852	-67755,72908	-3600,079878	111,3305952	-6585,264338	-67755,72908	-12150,26959	-31200,69228	111,3305952	-67755,72908
Barra 4	-14400,31951	4200,093191	-2954,948377	64288,38654	-7800,173069	-200,3950713	-10755,88543	64288,38654	-2400,03252	32400,7189	64288,38654	-14400,31951
Barra 5	4882,8125	6103,515625	5471,142547	-7282,495499	-4882,8125	50,06790161	587,8518029	-7282,495499	1220,703125	-8850,097656	6103,515625	-8850,097656
Barra 6	0	-2441,40625	-400,5432129	-547,5898592	-9765,625	23,84185791	-10167,1247	-547,5898592	2441,40625	-14648,4375	2441,40625	-14648,4375
Barra 7	0	0	5094,223117	6272,792816	-4882,8125	-38,14697266	210,9323729	6272,792816	0	4577,636719	6272,792816	-4882,8125
Barra 8	1220,703125	0	228,8818359	0	-2441,40625	38,14697266	-2212,763536	0	-2441,40625	-4882,8125	1220,703125	-4882,8125
Barra 9	11596,67969	-9765,625	19,66953278	-36010,14614	12207,03125	83,44650269	12227,89639	-36010,14614	305,1757813	-28076,17188	12227,89639	-36010,14614
Barra 10	-4882,8125	-14648,4375	1410,245895	-28508,00753	-3662,109375	57,22045898	-2252,222162	-28508,00753	-3051,757813	-17700,19531	1410,245895	-28508,00753
Barra 11	-10833,74023	-2441,40625	1634,955406	26171,80347	-20294,18945	-52,4520874	-18661,22175	26171,80347	305,1757813	4272,460938	26171,80347	-20294,18945
Barra 12	3662,109375	15869,14063	210,4043961	-4687,309265	4882,8125	45,29953003	5093,69514	-4687,309265	0	17089,84375	17089,84375	-4687,309265
Barra 13	2441,40625	3662,109375	3099,781336	4709,95903	2441,40625	-4,768871582	5541,426708	4709,95903	-2441,40625	2746,582031	5541,426708	-2441,40625
Barra 14	0	-1220,703125	-534,0576172	500,7760897	0	16,68930054	-534,0576172	500,7760897	-3662,109375	-4882,8125	500,7760897	-4882,8125

Fonte: Produção do próprio autor.

13. PLANILHA TRAÇÃO

Planilha para auxiliar no cálculo de dimensionamento por Tração recebe dados das planilhas de força axial, desenho e referência. Fórmulas utilizadas pela NB8800 para dimensionamento de estruturas.

Barra	Perfil selec.	Ag	Ae	fy	fu	Força Axial	Nt,sd
Barra 1	2	0,000606	0,000455	345	450	34818,93662	34818,93662
Barra 2	2	0,000606	0,000455	345	450	15900,3528	15900,3528
Barra 3	2	0,000606	0,000455	345	450	111,3305952	111,3305952
Barra 4	2	0,000606	0,000455	345	450	64288,38654	64288,38654
Barra 5	1	0,0004	0,0003	345	450	6103,515625	6103,515625

Nt,Rd(1)	Nt,Rd(2)	Tração	Esbeltez	Esbeltez	MATERIAL	
190063,6364	185931,8	Suporta	198,8521	OK	ASTM A 572 GRAU 50	
190063,6364	185931,8	Suporta	198,8521	OK	fy	fu
190063,6364	185931,8	Suporta	198,8521	OK	345	450
190063,6364	185931,8	Suporta	198,8521	OK		
125454,5455	122727,3	Suporta	145,9854	OK		

14. PLANILHA COMPRESSÃO

Planilha para auxiliar no cálculo de dimensionamento por COMPRESSÃO, o qual recebe dados das planilhas de força axial, desenho e referência. Fórmulas utilizadas pela NB8800 para dimensionamento de estruturas.

