



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

VICTÓRIA CAROLLAYNE DOS SANTOS CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DIMENSIONAMENTO
ESTRUTURAL DE TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO**

Caraúbas/RN
(2019)

VICTÓRIA CAROLLAYNE DOS SANTOS CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DIMENSIONAMENTO
ESTRUTURAL DE TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Caraúbas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Dênis Costa
Ferreira – UFERSA

Caraúbas/RN
(2019)

VICTÓRIA CAROLLAYNE DOS SANTOS CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DIMENSIONAMENTO
ESTRUTURAL DE TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Caraúbas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 13 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

[REDACTED]

Manoel Denis Costa Ferreira, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

[REDACTED]

Carlos Vinícius Damaceno Bessa, Prof. (UFERSA)
Primeiro Membro

[REDACTED]

(UFERSA)

Francisca Ires Vieira de Melo, Prof. (UFERSA)
Segundo Membro

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

257d DOS SANTOS CARVALHO, VICTÓRIA CAROLLAYNE.
 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA
 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE TORRES DE LINHA DE
 TRANSMISSÃO / VICTÓRIA CAROLLAYNE DOS SANTOS
 CARVALHO. - 2019.
 57 f. : il.

 Orientador: MANOEL DENIS COSTA FERREIRA.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
 2019.

 1. Torre de linha de transmissão. 2. Ação do
 vento. 3. Estrutura. I. COSTA FERREIRA, MANOEL
 DENIS, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

RESUMO

O gradual crescimento do setor elétrico vem demandando cada vez mais uma alta qualidade na construção de linhas de transmissão, para que estas transportem a energia da fonte de produção até a população receptora sem que ocorram falhas ou interrupções durante o transporte, as torres de linhas de transmissão são estruturas robustas que auxiliam nesta condução. Para um correto dimensionamento destas estruturas deve-se levar em consideração diversos fatores, como, o peso próprio da estrutura; peso dos cabos condutores; ações do vento e ações excepcionais. Dentre estas a mais importante é a ação do vento, pois é a que exerce uma maior interferência no dimensionamento. Neste trabalho foi implementado um módulo de análise de torre de linha de transmissão no SAnE – *Software* para Análise Estrutural, buscando aumentar a eficiência na obtenção de resultados no dimensionamento deste tipo de estrutura. Para a validação deste trabalho foram comparados resultados obtidos com o dimensionamento no SAnE com outros previamente já atestados, onde foi evidenciada a eficácia do *software*.

Palavras-chave: Torre de linha de transmissão. Ação do vento. Estrutura.

ABSTRACT

The gradual growth of the electricity sector is increasingly demanding a high quality in the construction of transmission lines, that lead the energy from the source to the receiving population without failures or interruptions during transportation. Towers of transmission line are sturdy structures that assist in this driving of energy. In this sense, for the correct sizing of these structures, several factors must be taken into account, such as the structure's own weight; weight of conductor cables; wind actions and exceptional actions. Among these steps the most important is wind action, because exerts it has the greatest interference in the design. In this work, was implemented a transmission line tower analysis module was implemented in SAnE - Structural Analysis Software, aiming to increase the efficiency in obtaining results in the sizing of this type of structure. To validate this work, the results obtained with the design in SAnE were compared with others previously attested, where the effectiveness of the software was evidenced.

Keywords: Transmission line tower. Wind action. Structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura em elementos de aço.....	4
Figura 2 - Ponte treliçada.	6
Figura 3 - Tesoura de casa.....	6
Figura 4 - Treliza plana.....	6
Figura 5 – Treliza espacial.....	6
Figura 6 - Elementos de um sistema de linha de transmissão.	7
Figura 7 - Estrutura LT tipo poste.	8
Figura 8 - Estrutura LT treliçada.	8
Figura 9 - Mapa brasileiro das isopleias.	11
Figura 10 - Representação do Talude pela NBR 6123/1988.	13
Figura 11 - Representação de Morro pela NBR 6123/1988.	13
Figura 12 - Parâmetros Meteorológicos.	15
Figura 13 - Fator S2.	15
Figura 14 - Valores mínimos do fator s2.....	16
Figura 15 - Endenação de código.....	18
Figura 16 - Programação Estruturada e Programação Orientada a Objetos.	19
Figura 17 - Exemplo de concatenação.	20
Figura 18 - Tela inicial software SAnE.....	21
Figura 19 – Criando projeto em branco.	22
Figura 20 - Adicionando materiais.	22
Figura 21 - Adicionando as seções.	22
Figura 22 - Adicionando os nós.	22
Figura 23 - Adicionando as barras.....	23
Figura 24 - Adicionando as vinculações.	23
Figura 25 - Adicionando as forças.	23
Figura 26 - Executando o problema.	23
Figura 27 - Tela de escolhas modelos parametrizados.	23
Figura 28 - Tela de parâmetros treliça Howe.....	24
Figura 29 - Modelo parametrizado.....	24
Figura 30 - Heranças do código implementado.	25
Figura 31 - Tela de escolha, botão torre base quadrada.	26
Figura 32 - Dados da geometria.	26
Figura 33 - Elementos de uma treliça.	27
Figura 34 - Áreas da torre.....	27
Figura 35 - Velocidade básica do vento.	28
Figura 36 - Fator topográfico.	28
Figura 37 - Fator de rugosidade.	29
Figura 38 - Classe da edificação.	29
Figura 39 - Fator estatístico.....	30
Figura 40 – Cabo condutor.	30
Figura 41 - Estrutura gerada.....	31
Figura 42 – Dados de cada módulo do relatório final.	32
Figura 43 - Forças aplicadas nos nós.....	32
Figura 44 - Verificação a compressão.	32

Figura 45 - Verificação a tração.....	32
Figura 46 - Modelagem desenvolvida por Silvério 2019.....	33
Figura 47 - Entrada de dados na aba GEOMETRIA teste 1.....	34
Figura 48 - Modelagem de SILVERIO.....	35
Figura 49 - Modelagem no SAnE.....	35
Figura 50 – Dados de cálculo módulo 0 SILVERIO 2019.....	35
Figura 51 – Dados de cálculo módulo 0 SAnE.....	35
Figura 52 - Distribuição de forças no módulo 0 SILVERIO 2019.....	36
Figura 53 - Distribuição de forças no módulo 0 SAnE.....	36
Figura 54 - Dimensionamento barra 1 SILVERIO 2019.....	36
Figura 55 - Dimensionamento barra 1 SAnE.....	36
Figura 56 - Dimensionamento barra 2 SILVERIO 2019.....	36
Figura 57 - Dimensionamento barra 2 SAnE.....	36
Figura 58 - Criando projeto (Modelo Parametrizado).	37
Figura 59 - Tela de escolhas modelo LT quadrada.	37
Figura 60 - Aba GEOMETRIA teste 2.....	38
Figura 61 - Aba SEÇÕES teste 2.	39
Figura 62 - Aba v0 teste 2.	39
Figura 63 - Aba s1 teste 2.	40
Figura 64 - Aba s2 teste 2.	40
Figura 65 - Aba Classe teste 2.	40
Figura 66 - Aba s3 teste 2.	41
Figura 67 - Valores referentes a utilização do cabo.	41
Figura 68 - Aba CABO teste 2.....	41
Figura 69 - Modelo teste 2.....	42
Figura 70 - Dados de cálculo módulo 0 teste 2.	42
Figura 71 – Distribuição de forças no módulo 0 teste 2.....	42
Figura 72 – Barra da base submetida a tração teste 2.....	43
Figura 73 – Barra da base submetida a compressão teste 2.	43
Figura 74 - Barra do braço submetida a tração teste 2.	43
Figura 75 - Barra do braço submetida a compressão teste 2.....	43

LISTA DE ABREVIações

LT – Linha de transmissão.

POO – Programação Orientada a Objetos.

SAnE – Software para Análise Estrutural.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivos gerais.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. ESTRUTURAS EM AÇO	4
2.1.1. Treliças	5
2.2. ESTRUTURAS DE LINHA DE TRANSMISSÃO	7
2.2.1. Ações em estruturas de linha de transmissão.....	9
2.2.2. Dimensionamento de estruturas de LT	10
2.2.2.1. Ações permanentes.....	10
2.2.2.2. Ações variáveis	10
2.2.2.3. Ações excepcionais.....	16
2.2.2.4. Dimensionamento a Tração	16
2.2.2.5. Dimensionamento a compressão	17
2.3. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON.....	17
2.3.1. Sintaxe.....	18
2.3.2. Programação Orientada a Objetos – POO.....	18
2.3.2.1. Variáveis.....	19
2.3.2.2. Operações matemáticas.....	19
2.3.2.3. Classe	20
2.3.2.4. Herança.....	20
2.4. SOFTWARE SANE	20
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	25
3.1. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	25
3.1.1. Catálogo de escolhas.....	25
3.1.2. Tela de parâmetros.....	26

4. TESTES E APLICAÇÕES	33
4.1. TESTE 1	33
4.2. TESTE 2	37
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor elétrico brasileiro vem exibindo um crescimento gradual no decorrer dos últimos anos. Sua principal forma de produção de energia se dá através das usinas hidroelétricas, porém, estas, não se situam próximas aos centros urbanos. Desse modo, cresce a necessidade de uma infraestrutura que possa transmitir a energia produzida pelas usinas geradoras até o consumidor final.

Nesse sentido, para implementação prática dessas infraestruturas, devem ser levados em consideração aspectos geográficos como relevo e características hidrográficas, considerados obstáculos na implantação entre outras características.

As linhas de transmissão (LT's) são consideradas como um destes elementos transmissores. O dimensionamento de uma torre de uma LT não é um processo simples no Brasil devido a inexistência de norma específica para este processo. Portanto, é de grande valia para simplificação da implementação desses elementos estruturais o desenvolvimento de um *software* interativo que possa amenizar este trabalho, que por sua vez, torna-se dispendioso e demorado caso não possua nenhum tipo de ferramenta auxiliar nesse processo.

Devido a inexistência de uma norma específica para o dimensionamento estrutural de torres treliçadas em LT, esse procedimento deve ser baseado na NBR 8800/2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Em especial, a avaliação da carga variável exercida pela força do vento deverá analisada de acordo com a ABNT NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações, salientando a dispensa da avaliação de abalos sísmicos devido a mínima ocorrência deste tipo de evento no Brasil.

Assim, para elaboração lógica desse sistema de dimensionamento é necessária a utilização de uma linguagem de programação orientada a objetos (POO). Com a utilização dessa, torna-se possível, com uma maior facilidade, o desenvolvimento desta ferramenta. A linguagem de programação Python, além de ser uma POO, é considerada de baixíssimo nível. Portanto, é muito utilizada por engenheiros e físicos, tornando-se assim mais atrativa para o desenvolvimento da plataforma elaborada por essa pesquisa.

1.2. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

É evidente o diário crescimento da demanda por energia elétrica em todo o país, deste modo aumenta-se a necessidade de aprimorar estudos específicos em relação as linhas de transmissão. Muitas falhas podem interromper a transmissão de energia por este veículo, dentre elas o colapso de torres compõe as principais, o que encadeia um grande prejuízo, desde as companhias de energia elétrica até os consumidores finais (CARLOS, 2015).

De acordo com Amador (2007), o problema de vibração excessiva causada pela ação do vento nas torres de linha de transmissão possui alto nível de gravidade, o que pode levar a interrupções graves no fornecimento de energia ocasionando *blackouts* por tempo indeterminado, originando graves problemas para as fornecedoras.

Um dimensionamento incorreto de uma torre de LT pode chegar a causar colapso na estrutura. A queda de uma torre não decorre apenas prejuízo no lucro em si devido a parada de fornecimento energético, ocasiona diversos outros prejuízos, como, despesa na construção de uma nova estrutura e mão de obra para a execução, perda repentina de fornecimento de energia para os consumidores, que acarreta prejuízos em queima de equipamentos, levando a pedidos de indenizações, entre outros problemas.

A necessidade de transportar a energia elétrica de forma eficiente, segura e econômica, sem que seja um processo dispendioso torna a utilização de softwares indispensável, tendo em vista o ganho de tempo e a redução no esforço necessário para este dimensionamento sem utilizar uma plataforma especializada. O dimensionamento de torres de linhas de transmissão não possui uma norma específica para dimensionamento o que dificulta este processo ainda mais, contudo, existem diversas empresas internacionais que utilizam outros métodos e procedimentos para a resolução deste problema.

Com o desenvolvimento deste projeto será possível obter o dimensionamento, considerando todas as forças atuantes em uma estrutura de linha de transmissão, como a força do vento, bem como o modelo da estrutura projetada tridimensionalmente, o que facilitará o entendimento e visualização dos elementos produzidos. Deve-se ressaltar que os resultados obtidos por tal ferramenta não dispensam uma análise refinada de um profissional competente. O que leva a

perceber que a utilização deste *software* deve ser feita por profissionais capacitados, atentando-se aos resultados obtidos e analisando-os.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos gerais

Desenvolver um *software* utilizando a linguagem de programação Python para o dimensionamento de estruturas treliçadas em torres de linha de transmissão.

1.3.2. Objetivos específicos

- Compreender estruturas treliçadas bem como sua transmissão de esforços;
- Analisar perfis metálicos utilizados em construções de torres treliçadas bem como sua resistência por área de aço e comprimento efetivo sob efeito de ações de flexão e esforços axiais;
- Desenvolver um *software* computacional na linguagem de programação Python em sua versão 3.4 e utilizando o programa para desenvolvimento Eclipse;
- Elaborar uma plataforma visual para receber como dado de saída um modelo tridimensional e o relatório de dimensionamento, utilizando o programa auxiliar QtDesigner;
- Confrontar os resultados obtidos pela plataforma com outros já atestados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ESTRUTURAS EM AÇO

Segundo Pfeil (2009) o primeiro material a ser utilizado na construção foi o ferro fundido, devido trabalhar bem a compressão e possuir um preço acessível quando comparado ao aço, pois o preço para a fabricação do aço era muito elevado. Porém em 1856 o inglês Henry Bessemer inventou um forno que permitiu a produção deste material em larga escala, onde se iniciou a vasta utilização do aço na construção civil.

Após a utilização deste material tornar-se mais acessível ficou comum encontrar o emprego do aço em grandes estruturas como pontes, edifícios, torres entre outras. Esta substituição do concreto pelo aço se dá devido a grandes vantagens que o aço possui, como: aliviar cargas das fundações por possuírem um peso próprio baixo; flexibilidade no projeto arquitetônico; curto prazo de execução; diversidade de tipos, formatos e tamanhos de peças, por se tratar de um produto industrializado; limpeza na obra. A figura 1 exibe uma construção com elementos em aço.

Figura 1 - Estrutura em elementos de aço.



Fonte: Página, PETROPAGES.

O dimensionamento de estruturas de aço baseia-se de acordo com a NBR 8800/2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Esta norma decorre seu dimensionamento verificando a segurança da estrutura de acordo com seu estado de limite, que definirá o estado limitante de uso da estrutura, podendo estar entre estado de limite último (ELU) que é quando a estrutura já não pode mais ser utilizada pois sua capacidade resistente se tornou inferior a solicitada, ou estado de limite de serviço (ELS) que está relacionado ao conforto dos usuários porém a estrutura está em condições utilizáveis.

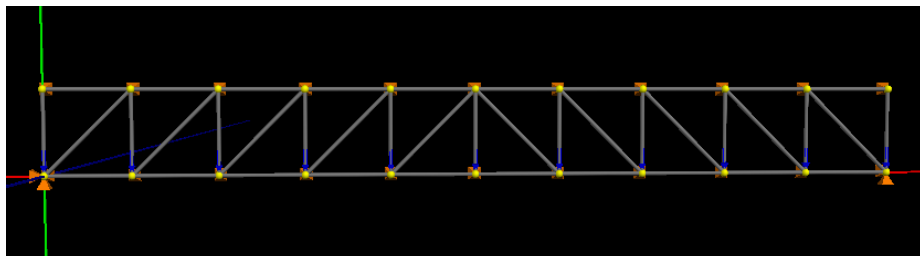
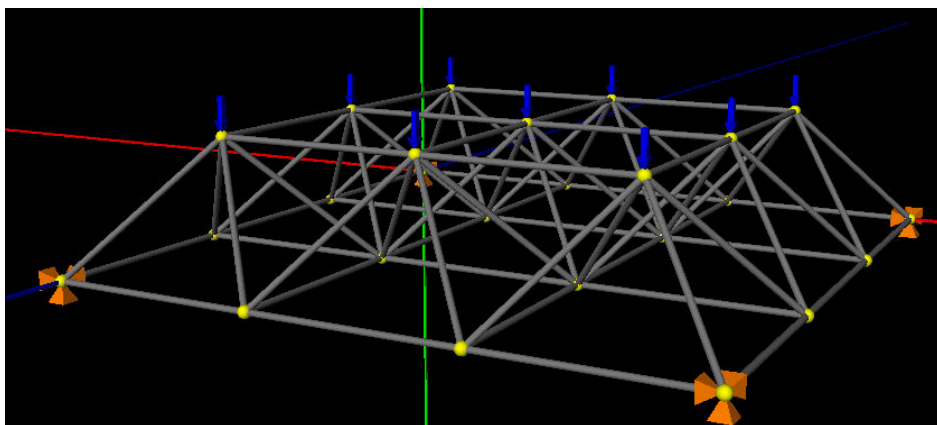
As cargas consideradas em estruturas de aço se subdividem em permanentes, variáveis e excepcionais. As cargas permanentes são aquelas que não se alteram com o tempo, constituídas pelo peso próprio da estrutura os pesos dos equipamentos fixos e os empuxos devidos ao peso próprio de terras não removíveis e de outras ações permanentes sobre elas aplicadas. As ações permanentes indiretas a protensão, e os recalques de apoio e a retração dos materiais. As ações variáveis serão as que apresentam variações significativas de acordo com a vida útil da estrutura, como a ação do vento que deverá ser determinada de acordo com a ABNT NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações, entre outras especificadas pela norma ABNT NBR 8681/2003 p.3 como efeitos, de forças de frenação, de impacto e centrífugas, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Já as ações excepcionais são as com duração extremamente curtas com probabilidade muito baixa de ocorrência, mas que devem ser consideradas, como explosões, choques de veículos e incêndios.

2.1.1. Treliças

Segundo Hibbler 2010, uma treliça pode ser definida por um conjunto de elementos delgados, ligados entre si por nós rotulados em suas extremidades. Este tipo de sistema é utilizado em inúmeros tipos de obras, tanto nas de alta complexidade quanto em construções mais simples, por exemplo, construção de pontes treliçadas e utilização de tesouras em pequenas casas como as figuras 2 e 3 exibem.

Figura 2 - Ponte treliçada.**Fonte:** Página, MAUA.**Figura 3 - Tesoura de casa.****Fonte:** Página, AEC.

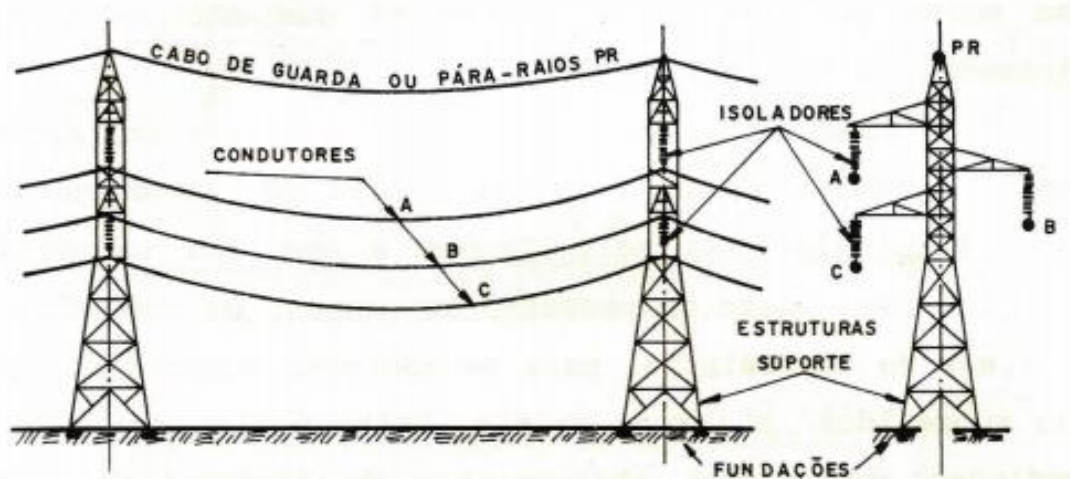
Este tipo de estrutura pode ser classificado em duas formas, sendo treliças planas, que são estruturas existentes basicamente em um plano, ou treliças tridimensionais (espaciais) que por sua vez estarão dispostas nos três eixos cartesianos formando uma estrutura estável. As figuras 4 e 5 exibem os dois tipos de classificação.

Figura 4 - Treliça plana.**Fonte:** O autor (2019).**Figura 5 – Treliça espacial.****Fonte:** O autor (2019).

2.2. ESTRUTURAS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

De acordo com Brazeiro (2015), os suportes das LT's têm como função fornecer sustentação aos cabos condutores e para-raios transmitindo os esforços para a fundação. Os principais elementos constituintes de uma LT podem ser descritos por: estrutura de suporte; cadeia de isoladores; fundações; cabos condutores de energia; cabos para-raios e aterramentos; cabos de estais; ferragens e acessórios. A figura 6 exibe o sistema de LT nomeando cada elemento.

Figura 6 - Elementos de um sistema de linha de transmissão.



Fonte: Labegalini et al 1992.

As estruturas devem manter distancias umas das outras de acordo com seu nível de tensão. Quando o nível de tensão for de até 138 kV o suporte mais usual é o tipo poste, a figura 7 exibe uma estrutura de linha de transmissão tipo poste em concreto. Quando as tensões forem superiores a 138 kV utiliza-se o suporte tipo torre, constituída por treliças metálicas, permitindo que a estrutura possua um menor peso próprio e uma maior altura quando comparada as torres tipo poste. A figura 8 mostra uma LT com torre treliçada.

Figura 7 - Estrutura LT tipo poste.

Fonte: Página, ITAPOSTES.

Figura 8 - Estrutura LT treliçada.

Fonte: Página, ITAPOSTES.

Uma das principais diferenças das estruturas de torres de LT's está entre a forma de sustentação, se é estaiada, ou autoportante. Estruturas autoportantes transmitem os esforços diretamente de seus montantes para as fundações. Já as torres autoportantes utilizam cabos de estais protendidos ou pré-tensionados, onde cada estai possui uma fundação própria, o que acaba dividindo a carga entre os cabos e os montantes.

A maior desvantagem na utilização de torres estaiadas é a área de instalação dos estais e a necessidade de uma topografia adequada para a locação da torre, porém uma vantagem é a diminuição do consumo de aço.

As estruturas de LT também podem ser classificadas de acordo com sua resistência aos esforços, podendo ser: rígidas quando não apresentam deformações elásticas perceptíveis mesmo que submetidas a grandes solicitações; flexíveis em que ao se submeterem a grandes solicitações possuem uma pequena deformação elástica que ao fim da solicitação desaparecem; semirrígidas, onde possuem em uma das dimensões uma rigidez elevada, por exemplo estruturas contraventadas.

De acordo com Labegalini (1992 apud BRAZEIRO, 2015), para a escolha adequada do tipo, configuração e dimensões de uma estrutura de LT deve se atentar basicamente para as seguintes variáveis:

- Vão livre a ser vencido;
- Altura de segurança necessária;
- Modo de disposição dos cabos condutores;
- Distância entre os condutores e flechas;
- Material da estrutura;
- Valor da tensão elétrica (kV);
- Número, tipo e bitola dos cabos condutores;
- Número e tipo dos isoladores;
- Número de circuitos;
- Modo necessário de resistir aos esforços;
- Condições do terreno;
- Entre outros.

2.2.1. Ações em estruturas de linha de transmissão

As ações em que torres de LT's são submetidas se subdividem em três, permanentes, variáveis e excepcionais.