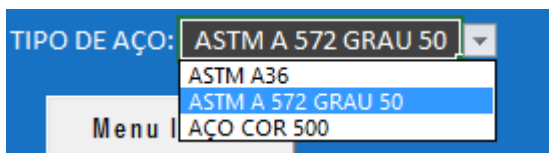
Barra	Perfil	AG	fy	fg	b/t	b/tlim	Q	Lx1	rx1	k1*Lx1	Ne(kN)	λo	χ
Barra 1	2	0,0006	345	450	8,0000	10834,7268	1,0000	3,08	0,0155	3,1	29988808,3779	0,00264	1,0000
Barra 2	2	0,0006	345	450	8,0000	10834,7268	1,0000	3,08	0,0155	3,1	29988808,3779	0,00264	1,0000
Barra 3	2	0,0006	345	450	8,0000	10834,7268	1,0000	3,08	0,0155	3,1	29988808,3779	0,00264	1,0000

Força Axial	Nc,sd	Nc,Rd	Compressão	Esbeltez	Esbeltez	MATERIAL	
-655,6786	655,6786	190063,0818	Suporta	198,8521	OK	ASTM A 572 GRAU 50	
-38446,8491	38446,8491	190063,0818	Suporta	198,8521	OK	fy	fg
-67755,7291	67755,7291	190063,0818	Suporta	198,8521	OK	345	450

15. PLANILHA DIMENSIONAMENTO

Planilha para dimensionamento dos perfis escolhidos e recálculos de todas as hipóteses de carregamento.

Lista para escolha do material dos perfis metálicos: Lista gerada a partir da planilha REFERENCIA utilizada como banco de dados pelo software.



- Botão para reiniciar o historico de perfis calculados.

REINICIA HISTÓRICO DE
PERFIL

```
Sub LIMPARHISTORICODEPEFIL()
Sheets("TRAÇÃO").Select
Range("B2:B500").Value = 1
Sheets("COMPRESSÃO").Select
Range("B2:B500").Value = 1
Sheets("DIMENSIONAMENTO").Select
End Sub
```

- Botão verificar a tração: Botão utilizado para a verificação e escolha do perfil que aguenta os esforços de tração conforme NBR 8800

Verificar tração

```
Private Sub CommandButton2_Click()
Dim CONT As Integer
Dim lin As Integer
Cells(2, 2).Select
lin = 2 'linha selecionada
CONT = Worksheets("REFERENCIAS").Range("Q:Q").Find(Cells(lin, 2)).Row ' linha que começa a
contar
'loop para percorrer os perfis que não passaram
Do Until ActiveCell = ""
'loop para percorrer todos os perfis de dimensionamento
Do While Worksheets("REFERENCIAS").Cells(CONT, 28)
Worksheets("TRAÇÃO").Cells(lin, 2) = Worksheets("REFERENCIAS").Cells(CONT, 28)
CONT = CONT + 1
If Worksheets("TRAÇÃO").Cells(lin, 12) = "Suporta" And Worksheets("TRAÇÃO").Cells(lin,
14) = "OK" Then
Exit Do
Else

On Error GoTo 0
End If

Loop
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
lin = lin + 1
CONT = Sheets("REFERENCIAS").Range("Q:Q").Find(Cells(lin, 2)).Row
Loop
Cells(6, 14).Select
MsgBox ("Perfil redimensionado por tração com sucesso.")
End Sub
```

- Botão verificar a Compressão: Botão utilizado para a verificação e escolha do perfil que agente os esforços de compressão conforme NBR 8800

Verificar Compressão

```
Private Sub CommandButton3_Click()
Dim CONT As Integer
Dim lin As Integer
Cells(2, 2).Select
lin = 2 'linha selecionada
CONT = Worksheets("REFERENCIAS").Range("Q:Q").Find(Cells(lin, 2)).Row ' linha que começa a
contar
'loop para percorrer os perfis que não passaram
Do Until ActiveCell = ""
  'loop para percorrer todos os perfis de dimensionamento
  Do While Worksheets("REFERENCIAS").Cells(CONT, 28)
    Worksheets("COMPRESSÃO").Cells(lin, 2) = Worksheets("REFERENCIAS").Cells(CONT, 28)
    CONT = CONT + 1
    If Worksheets("COMPRESSÃO").Cells(lin, 18) = "Suporta" And
Worksheets("COMPRESSÃO").Cells(lin, 20) = "OK" Then
Exit Do
Else
  On Error GoTo 0
End If
  Loop
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
lin = lin + 1
CONT = Worksheets("REFERENCIAS").Range("Q:Q").Find(Cells(lin, 2)).Row ' linha que começa a
contar
Loop
Cells(6, 14).Select
MsgBox ("Perfil redimensionado por compressão com sucesso.")
End Sub
```

- Botão recalcular: botão utilizado para recalcular todas as hipóteses de carregamento com o perfil novo dimensionado pela tração e compressão.