As ações permanentes de acordo com a ABNT NBR 8681/2003, são compostas por todas as solicitações que não variam no decorrer do tempo, como o peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos permanente, os pesos dos equipamentos fixos e os empuxos devidos ao peso próprio de terras não removíveis e de outras ações permanentes sobre elas aplicadas. O documento SDT-240-410-600/1997 recomenda considerar o peso próprio dos equipamentos e das antenas que compõe o sistema de transmissão sobre a estrutura da torre treliçada.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 8681/2003 p.3, as ações variáveis serão as que apresentam variações significativas de acordo com a vida útil da estrutura, como a ação do vento que deverá ser determinada de acordo com a ABNT NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações, entre outras especificadas pela norma ABNT NBR 8681/2003 p.3, como efeitos, de forças de frenação, de impacto e centrífugas, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. A NBR 8681/2003 subdivide esta categoria em variáveis normais, que possuem alta probabilidade de ocorrência devendo ser obrigatoriamente consideradas em projeto, e as ações variáveis especiais, que podem ser ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou de intensidade especiais, elas também devem ser admitidas como ações variáveis.

De acordo com o Documento SDT-240-410-600/1997 é recomendado que para torres autoportantes e postes auto suportados, seja considerado que o peso do pessoal de manutenção de 4 operários com média de peso de 70 kg e o peso do equipamento auxiliares para manutenção e instalação de antenas de 150 kg.

Por fim existem as ações excepcionais que a ABNT NBR 8681/2003 p.3 considera como sendo as que apresentam baixa probabilidade de ocorrência durante a vida útil da estrutura, mas devem ser consideradas, como as ações decorrentes de causas tais como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais. Sua utilização no dimensionamento é variável de acordo com a localização do projeto.

2.2.2. Dimensionamento de estruturas de LT

O dimensionamento das estruturas de LT deve ser de acordo com as seguintes normas: ABNT NBR 8681/2003 – Ações e segurança nas estruturas.; NBR 8800/2008 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.; NBR 6123/1988 – Forças devidas ao vento em edificações.

2.2.2.1. Ações permanentes

Em torres de LT além das cargas permanentes do peso próprio deve-se considerar a atuação dos cabos condutores também como cargas permanentes, onde essa força exercida pode ser denominada por uma carga horizontal, na direção longitudinal a torre, que será aplicada no braço, e uma carga vertical que considera o peso próprio dos cabos e conjunto de isoladores, que podem ser obtidas pelo produto entre o peso linear do cabo e o comprimento do vão.

2.2.2.2. Ações variáveis

Dentre todas as ações exercidas na torre, a de maior preocupação é a ação do vento, denominada por força de arrasto.

Segundo a ABNT NBR 6123/1988 p.5 a componente da força global na direção do vento, força de arrasto (F_a) é obtida por:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (1)$$

Onde:

C_a : É o coeficiente de arrasto;

q : É a pressão dinâmica do vento ($\frac{N}{m^2}$);

A_e : É a área frontal efetiva;

A pressão dinâmica do vento (q) é correspondente a força gerada pela velocidade característica (V_k), em condições normais de pressão (1 atm = 1013,2 Mbar = 101320 Pa) e de temperatura (15°C). Sendo dada pela expressão matemática indicada na equação (2).

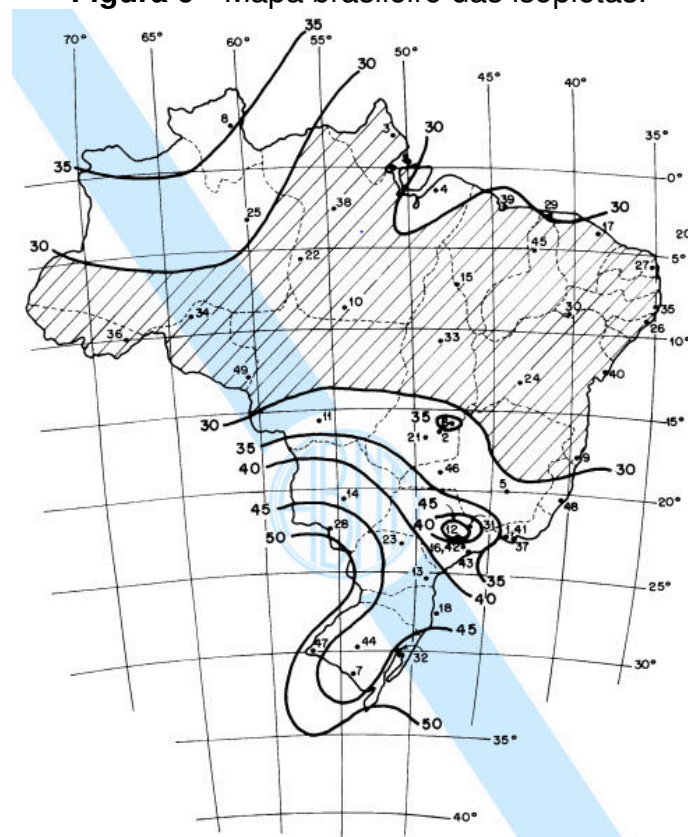
$$q = 0,613 \cdot (V_k)^2 \quad (2)$$

A velocidade característica do vento levará em consideração 3 fatores, S_1 – Fator topográfico, S_2 – Fator de rugosidade do terreno e S_3 – Fator estatístico. O produto destes fatores com a velocidade básica do vento resultará na velocidade característica.

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

A velocidade básica do vento poderá ser obtida pelo mapa das isopletas que será de acordo com a localização da construção da estrutura. A figura a seguir exhibe este mapa com suas devidas velocidades básicas.

Figura 9 - Mapa brasileiro das isopletas.



FONTE: ABNT NBR 6123/1988, p 6.

O fator topográfico (S_1) leva em consideração as variações do relevo do terreno. De acordo com a ABNT NBR 6123/1988 p.5 têm-se duas classificações:

- a. Terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$;
- b. Taludes e morros:
 - Sendo considerados os taludes e morros alongados nos quais pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional soprando no sentido indicado na figura 10;
 - No ponto A (morros) e nos pontos A e C (taludes): $S_1 = 1,0$;
 - No ponto B [S_1 é uma função $S_1(z)$], dada pela equação 4 e 5 descritas a seguir;
 - Para taludes e morros com inclinação de $\theta \leq 3^\circ$:

$$S_1(z) = 1,0$$

- Para Taludes e morros com inclinação entre $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$:

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1,0 \quad (4)$$

- Para Taludes e morros com inclinação $\theta \geq 45^\circ$:

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot 0,31 \geq 1,0 \quad (5)$$

- Para as demais inclinações interpolar linearmente $3^\circ < \theta < 6^\circ < 17^\circ < \theta < 45^\circ$

Onde:

z = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

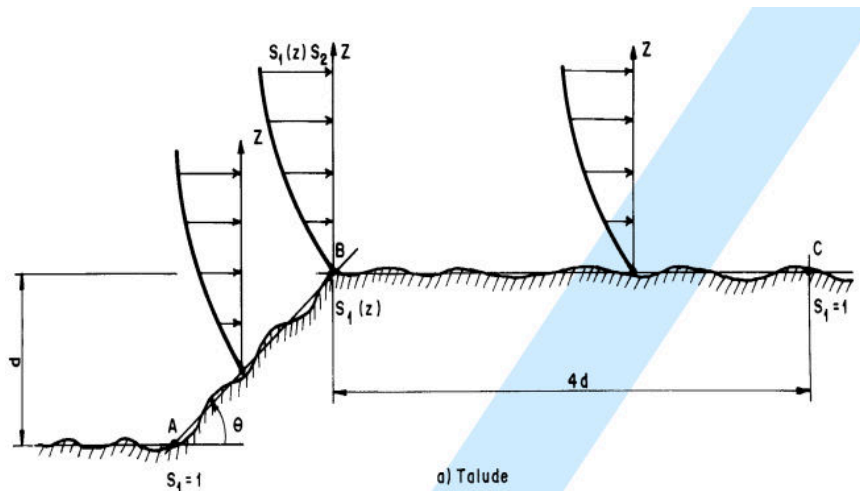
d = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ = inclinação média do talude ou encosta do morro;

- c. Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1 = 0,9$.

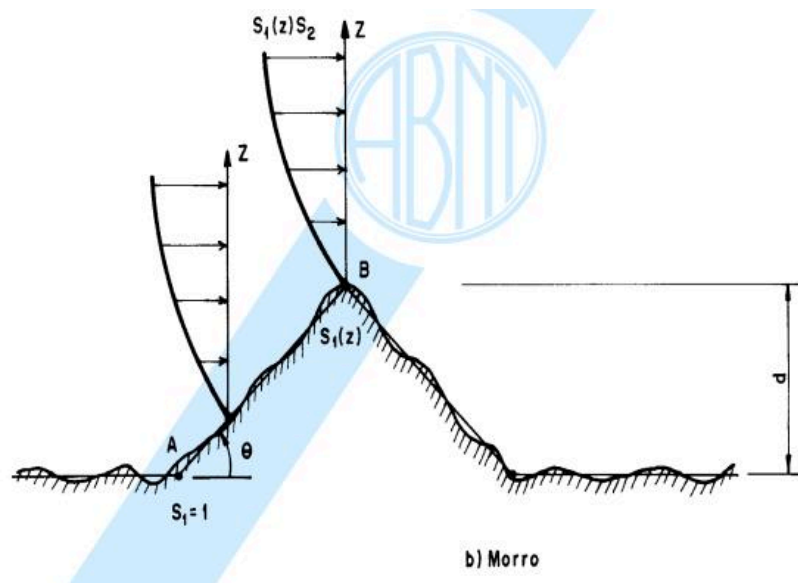
As figuras 10 e 11 exibem as considerações para a entrada de dados no cálculo do fator topográfico.

Figura 10 - Representação do Talude pela NBR 6123/1988.



FONTE: ABNT NBR 6123/1988, p 7.

Figura 11 - Representação de Morro pela NBR 6123/1988.



FONTE: ABNT NBR 6123/1988, p 7.

O fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2) leva em consideração o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração. De acordo com a ABNT NBR 6123/1988 têm-se que verificar as seguintes classificações:

- a. Categoria de Rugosidade do Terreno:

- Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, na direção e sentido do vento incidente. Exemplos: mar calmo, lagos e rios, e pântanos sem vegetação.
- Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos: zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias e charnecas, fazendas sem sebes ou muros.
- Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
- Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizados. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
- Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos: florestas com árvores altas, de copas isoladas, centros de grandes cidades, complexos industriais bem desenvolvidos.

b. Dimensões da Edificação:

- Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.
- Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.
- Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

c. Altura sobre o terreno

O fator S_2 utilizado no cálculo da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido pela fórmula (6) com variáveis relacionada a tabela da figura (12) ou diretamente pela tabela da figura (13).

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (6)$$

Onde:

F_r – É sempre correspondente a categoria II

Figura 12 - Parâmetros Meteorológicos.

Categoria	z_0 (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

FONTE: ABNT NBR 6123/1988, p. 9

Figura 13 - Fator S2.

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

FONTE: ABNT NBR 6123/1988, p. 9

O fator estatístico (S_3) leva em consideração conceitos estatísticos, com relevância no grau de segurança requerido e a vida útil da estrutura. De acordo com a ABNT NBR 6123/1988 os valores estatísticos devem ser no mínimo os exibidos na figura 14.

Figura 14 - Valores mínimos do fator s_2 .

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

FONTE: ABNT NBR 6123/1988, p. 10

2.2.2.3. Ações excepcionais

Devido as ações excepcionais se tratarem de ações devido a abalos sísmicos, terremotos, enchentes, estas serão desconsideradas. Sua ocorrência no Brasil é extremamente baixa inviabilizando a consideração.

2.2.2.4. Dimensionamento a Tração

O dimensionamento a tração irá seguir a ABNT NBR 8800/2008, onde deverão ser consideradas apenas tensões axiais simples.

Segundo a NBR 8800/2008 para o cálculo de barras submetidas a força axial de tração, a equação 7 deverá ser seguida.

$$N_{t,sd} \leq N_{r,Rd} \quad (7)$$

Onde:

$N_{t,sd}$ – Força axial de tração solicitante de cálculo.

$N_{r,Rd}$ – Força axial de tração resistente de cálculo.

Para encontrar a $N_{r,Rd}$ de projeto é necessário que este seja calculado considerando os dois estados de limites últimos de escoamento, da seção bruta de

ruptura (equação 8) e da seção líquida (equação 9), logo deve-se verificar qual deles é o menor valor para que este possa ser utilizado no dimensionamento.

$$N_{r,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (8)$$

$$N_{r,Rd} = \frac{A_e \cdot f_y}{\gamma_{a2}} \quad (9)$$

Onde,

A_g - Área bruta da seção transversal da barra;

A_e - Área líquida efetiva da seção transversal da barra;

γ_{a1} - Coeficiente de minoração do aço estrutural quando trabalhado a tração;

γ_{a2} - Coeficiente de minoração do aço estrutural quando trabalhado a tração.

2.2.2.5. Dimensionamento a compressão

O dimensionamento a tração irá seguir a ABNT NBR 8800/2008, onde, para o cálculo de barras associada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, torção, flexo-torção e flambagem local a equação 10 deverá ser seguida.

$$N_{r,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (9)$$

Onde:

χ - Fator de redução, associado a resistência a compressão.

Q – Fator de redução total, associado a flambagem local.

2.3. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON

São ínfimas as quantidades de linguagens de programações existentes, umas conhecidas por possuírem um baixo nível, configura-se tipos de linguagens mais complexas e difíceis de se programar, bem como existem as de alto nível, possuindo uma maior facilidade de entendimento. A linguagem de programação Python torna-se cada vez mais usual pelo fato de ser uma linguagem de altíssimo nível, ou seja, menos complexa para o entendimento e utilização, deste modo acaba se tornando uma das linguagens mais usuais entre engenheiros, cientistas e físicos.

Além de ser uma linguagem de altíssimo nível Python tem por característica ser uma POO – Programação Orientada a Objetos onde busca representar, de acordo com a lógica dos dados recebidos, objetos físicos ou abstratos.

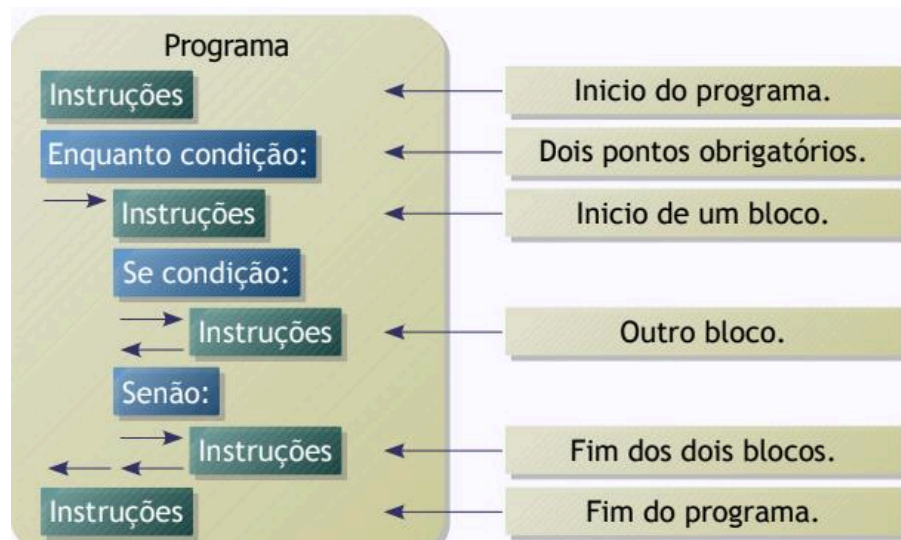
Para o processamento de um código escrito em linguagem de baixo nível deverá acontecer uma conversão deste código para um nível baixo, este processo poderá ser feito através de programas do tipo interpretadores ou compiladores. A linguagem Python é considerada como sendo interpretada, podendo ser por modo de linha de comando ou modo de script (DOWNEY, ELKNER, MEYERS, 2009).

2.3.1. Sintaxe

A linguagem de programação Python é constituída por uma série de recursos que serão lidos e interpretados, seja pelo sistema em execução ou pelo ser humano.

De acordo com Borges (2010) os blocos de código são delimitados por uso de endenação, devendo ser constante no bloco de códigos, sendo indicado manter a consistência durante todo o projeto evitando a mistura de tubulações e espaços.

Figura 15 - Endenação de código.



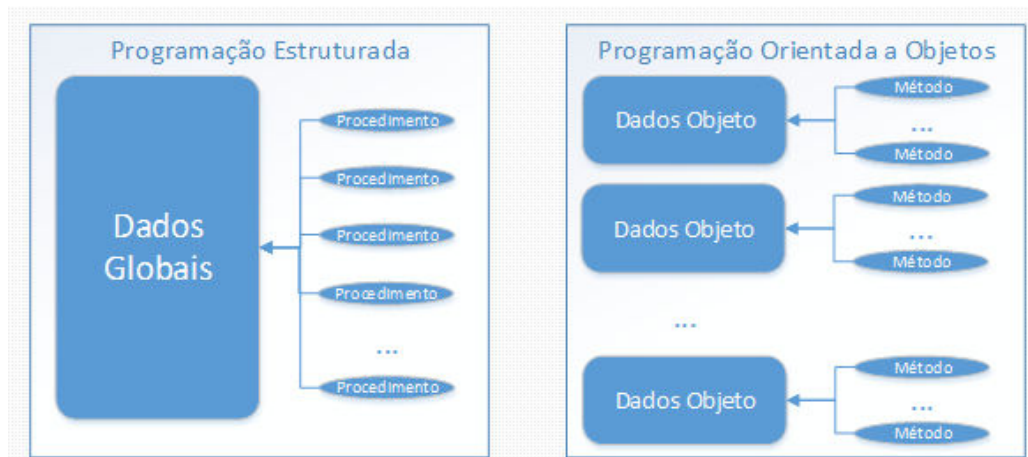
Fonte: DOWNEY, ELKNER, MEYERS, 2009, p.10.

2.3.2. Programação Orientada a Objetos – POO

Os códigos desenvolvidos a alguns anos atrás utilizavam-se do tipo de programação conhecida como estruturada, onde se pressupões que todos os códigos já escritos podem ser reduzidos a três estruturas: sequência, decisão e iteração. Já a

POO baseia-se no princípio de que a composição e interação serão feitas em diversas unidades, denominadas objetos, a figura abaixo demonstra a estrutura das programações estruturada e orientada a objetos.

Figura 16 - Programação Estruturada e Programação Orientada a Objetos.



Fonte: Página DEVMEDIA (2016).

A linguagem Python possui uma linguagem orientada a objetos facilitando com essa linguagem a representação de objetos reais como estruturas treliçadas e barras de aço.

2.3.2.1. Variáveis

Compreende-se por variável um nome que se refere a certo valor. Para se nomear uma variável deve-se iniciar com letra sem acentuação ou sublinhado, em sua sequência não se deve utilizar letras com acentuação podendo serem acentuadas, onde letras maiúsculas e minúsculas são lidas diferentemente.

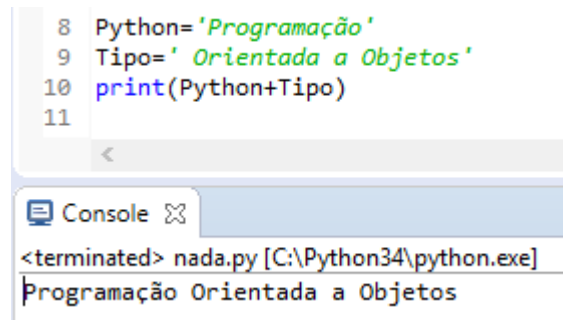
As variáveis podem ser classificadas em três tipos básicos, "int" para números inteiros, "float" para um ponto flutuante e "string" para uma sequência de caracteres. Além destes tipos básicos também existem as que se classificam como coleções, onde as principais são listas, tuplas e dicionário.

2.3.2.2. Operações matemáticas

A linguagem de programação Python possui uma ampla diversidade de operações matemáticas, que irá desde as básicas, como soma e subtração, indo até operações com números complexos.

Não é possível utilizar operações matemáticas com strings , porém o operador “+” possui característica de concatenação, que irá unir os operadores. A figura 17 demonstra um exemplo de concatenação onde a saída será “Programação Orientada a Objetos”.

Figura 17 - Exemplo de concatenação.



```

8 Python='Programação'
9 Tipo=' Orientada a Objetos'
10 print(Python+Tipo)
11

```

Console

<terminated> nada.py [C:\Python34\python.exe]
 Programação Orientada a Objetos

Fonte: O autor (2019).

Observa-se que a string denominada em “Tipo” possui um espaço no início em “ Orientada a Objetos” para que a frase fique escrita de forma correta devido a concatenação unir exatamente as extremidades.

2.3.2.3. Classe

O termo classe é utilizado em Programações Orientadas a Objeto referindo-se a um conjunto de dados que possuem características em comum. As classes são estruturas básicas de uma POO representando o tipo de objeto e o modelo em que os objetos serão criados.

2.3.2.4. Herança

De acordo com Borges (2010) herança é um termo utilizado em POO com este mecanismo será possível reaproveitar códigos já existentes, permitindo que propriedades de classes já existentes (subclasses) sejam herdadas para outras novas.

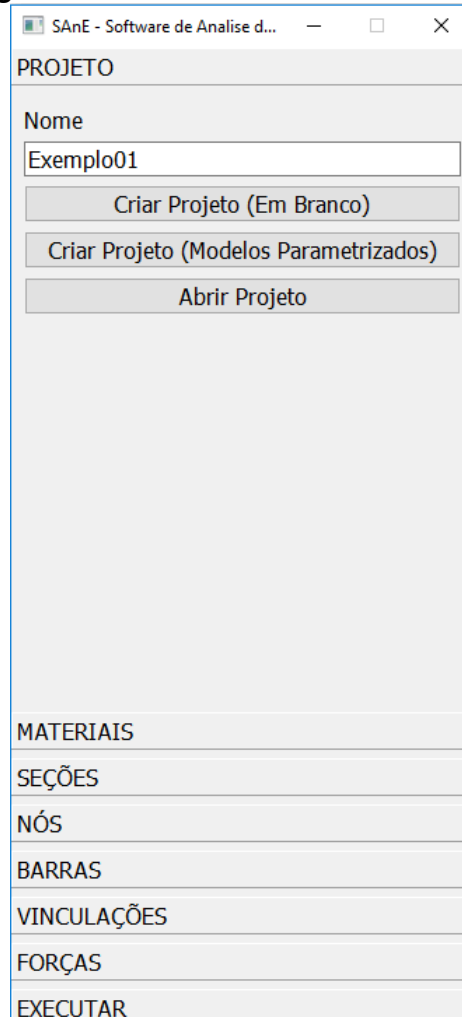
2.4. SOFTWARE SANE

O programa desenvolvido será adicionado no *software* SAnE – *Software* para Análise estrutural. Este, possui o módulo de treliças, onde é possível obter modelos

treliçados de forma manual, ou de forma automática com seus modelos parametrizados.

Sua tela inicial é como a imagem exibida a seguir.

Figura 18 - Tela inicial *software* SAnE.



SAnE - Software de Analise d...

PROJETO

Nome

Exemplo01

Criar Projeto (Em Branco)

Criar Projeto (Modelos Parametrizados)

Abrir Projeto

MATERIAIS

SEÇÕES

NÓS

BARRAS

VINCULAÇÕES

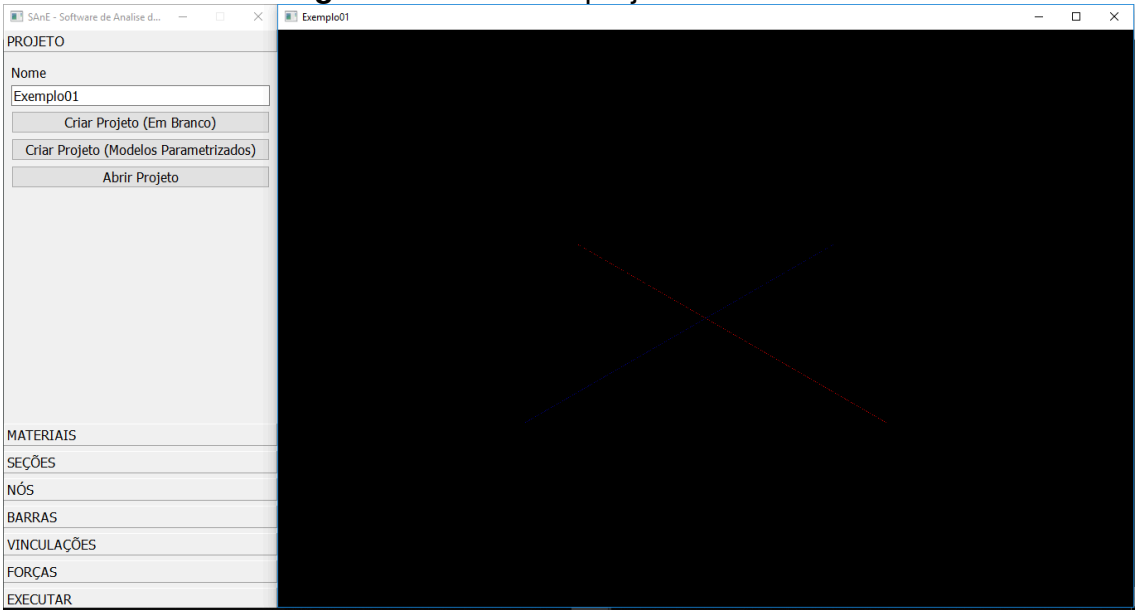
FORÇAS

EXECUTAR

Fonte: O autor (2019).