RECALCULAR HIPOTHESES
COM PERFIL
REDIMENSIONADO

```
Sub BOTAORECALCULAR()
  Sheets("DIMENSIONAMENTO").Select ' copia os perfis escolhidos
  Range("H2:H500").Select
  Selection.Copy
  Sheets("DESENHO").Select ' cola os perfis escolhidos
  Range("AC2:AC500").Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
```



```

Application.CutCopyMode = False
Call ImportaHipotese1vento0
Call ImportaHipotese1vento90
Call ImportaHipotese2
Call ImportaHipotese3
Call HIPOTESEVENTO02ORDEM
Call HIPOTESEVENTO902ORDEM
Call HIPOTSE2ORDEMVENTO0REAÇÃO
Call HIPOTSE2ORDEMVENTO90REAÇÃO
Sheets("DIMENSIONAMENTO").Select
Range("O6").Select
MsgBox ("Recalculo realizado com sucesso")
End Sub

```

Figura 114 – Tela de dimensionamento dos perfis.

Barra	Perfil Escolhido	Perfil Final Redimen.	Grupos	Perfil Final escolhido	Esbeltezz	Tração	Compressão	
1	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	DIMENSIONAMENTO DO PERFIL PARA A ESTRUTURA CONFORME NBR-8 SELECIONE O TIPO DE MATERIAL DE CANTONEIRA UTILIZADO TIPO DE AÇO: ASTM A 572 GRAU 50 <input type="button" value="Menu Inicial"/> <input type="button" value="REINICIA HISTÓRICO DE PERFIL"/> <input type="button" value="Verificar tração"/> <input type="button" value="Verificar Compressão"/> <input type="button" value="RECALCULAR HIPOTESSES COM PERFIL REDIMENSIONADO"/>
2	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	
3	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	
4	2" x 2" x 1/4"	2" x 2" x 1/4"	Grupo 1	2" x 2" x 1/4"	OK	Suporta	Suporta	
5	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
6	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
7	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
8	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
9	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
10	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
11	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
12	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
13	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
14	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
15	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
17	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
18	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
19	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
20	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	
21	1.3/4"x1.3/4"x3/16	1.3/4"x1.3/4"x3/16	Grupo 1	1.3/4"x1.3/4"x3/16	OK	Suporta	Suporta	

Fonte: Produção do próprio autor.

16. PLANILHA REFERENCIA

Planilha utilizada como banco de dados do software, contendo todos os dados de materiais e métodos para o processo de modelagem e dimensionamento da torre de transmissão elétrica.

Tabela 25 – Propriedades Mecânicas.

Propriedades Mecânicas Cantoneira			
Propriedades Mecânicas	Lista de Escoamento (MPa)	Lista de Resistência (MPa)	Alongamento após ruptura, % (lo=200mm)
ASTM A36	250	400	18
ASTM A 572 Grau 50	345	450	18
AÇO COR 500	370	500	

Fonte: Adaptado - NBR 8800 (2007)

Tabela 26 – Cabos condutores.

(continua)

CABOS CAA - NBR 7270 FABRICANTE COPPERTHREE					
CÓDIGO	SEÇÃO	DIAMETRO	CARGA RUP.	CAP. CORRENTE	PESO
CAA 1	13,30	5,04	5,28	95,00	54,00
CAA 2	16,77	5,66	6,71	115,00	68,00
CAA 3	21,15	6,36	8,39	130,00	85,00
CAA 4	21,15	6,53	10,52	130,00	100,00
CAA 5	26,67	7,14	10,22	150,00	108,00
CAA 6	33,59	7,01	12,68	175,00	136,00
CAA 7	33,59	8,24	16,13	175,00	159,00
CAA 8	42,41	9,00	15,81	200,00	171,00
CAA 9	53,52	10,11	19,35	230,00	216,00
CAA 10	67,33	11,34	23,59	265,00	272,00
CAA 11	85,12	12,75	29,41	310,00	344,00
CAA 12	107,20	14,31	37,09	350,00	433,00
CAA 13	135,19	15,45	30,27	430,00	431,00
CAA 14	135,19	16,09	42,93	410,00	511,00
CAA 15	135,19	16,28	50,25	440,00	546,00
CAA 16	152,01	17,27	56,57	470,00	615,00
CAA 17	152,01	17,78	69,75	480,00	700,00
CAA 18	170,45	17,35	38,22	500,00	544,00
CAA 19	170,45	18,31	62,73	510,00	690,00
CAA 20	170,45	18,83	77,45	515,00	785,00
CAA 21	201,45	18,85	44,34	555,00	641,00
CAA 22	201,45	19,62	64,70	565,00	763,00
CAA 23	201,45	19,88	72,13	570,00	814,00
CAA 24	201,45	20,44	90,33	575,00	925,00
CAA 25	241,70	20,70	52,34	615,00	773,00
CAA 26	241,70	21,49	76,78	635,00	915,00
CAA 27	241,70	21,80	86,73	640,00	978,00
CAA 28	241,69	22,40	105,20	645,00	1111,00
CAA 29	253,35	22,95	109,20	665,00	1155,00
CAA 30	281,98	22,35	60,98	690,00	902,00
CAA 31	281,98	23,22	88,29	700,00	1068,00
CAA 32	281,98	23,55	101,10	710,00	1142,00
CAA 33	281,98	24,22	122,90	710,00	1298,00
CAA 34	306,55	24,20	119,40	735,00	1160,00
CAA 35	306,55	24,19	95,88	740,00	1160,00
CAA 36	306,55	24,51	108,10	745,00	1237,00
CAA 37	322,26	23,66	60,68	745,00	961,00

Tabela 25 – Cabos condutores.

(conclusão)

CAA 38	322,26	23,90	69,67	750,00	1030,00
CAA 39	322,26	24,84	101,10	765,00	1223,00
CAA 40	322,26	25,15	111,90	775,00	1302,00
CAA 41	322,26	25,90	140,50	775,00	1472,00
CAA 42	337,76	25,38	105,50	790,00	1276,00
CAA 43	337,76	25,75	117,30	795,00	1367,00
CAA 44	362,54	26,68	125,90	835,00	1465,00
CAA 45	402,83	26,39	74,75	835,00	1195,00
CAA 46	402,83	27,74	123,90	886,00	1523,00
CAA 47	402,83	28,11	139,60	890,00	1626,00
CAA 48	403,77	27,03	95,26	884,00	1337,00
CAA 49	402,84	27,74	125,49	889,00	1523,00
CAA 50	402,84	28,96	170,88	918,00	1839,00
CAA 51	455,50	28,74	106,06	958,00	1510,00
CAA 52	456,06	29,51	141,96	961,00	1725,00
CAA 53	483,84	29,61	112,54	993,00	1603,00
CAA 54	484,53	30,42	147,08	996,00	1831,00
CAA 55	523,90	30,78	123,27	1043,00	1732,00
CAA 56	522,51	31,59	153,11	1047,00	1974,00
CAA 57	565,49	31,98	130,14	1092,00	1871,00
CAA 58	563,93	32,84	174,00	1093,00	2131,00
CAA 59	565,49	31,98	130,14	1092,00	1871,00
CAA 60	604,26	33,99	186,46	1093,00	2182,00
CAA 61	644,40	34,17	148,11	1155,00	2135,00
CAA 62	644,75	35,10	189,57	1187,00	2434,00
CAA 63	684,84	35,20	161,09	1229,00	2266,00
CAA 64	684,71	36,17	206,04	1232,00	2585,00
CAA 65	725,27	36,24	164,63	1272,00	2402,00
CAA 66	725,10	37,21	218,50	1275,00	2739,00
CAA 67	765,35	37,24	178,46	1300,00	2533,00
CAA 68	765,35	38,23	230,07	1320,00	2888,00
CAA 69	807,53	38,22	238,59	1354,00	2672,00
CAA 70	806,23	39,26	183,02	1359,00	3032,00
CAA 71	902,70	40,69	226,95	1453,00	3088,00
CAA 72	1092,31	44,75	268,34	1623,00	3041,00
CAA 73	1098,27	44,07	221,61	1607,00	3429,00
CAA 74	1171,42	45,77	252,32	1675,00	3761,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 27 – Cordoalhas de para raios.