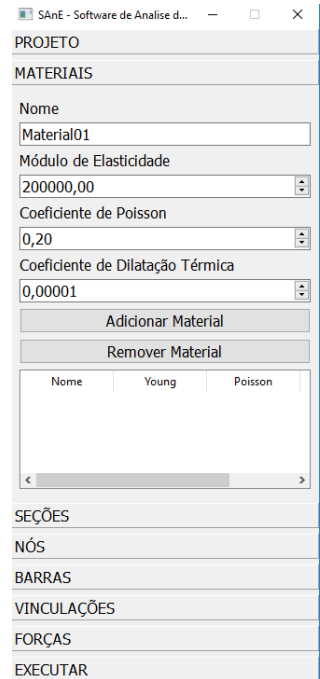
Caso o projetista deseje elaborar seu próprio modelo manualmente este deverá criar um projeto em branco e depois adicionar nó por nó e barra a barra nesta tela inicial, abaixo serão exibidas as telas para geração manual da treliça.

Figura 19 – Criando projeto em branco.



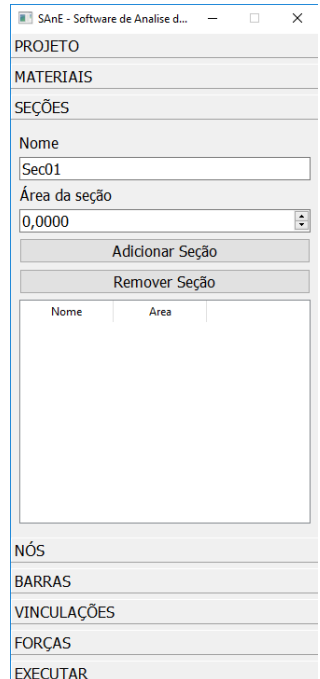
Fonte: O autor (2019).

Figura 20 - Adicionando materiais.



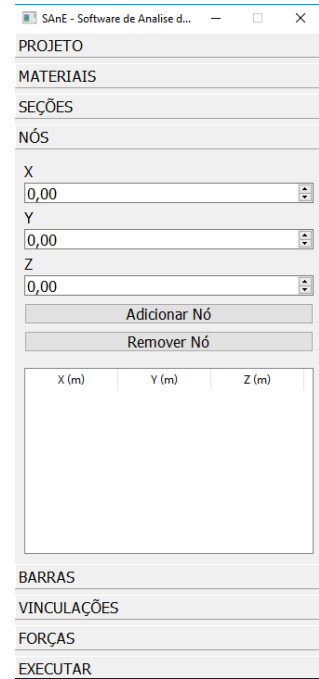
Fonte: O autor (2019).

Figura 21 - Adicionando as seções.



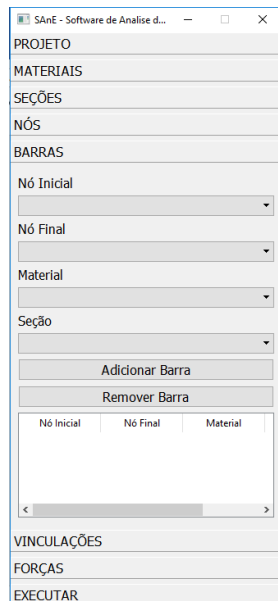
Fonte: O autor (2019).

Figura 22 - Adicionando os nós.



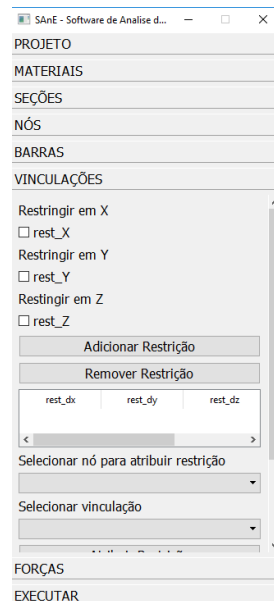
Fonte: O autor (2019).

Figura 23 -
Adicionando as barras.



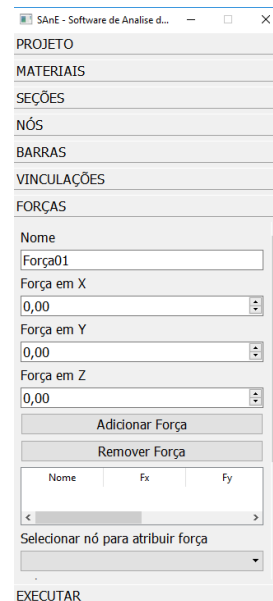
Fonte: O autor (2019).

Figura 24 -
Adicionando as vinculações.



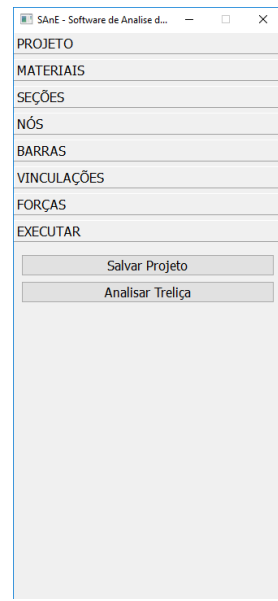
Fonte: O autor (2019).

Figura 25 -
Adicionando as forças.



Fonte: O autor (2019).

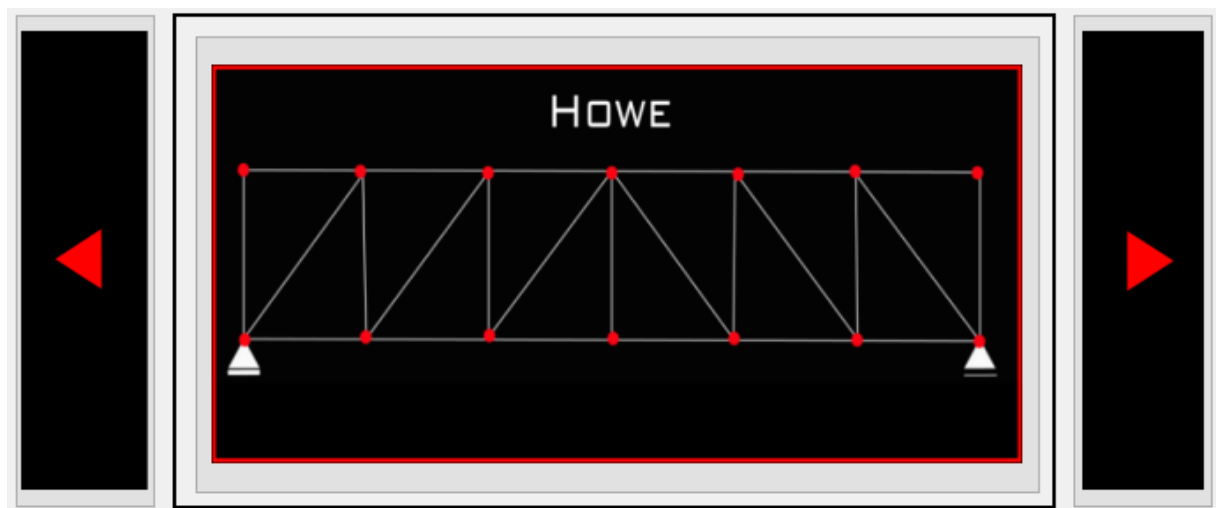
Figura 26 -
Executando o problema.



Fonte: O autor (2019).

Caso o usuário opte por modelos parametrizados irá abrir uma tela de escolhas, como a figura 27 demonstra.

Figura 27 - Tela de escolhas modelos parametrizados.

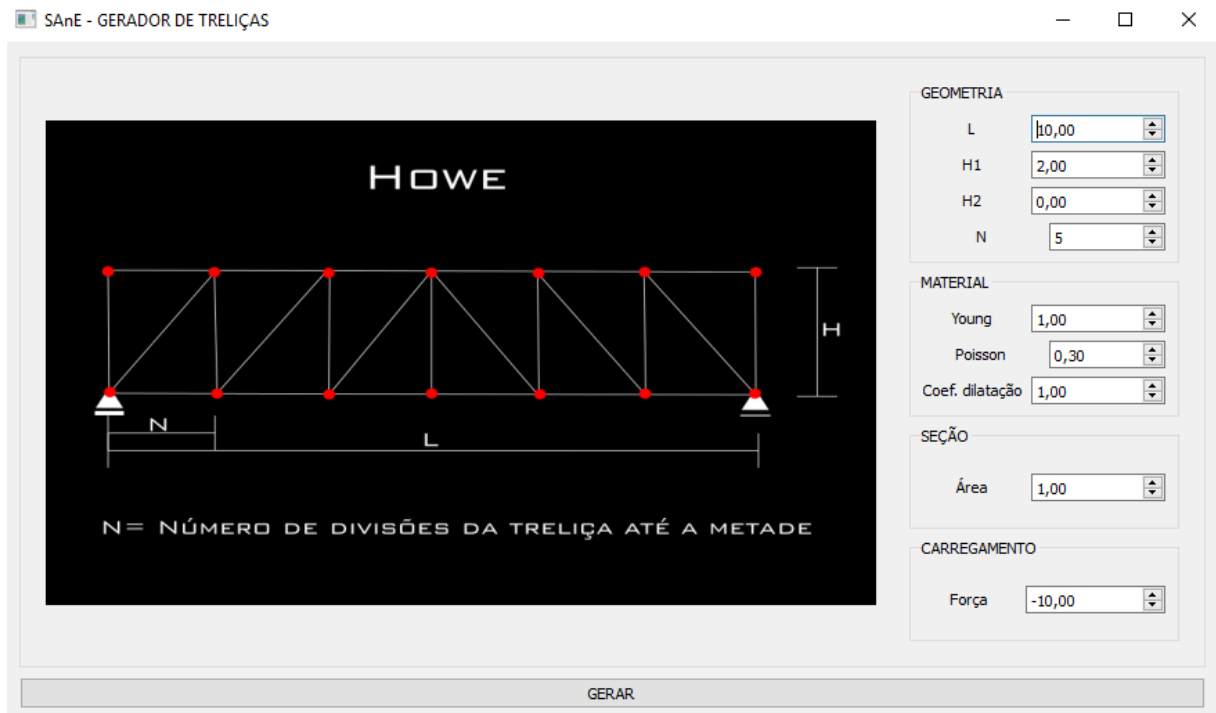


Fonte: O autor (2019).

Onde a própria figura será o botão de escolha do modelo e as setas irão passar ou voltar para os demais modelos. Existem 11 tipos de modelos parametrizados, incluindo treliças do tipo planas e tridimensionais.

Após escolher o modelo abrirá a tela de parâmetros, onde deverá adicionar os parâmetros geométricos bem como a força exercida na treliça (figura28).