CORDOALHAS PARA PARA-RAIOS CABLEMAX			
CÓDIGO	DIAMETRO	CARGA RUP.	PESO
PARA RAIOS 1	4,76	1,81	108,00
PARA RAIOS 2	6,35	3,02	180,00
PARA RAIOS 3	7,94	5,10	305,00
PARA RAIOS 4	9,53	7,00	406,00
PARA RAIOS 5	11,11	9,45	593,00
PARA RAIOS 6	12,70	12,23	769,00
PARA RAIOS 7	15,88	19,23	1209,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 28 – Dados dos estados – vento e temperatura.

ESTADOS	VENTO VB	TEMP. MINIMA	TEMP. MAXIMA	TEMP. MEDIA
AC	24	8	38	24
AL	20	18	36	25
AP	20	20	38	26
AM	26	20	38	26
BA	20	16	36	25
CE	20	18	36	26
DF	26	6	40	24
ES	26	12	38	23
GO	26	6	40	23
MA	22	20	38	26
MT	24	4	40	25
MS	32	0	42	23
MG	18	-2	36	20
PA	20	14	40	26
PB	18	16	36	24
PR	36	-4	36	16
PE	22	16	36	23
PI	20	18	36	26
RJ	30	8	40	22
RN	20	16	36	26
RS	30	-4	36	18
RO	24	6	40	24
RR	22	18	38	26
SC	32	-4	36	15
SP	26	4	38	21
SE	16	16	38	23
TO	20	10	42	25

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 29 – Coeficientes para o tipo de terreno.

COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DO TERRENO					
CATEGORIA	CARACTERISTICA DO TERRENO	KR	KD	n p/t30s	Kh
A	VASTAS EXTENSÕES DE ÁGUA; ÁREAS PLANAS COSTEIRAS; DESERTOS PLANOS	1,08	1,15	12	1,06
B	TERRENO ABERTO COM POUCOS OBSTACULOS	1,00	1,2	11	1,07
C	TERRENO COM OBSTACULOS NUMEROSOS E PEQUENOS	0,85	1,3	9,5	1,08
D	ÁREAS URBANIZADAS; TERRENOS COM MUITAS ÁRVORES ALTAS	0,67	1,45	8	1,09

Fonte: Produção do próprio autor.

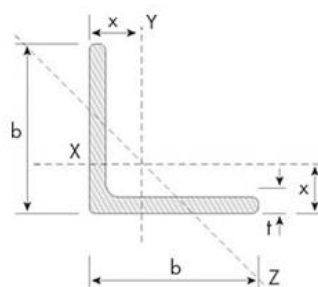
Tabela 30 – Fatores de correção k para os tipos de terrenos.

FATOR DE EFETIVIDADE DE ALFA			
CATEGORIA	FATOR	VÃO	INTERPOLAÇÃO
A	0,98	200	1,02
	0,84	800	
B	0,92	200	0,96
	0,78	800	
C	0,82	200	0,86
	0,69	800	
D	0,63	200	0,64
	0,60	800	

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 31 – Perfis de cantoneira.