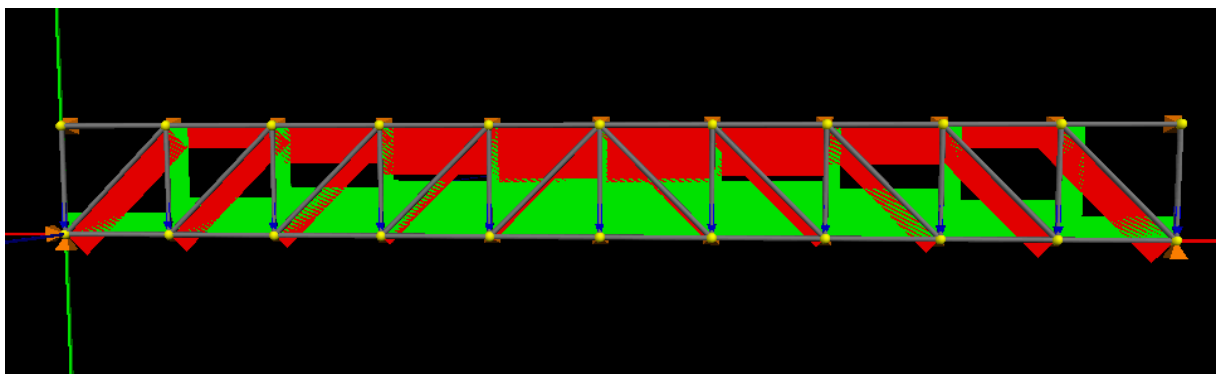
Figura 28 - Tela de parâmetros treliça Howe.



Fonte: O autor (2019).

Logo ao clicar em gerar o modelo será parametrizado e calculado (figura29).

Figura 29 - Modelo parametrizado.



Fonte: O autor (2019).

O programa exibe os eixos x, y, e z em linhas de cores vermelha, verde e azul, respectivamente, as barras submetidas a tração e compressão nas cores vermelho e verde, os locais de aplicação de força exemplificados por uma seta azul bem como suas devidas vinculações.

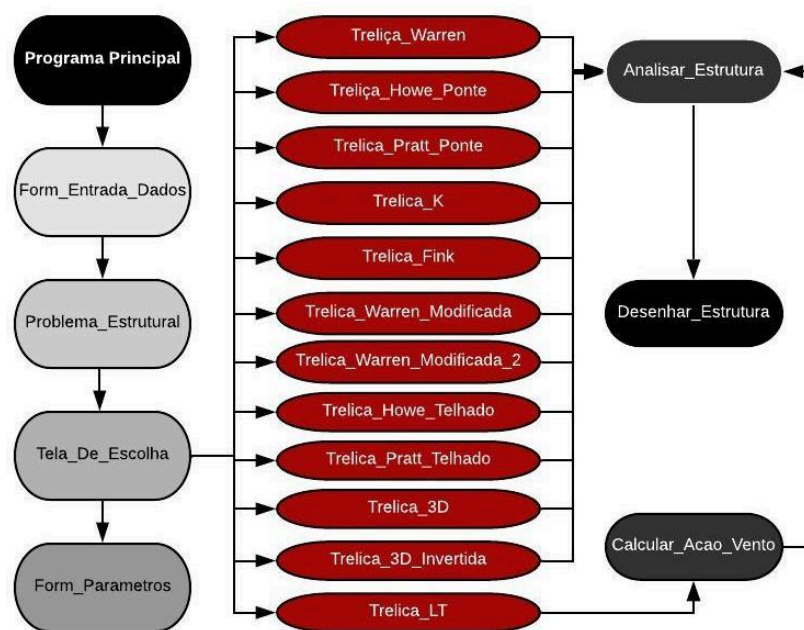
3. METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação gráfica foi elaborada como parte do *software* SAnE – *Software* de Análise Estrutural, adicionando a este o módulo de dimensionamento de torre de LT. Foi utilizada a versão 3.4 da linguagem de programação Python, e o código foi produzido no ambiente de desenvolvimento de programas Eclipse. A etapa de entrada de dados de forma visual e interativa foi elaborada com auxílio da biblioteca PyQt4.

Ao código atual foram adicionados novos códigos que herdaram atributos de outros já existentes. A figura 30 exibe a forma de herança do programa.

Figura 30 - Heranças do código implementado.

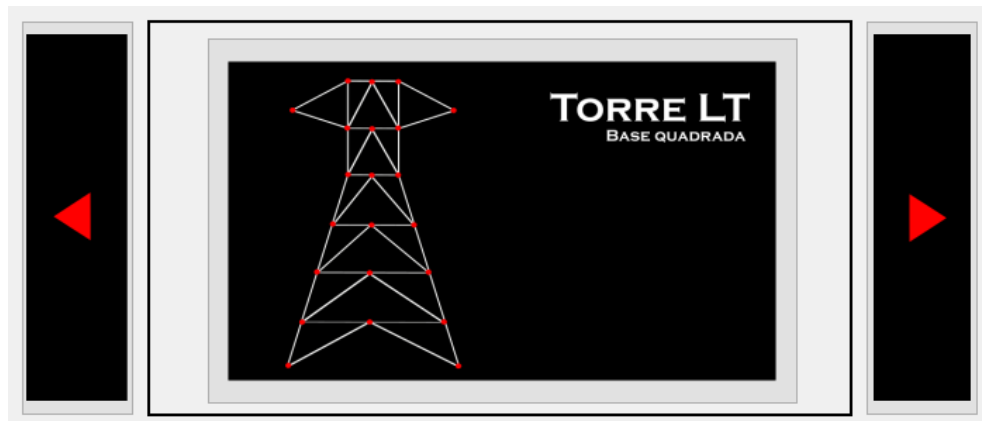


Fonte: O autor (2019).

3.1.1. Catálogo de escolhas

A primeira tela que houve alteração foi a do catálogo de escolhas, em que ganhou um novo botão que representam um tipo de torre de LT de modelo de base quadrada. A escolha do modelo poderá ser feita ao clicar na imagem da torre (figura 31).

Figura 31 - Tela de escolha, botão torre base quadrada.



Fonte: O autor (2019).

3.1.2. Tela de parâmetros

Em decorrência da escolha da tela que possui o modelo de torre, uma nova janela será exibida, a tela de parâmetros, onde todos os parâmetros necessários para a geração do modelo e dimensionamento da torre será exibido.

A primeira página (GEOMETRIA) terá como entrada os dados geométricos, dados do material e ainda poderão ser adicionados braços na torre, de acordo com a preferência do usuário, apenas selecionando os módulos escolhidos no espaço BRAÇOS TOPO, como exibido na figura a baixo.

Figura 32 - Dados da geometria.

GEOMETRIA

LBx: 10,00
 LBy: 10,00
 LTbx: 7,00
 LTby: 7,00
 LTcx: 5,00
 LTcy: 5,00
 Ltopox: 5,00
 Ltopoy: 5,00
 Hb: 5,00
 Hc: 20,00
 Ht: 15,00
 Cb: 5,00
 NMC: 5
 NMT: 5

MATERIAL

Coeef. dilatação: 0,00
 Poisson: 0,30
 Young: 1,00
 Peso específico: 1,00

BRAÇOS TOPO

Esquerda: ☐ 1, ☐ 2, ☐ 3, ☐ 4, ☐ 5, ☐ 6, ☐ 7, ☐ 8, ☐ 9, ☐ 10
 Direita: ☐ 1, ☐ 2, ☐ 3, ☐ 4, ☐ 5, ☐ 6, ☐ 7, ☐ 8, ☐ 9, ☐ 10

Diagramas:

- L TOPO CB
- LTC
- HT
- HC
- HB
- LTB
- LB
- EIXO X
- EIXO Y

Legend:

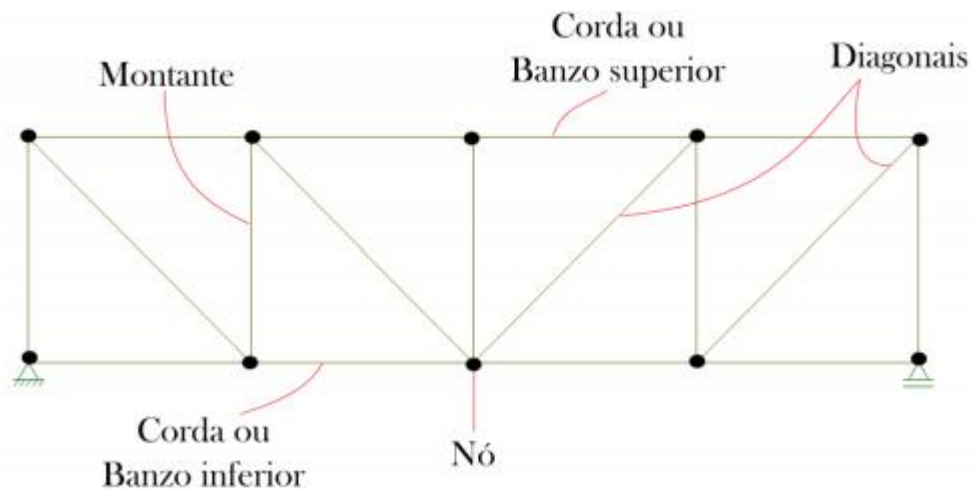
- NMC: NÚMERO DE MÓDULOS NO CORPO
- NMT: NÚMERO DE MÓDULOS NO TOPO

Botão: CALCULAR

Fonte: O autor (2019).

A segunda aba (SEÇÕES) possui seis colunas, duas para os montantes, duas para as diagonais e duas para os banzos, onde será possível adicionar diferentes áreas e diferentes comprimentos (equivalente ao diâmetro) para cada módulo adicionado.

Figura 33 - Elementos de uma treliça.



Fonte: O autor (2017).

O número de espaços para entrada de dados será gerado automaticamente de acordo com a quantidade de módulos que foi adicionado na primeira aba. Como exibido na figura 34.

Figura 34 - Áreas da torre.

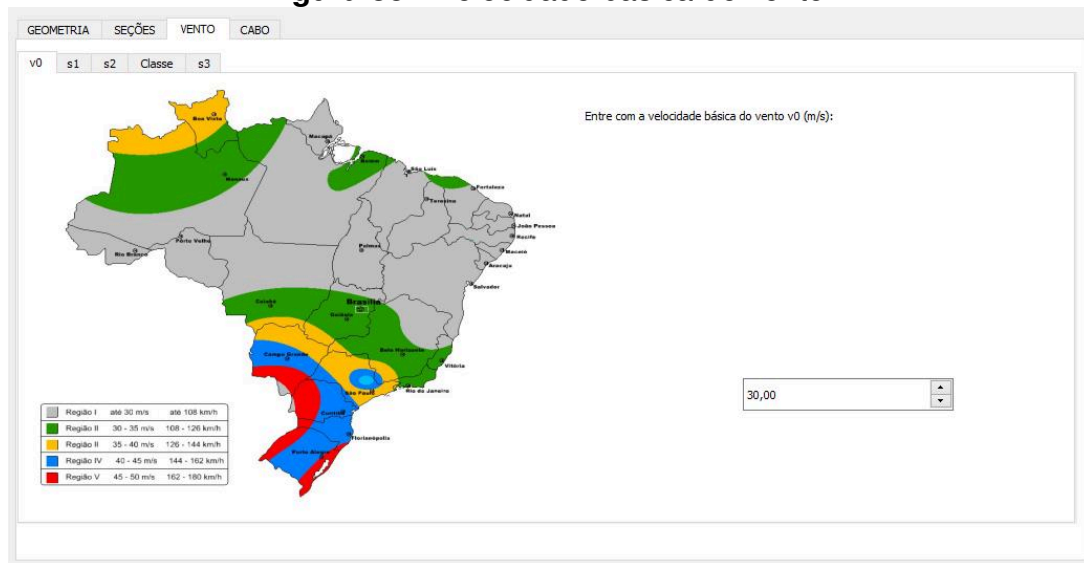
A imagem mostra a interface de um software com a aba 'SEÇÕES' selecionada. A interface está organizada em três painéis principais: 'SEÇÃO MONTANTES (L, Área)', 'SEÇÃO DIAGONAIS (L, Área)' e 'SEÇÃO HORIZONTAIS (L, Área)'. Cada painel contém duas colunas de campos de entrada. A primeira coluna em cada painel é para o comprimento (L) e a segunda é para a área (Área). Os campos de entrada são rotacionados verticalmente e todos os valores exibidos são '0,10' para o comprimento e '0,01000000' para a área. No topo da interface, há uma barra de navegação com as abas 'GEOMETRIA', 'SEÇÕES', 'VENTO' e 'CABO'.