b		Peso Nominal	t		Área	I _x =I _y	W _x =W _y	r _x =r _y	r _z mín.	x	PERFIL
pol	mm		pol	mm							
1.3/4" x 1.3/4" x 3/16"	44,45	3,15	3/16"	4,76	4	7,5	2,3	1,37	0,89	1,3	1
2" x 2" x 1/4"	50,8	4,74	1/4"	6,35	6,06	14,6	4,1	1,55	0,99	1,5	2
2" x 2" x 5/16"	50,8	5,83	5/16"	7,94	7,42	17,5	4,91	1,53	0,99	1,55	3
2" x 2" x 3/8"	50,8	6,99	3/8"	9,52	8,76	20	5,73	1,5	0,99	1,63	4
2.1/2" x 2.1/2" x 3/16"	63,5	4,57	3/16"	4,76	5,8	23	4,91	1,98	1,24	1,75	5
2.1/2" x 2.1/2" x 1/4"	63,5	6,1	1/4"	6,35	7,67	29	6,4	1,96	1,24	1,83	6
2.1/2" x 2.1/2" x 5/16"	63,5	7,44	5/16"	7,94	9,48	35	7,87	1,93	1,24	1,88	7
2.1/2" x 2.1/2" x 3/8"	63,5	8,78	3/8"	9,52	11,16	41	9,35	1,91	1,22	1,93	8
3" x 3" x 3/16"	76,2	5,52	3/16"	4,76	7,03	40	7,21	2,39	1,5	2,08	9
3" x 3" x 1/4"	76,2	7,29	1/4"	6,35	9,29	50	9,5	2,36	1,5	2,13	10
3" x 3" x 5/16"	76,2	9,07	5/16"	7,94	11,48	62	11,6	2,34	1,5	2,21	11
3" x 3" x 3/8"	76,2	10,71	3/8"	9,52	13,61	75	13,6	2,31	1,47	2,26	12
3" x 3" x 1/2"	76,2	14	1/2"	12,7	17,74	91	18	2,29	1,47	2,36	13
3.1/2" x 3.1/2" x 1/4"	88,9	8,56	1/4"	6,35	10,9	83,7	13	2,77	1,76	2,46	14
3.1/2" x 3.1/2" x 5/16"	88,9	10,59	5/16"	7,94	13,5	102	16	2,75	1,75	2,52	15
3.1/2" x 3.1/2" x 3/8"	88,9	12,58	3/8"	9,52	16	121	19,2	2,75	1,75	2,58	16
4" x 9,81	101,6	9,81	1/4"	6,35	12,51	125	16,4	3,17	2	2,77	17
4" x 12,19	101,6	12,19	5/16"	7,94	15,48	154	21,3	3,15	2	2,84	18
4" x 14,57	101,6	14,57	3/8"	9,52	18,45	183	24,6	3,12	2	2,9	19
4" x 16,8	101,6	16,8	7/16"	11,11	21,35	208	29,5	3,12	1,98	2,95	20
4" x 19,03	101,6	19,03	1/2"	12,7	24,19	233	32,8	3,1	1,98	3	21
5" x 12,34	127	12,34	1/4"	6,35	15,73	251,63	27,09	4	2,53	3,41	22
5" x 15,31	127	15,31	5/16"	7,94	19,5	308	33,4	3,97	2,53	3,47	23
5" x 18,3	127	18,3	3/8"	9,52	23,29	362	39,5	3,94	2,51	3,53	24
5" x 23,52	127	23,52	7/16"	11,11	26,96	416,68	45,71	3,93	2,5	3,58	25
5" x 24,1	127	24,1	1/2"	12,7	30,64	470	52,5	3,91	2,49	3,63	26
5" x 29,8	127	29,8	5/8"	15,88	37,8	566	64	3,86	2,46	3,76	27
6" x 22,2	152,4	22,2	3/8"	9,52	28,1	641	57,4	4,78	3,02	4,17	28
6" x 29,2	152,4	29,2	1/2"	12,7	37,09	828	75,4	4,72	3	4,27	29
6" x 36	152,4	36	5/8"	15,88	45,86	1007	93,5	4,67	2,97	4,39	30
6" x 42,7	152,4	42,7	3/4"	19,05	54,44	1173	109,9	4,65	2,97	4,52	31
8" x 48,7	203,2	48,7	5/8"	15,88	62,9	2472,4	168,9	6,31	4,01	5,66	32
8" x 57,9	203,2	57,9	3/4"	19,05	73,81	2901,1	199,9	6,27	3,99	5,79	33



Fonte: Produção do próprio autor.

17. PLANILHA DESLOCABILIDADE

Planilha contendo o cálculo de deslocabilidade de todas as barras para análise de segunda ordem. Somente para consulta.