Fonte: O autor (2019).

A terceira aba (VENTO) irá receber os dados para o cálculo da ação do vento, esta aba possui outras cinco, onde a primeira (v0) exibe o mapa das isopletas do Brasil

e pede para que entre com a velocidade média do vento de acordo com a região (figura 35).

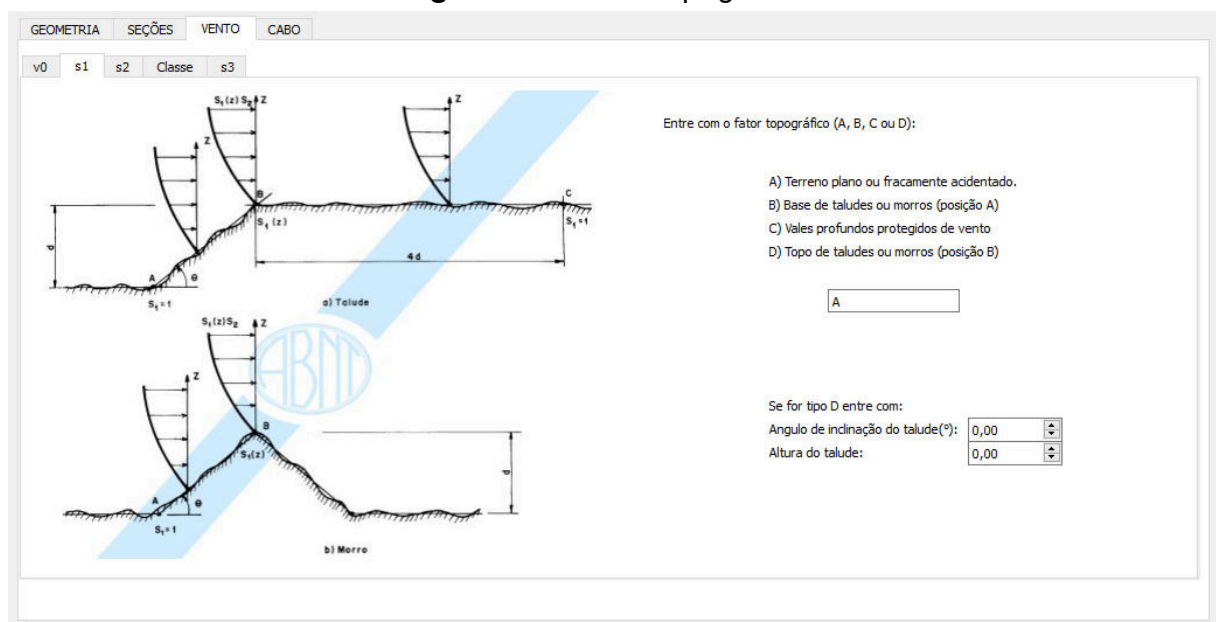
Figura 35 - Velocidade básica do vento.



Fonte: O autor (2019).

A segunda página dentro do módulo da ação do vento (s1) irá receber os dados para o cálculo do fator topográfico, s1 (figura 36).

Figura 36 - Fator topográfico.



Fonte: O autor (2019).

A terceira página dentro do módulo da ação do vento (s2) irá receber os dados para o cálculo do fator de rugosidade, s2 (figura 37).

Figura 37 - Fator de rugosidade.

GEOMETRIA SEÇÕES VENTO CABO

v0 s1 s2 Classe s3

Entre com o fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (I, II, III, IV, V):

I) Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
Exemplos:
- Mar calmo; - Lagos e rios; - Pântanos sem vegetação.

II) Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.
Exemplos:
- Zonas costeiras planas; - Pântanos com vegetação rala; - Campos de aviação; - Pradarias e charnecas; - Fazendas sem sebes ou muros.
A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m.

III) Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.
Exemplos:
- Granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; - Fazendas com sebes e/ou muros;
- Subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.

IV) Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.
Exemplos:
- zonas de parques e bosques com muitas árvores; - cidades pequenas e seus arredores; - subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
- áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m.

V) Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.
Exemplos:
- florestas com árvores altas, de copas isoladas; - centros de grandes cidades; - complexos industriais bem desenvolvidos.
A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 m.

I

Fonte: O autor (2019).

A quarta página dentro do módulo da ação do vento (Classe) irá receber os dados referente a classe da edificação (figura 38).

Figura 38 - Classe da edificação.

GEOMETRIA SEÇÕES VENTO CABO

v0 s1 s2 Classe s3

Entre com a classe da edificação (A, B, C ou D):

A) Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

B) Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

C) Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

A

Fonte: O autor (2019).

A quinta e última página dentro do módulo da ação do vento (s3) irá receber os dados para calcular o fator estatístico, s3 (figura 39).

Figura 39 - Fator estatístico.

Entre com o fator estatístico (1, 2, 3, 4 ou 5):

- 1) Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva.
- 2) Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.
- 3) Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções).
- 4) Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc).
- 5) Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.

1

Fonte: O autor (2019).

Saindo do módulo de cálculo do vento terá a última página (CABO), onde será necessário entrar com os dados equivalentes ao cabo condutor, em suas componentes x e y (figura 40).

Figura 40 – Cabo condutor.

CARGA ESTÁTICA EQUIVALENTE DE RUPTURA DO CABO CONDUTOR:

Fx 1,00

CARGA DE PESO PRÓPRIO DOS CABOS:

Fy 1,00

Fonte: O autor (2019).

Após clicar no botão CALCULAR a estrutura será gerada (figura 41).

Figura 41 - Estrutura gerada.



Fonte: O autor (2019).

Após a estrutura ser gerada o dimensionamento será automaticamente criado em um arquivo que irá criar um memorial geral de cálculo, exibindo assim todos os resultados referentes ao dimensionamento (figuras 41, 42, 43 e 44).

Figura 42 – Dados de cada módulo do relatório final.

```
RELATÓRIO FINAL
#####MÓDULO 0#####
Altura: 5.00
Cota: 5.00
Área de Contorno: 47.50
Área Efetiva: 3.32770
Phi (Ae/Ac): 0.07006
S1: 1.0000
S2: 1.0552
S3: 1.1000
Vk: 34.8213
Re: 243749.01
Ca: 1.15
q: 743.28
Fa: 2847.5340
Nfp: 0.9604
Fpp: 7477.4336
#####MÓDULO 1#####
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 44 - Verificação a compressão.

```
#####BARRA 0#####
# Verificação a Compressão #
#####
Área: 0.0028
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0100
Comprimento: 5.05
Esforço Normal: -115111.57
Inércia: 0.00
Raio de Giração: 0.0320
Comprimento de Flambagem: 5.05
Esbeltez: 157.6878
Teste da Esbeltez: 157.69 <= 200.00 => OK!
Tensão Crítica: 360600.2518
Esbeltez Reduzida: 1.3997
Fator X: 0.4404
Área Necessária (Comp): 0.0012
Teste da Área Necessária: 0.00 >= 0.00 => OK!
#####
```

Fonte: O autor (2019).

O dimensionamento irá passar por todas as barras e todos os módulos. Todos os resultados serão exibidos no relatório.

Figura 43 - Forças aplicadas nos nós.

```
#####MÓDULO 0#####
No_0: No(x = -4.500000, y = 5.000000, z = -4.500000)
Forca_0: Forca(nome=Forca01, fx=0.00, fy=-1.00, fz=1.00)
No_1: No(x = 4.500000, y = 5.000000, z = -4.500000)
Forca_1: Forca(nome=Forca01, fx=0.00, fy=-1.00, fz=1.00)
No_2: No(x = 4.500000, y = 5.000000, z = 4.500000)
Forca_2: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-10731.40, fz=1046.89)
No_3: No(x = -4.500000, y = 5.000000, z = 4.500000)
Forca_3: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-10731.40, fz=1046.89)
#####MÓDULO 1#####
No_0: No(x = -4.100000, y = 9.000000, z = -4.100000)
Forca_0: Forca(nome=F0-6:7-VF, fx=0.00, fy=-10731.40, fz=1005.45)
No_1: No(x = 4.100000, y = 9.000000, z = -4.100000)
Forca_1: Forca(nome=F0-6:7-VF, fx=0.00, fy=-10731.40, fz=1005.45)
No_2: No(x = 4.100000, y = 9.000000, z = 4.100000)
Forca_2: Forca(nome=F1-12:13-VF, fx=0.00, fy=-6297.19, fz=634.89)
No_3: No(x = -4.100000, y = 9.000000, z = 4.100000)
Forca_3: Forca(nome=F1-12:13-VF, fx=0.00, fy=-6297.19, fz=634.89)
#####
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 45 - Verificação a tração.

```
#####BARRA 1#####
# Verificação a Tração #
#####
Área: 0.0028
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0100
Comprimento: 5.05
Esforço Normal: 125154.67
Área Necessária (Escoamento): 0.000550680541751
Área Necessária (Ruptura): 0.0004
#####
```

Fonte: O autor (2019).

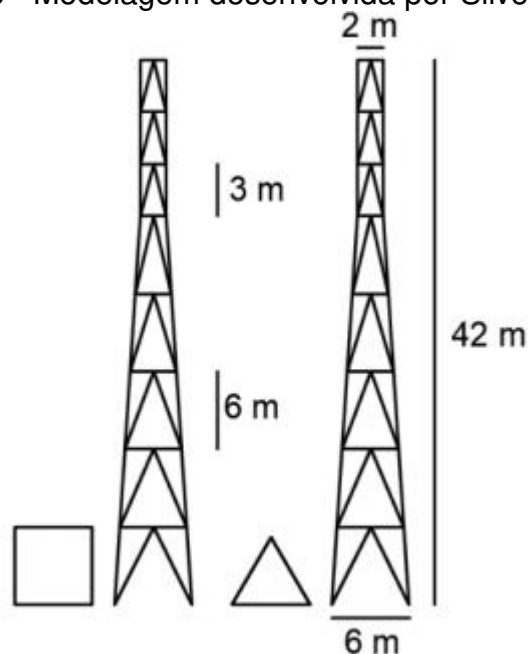
4. TESTES E APLICAÇÕES

O módulo de dimensionamento para torres autoportantes adicionado no *softwares* SAnE obteve êxito, para comprovar sua eficácia será desenvolvido um modelo de torre análogo ao modelo desenvolvido no trabalho de conclusão de curso para engenharia civil desenvolvido por Acácio Oliveira Silvério (2019) e comparados os resultados. Logo após serão testados modelos de diferentes geometrias.

4.1. TESTE 1

O modelo dimensionado será o da figura 45.

Figura 46 - Modelagem desenvolvida por Silvério 2019.



Fonte: SILVERIO (2019).

Os parâmetros geométricos foram os seguintes:

- | | | |
|--------------|----------------|-------------|
| - Lbx: 6,0m | - Ltcx: 2,0m | - Hb: 6,0m |
| - Lby: 6,0m | - Ltcy: 2,0m | - Hc: 24,0m |
| - Ltbx: 5,2m | - Ltopox: 2,0m | - Ht: 9,0m |
| - Ltby: 5,2m | - Ltopoy: 2,0m | |

Com 3 módulos no topo e 4 no corpo.

Para o material foram utilizados os seguintes fatores, Coeficiente de Poisson (ν) de 0,3, Módulo de Young (E) de 200GPa, e um Peso específico de 7800kg/m³ a figura 46 exibe a entrada de dados no programa.

Figura 47 - Entrada de dados na aba GEOMETRIA teste 1.

GEOMETRIA SEÇÕES VENTO CABO

Diagrama da estrutura com dimensões: L TOPO CB, LTC, LTB, LB, HT, HC, HB. EIXO X, EIXO Y.

NMC: NÚMERO DE MÓDULOS NO CORPO
NMT: NÚMERO DE MÓDULOS NO TOPO

GEOMETRIA

LBx: 6,00
LBy: 6,00
LTbx: 5,20
LTby: 5,20
LTcx: 2,00
LTcy: 2,00
Ltopox: 2,00
Ltopoy: 2,00
Hb: 9,00
Hc: 24,00
Ht: 9,00
Cb: 5,00
NMC: 4
NMT: 3

MATERIAL

Coef. dilatação: 0,00
Poisson: 0,30
Young: 200,00
Peso específico: 7800,00

BRAÇOS TOPO

Esquerda: ☐ 1, ☐ 2, ☐ 3, ☐ 4, ☐ 5, ☐ 6, ☐ 7, ☐ 8, ☐ 9, ☐ 10
Direita: ☐ 1, ☐ 2, ☐ 3, ☐ 4, ☐ 5, ☐ 6, ☐ 7, ☐ 8, ☐ 9, ☐ 10

CALCULAR

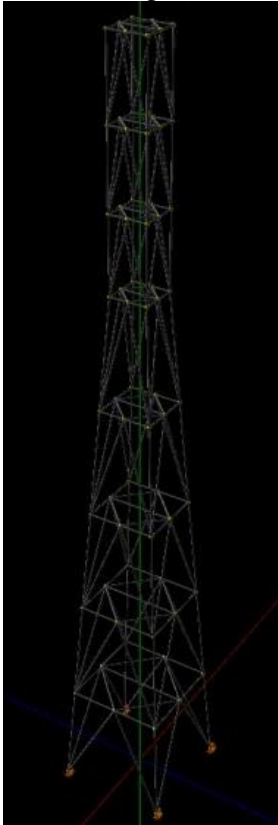
Fonte: O autor (2019).

No dimensionamento de SILVERIO foi utilizada a mesma área para todos os módulos, com valor de 0,1cm². Os dados do vento foram os seguintes:

- V0: 30m/s;
- Fator topográfico: A (terreno plano ou fracamente acidentado);
- Fator de rugosidade: IV (terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada);
- Classe da edificação: B (toda edificação ou parte da edificação para qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20m e 50m);
- Fator estatístico: 2 (edificação para comércio e indústria com alto fator de ocupação);

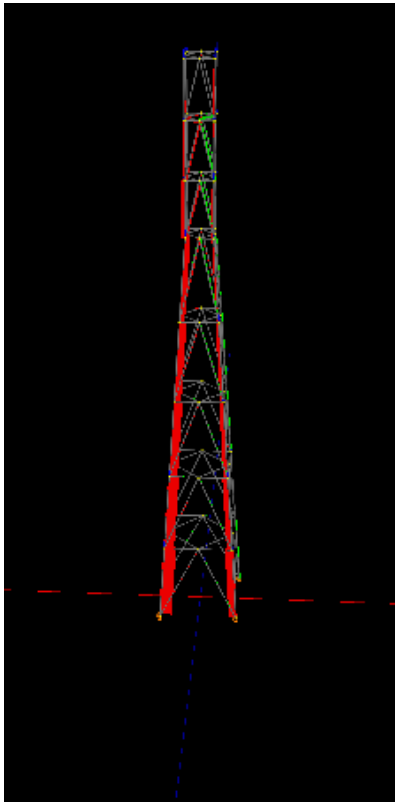
As figuras 47 e 48 exibem um comparativo entre as duas modelagens.

Figura 48 - Modelagem de SILVERIO.



Fonte: SILVERIO (2019).

Figura 49 - Modelagem no SAnE.



Fonte: O autor (2019).

Após gerar o modelo os resultados de dimensionamento foram obtidos e comparados as figuras de 49 a 56 exibem o comparativo de resultados.

Figura 50 – Dados de cálculo módulo 0 SILVERIO 2019.

```
#####MÓDULO 0#####  
Altura 6.00  
Cota 6.00  
Área de Contorno 33.60  
Área Efetiva = 3.06935  
Phi (Ae/Ac) = 0.09135  
S1 = 1.0000  
S2 = 0.7974  
S3 = 1.0000  
Vk = 23.9226  
Re = 167458.47  
Ca = 1.76  
q = 350.82  
Fa = 1895.0246  
Nfp = 0.9501  
Fpp = 3221.3463  
=====
```

Fonte: SILVERIO (2019).

Figura 51 – Dados de cálculo módulo 0 SAnE.

```
RELATÓRIO FINAL  
#####MÓDULO 0#####  
Altura: 6.00  
Cota: 6.00  
Área de Contorno: 33.60  
Área Efetiva: 3.06935  
Phi (Ae/Ac): 0.09135  
S1: 1.0000  
S2: 0.7974  
S3: 1.0000  
Vk: 23.9226  
Re: 167458.47  
Ca: 1.76  
q: 350.82  
Fa: 1895.0246  
Nfp: 0.9501  
Fpp: 3080.0773  
=====
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 52 - Distribuição de forças no módulo 0 SILVERIO 2019.

```
#####MÓDULO 0#####
No_0: No(x = -2.600000, y = 6.000000, z = -2.600000)
Forca_0: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-4728.61, fz=727.41)
No_1: No(x = 2.600000, y = 6.000000, z = -2.600000)
Forca_1: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-4728.61, fz=727.41)
No_2: No(x = 2.600000, y = 6.000000, z = 2.600000)
Forca_2: Forca(nome=F0-6:7-VF, fx=0.00, fy=-4728.61, fz=691.10)
No_3: No(x = -2.600000, y = 6.000000, z = 2.600000)
Forca_3: Forca(nome=F0-6:7-VF, fx=0.00, fy=-4728.61, fz=691.10)
=====
```

Fonte: SILVERIO (2019).

Figura 53 - Distribuição de forças no módulo 0 SAnE.

```
#####MÓDULO 0#####
No_0: No(x = -2.600000, y = 6.000000, z = -2.600000)
Forca_0: Forca(nome=Forca01, fx=0.00, fy=-1.00, fz=1.00)
No_1: No(x = 2.600000, y = 6.000000, z = -2.600000)
Forca_1: Forca(nome=Forca01, fx=0.00, fy=-1.00, fz=1.00)
No_2: No(x = 2.600000, y = 6.000000, z = 2.600000)
Forca_2: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-9006.36, fz=727.41)
No_3: No(x = -2.600000, y = 6.000000, z = 2.600000)
Forca_3: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-9006.36, fz=727.41)
=====
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 54 - Dimensionamento barra 1 SILVERIO 2019.

```
#####BARRA 1#####
# Verificação a Tração #
Área: 0.0014206537499999996
Diâmetro: 0.1
Espessura: 0.00475
Comprimento: 6.026607669327745
Esforço Normal: 735.738528121
Área Necessária (Escoamento): 3.23724952373e-06
Área Necessária (Ruptura): 2.48311753241e-06
0.001420653750000 >= 0.000003237249524 => OK!
0.001420653750000 >= 0.000002483117532 => OK!
=====
```

Fonte: SILVERIO (2019).

Figura 55 - Dimensionamento barra 1 SAnE.

```
#####BARRA 1#####
# Verificação a Tração #
Área: 0.0014
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0047
Comprimento: 6.03
Esforço Normal: 2854.10
Área Necessária (Escoamento): 1.25580322544e-05
Área Necessária (Ruptura): 0.0000
=====
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 56 - Dimensionamento barra 2 SILVERIO 2019.

```
#####BARRA 2#####
# Verificação a Compressão #
Área: 0.0014206537499999996
Diâmetro: 0.1
Espessura: 0.00475
Comprimento: 6.026607669327745
Esforço Normal: -39613.6915879
Inércia: 1.615947146082171e-06
Raio de Giração: 0.03372635871883537
Comprimento de Flambagem: 6.026607669327745
Esbeltez: 178.69132329313769
Teste da Esbeltez: 178.69 <= 200.00 => OK!
Tensão Crítica: 168474.4705901
Esbeltez Reduzida: 1.4519346684291212
Fator X: 0.4138085029722938
Área Necessária (Comp): 0.000421209911674
Teste da Área Necessária: 0.00 >= 0.00 => OK!
=====
```

Fonte: SILVERIO (2019).

Figura 57 - Dimensionamento barra 2 SAnE.

```
#####BARRA 2#####
# Verificação a Compressão #
Área: 0.0014
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0047
Comprimento: 6.03
Esforço Normal: -37814.63
Inércia: 0.00000162
Raio de Giração: 0.0337
Comprimento de Flambagem: 6.03
Esbeltez: 178.6913
Teste da Esbeltez: 178.69 <= 200.00 => OK!
Tensão Crítica: 168474.4706
Esbeltez Reduzida: 1.4519
Fator X: 0.4138
Área Necessária (Comp): 0.0004
Teste da Área Necessária: 0.00 >= 0.00 => OK!
=====
```

Fonte: O autor (2019).

Como os resultados obtidos pelo SAnE foram análogos aos de SILVÉRIO 2019, pode-se atestar a eficácia do dimensionamento implementado.

4.2. TESTE 2

Para o segundo teste será modelada uma torre autoportante do tipo linha de transmissão, onde serão adicionados seis braços, três em cada lado da torre. O modelo será do tipo torre de base quadrada.

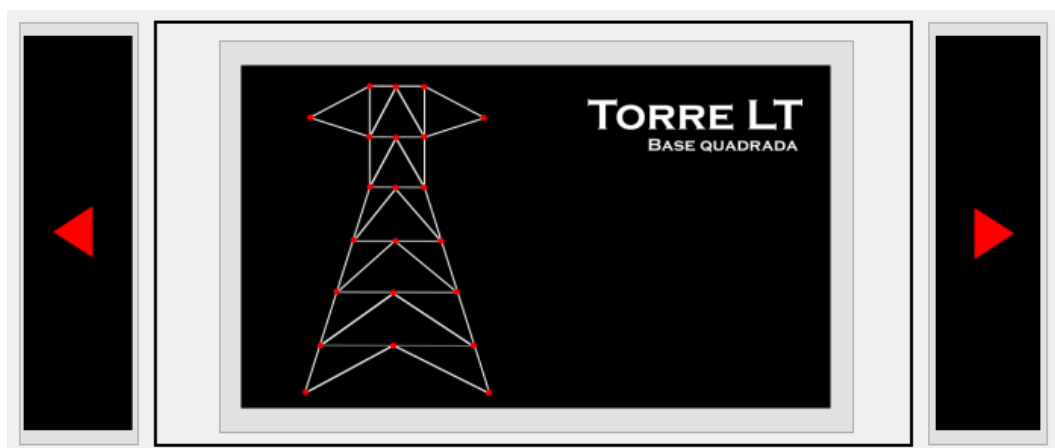
Após iniciar o programa selecionou-se “Criar projeto (Modelos Parametrizados)” como exibe a figura 57.

Figura 58 - Criando projeto (Modelo Parametrizado).

Fonte: O autor (2019).

Logo na tela de escolhas foi selecionado o modelo “Torre LT base quadrada”.

Figura 59 - Tela de escolhas modelo LT quadrada.



Fonte: O autor (2019).

Os parâmetros geométricos utilizados serão os seguintes:

- | | | |
|--------------|----------------|-------------|
| - Lbx: 10,0m | - Ltcx: 5,0m | - Hb: 9,0m |
| - Lby: 10,0m | - Ltcy: 5,0m | - Hc: 30,0m |
| - Ltbx: 7,0m | - Ltopox: 5,0m | - Ht: 20,0m |
| - Ltby: 7,0m | - Ltopoy: 5,0m | - Cb: 7,0m |

Com 5 módulos no topo e 5 no corpo. Os braços serão adicionados nos módulos 1, 3 e 5. Para o material foram utilizados os seguintes fatores, Coeficiente de Poisson (ν) de 0,3, Módulo de Young (E) de 200GPa, e um Peso específico de 7800kg/m³. A figura 59 exibe a entrada de dados na aba GEOMETRIA.

Figura 60 - Aba GEOMETRIA teste 2.

The screenshot shows the 'GEOMETRIA' tab of a software interface. On the left, a diagram of a lattice tower is displayed with various dimensions labeled: L TOPO CB, LTC, LTB, LB, HT, HC, HB, and EIXO X. Below the diagram, it specifies 'NMC: NÚMERO DE MÓDULOS NO CORPO' and 'NMT: NÚMERO DE MÓDULOS NO TOPO'. On the right, there are input fields for 'GEOMETRIA' (LBx, LBy, LTbx, LTby, LTcx, LTcy, Ltopox, Ltopoy, Hb, Hc, Ht, Cb, NMC, NMT) and 'MATERIAL' (Coef. dilatação, Poisson, Young, Peso específico). At the bottom right, there is a section for 'BRAÇOS TOPO' with checkboxes for 'Esquerda' and 'Direita' for modules 1 through 10. A 'CALCULAR' button is located at the bottom center.

Fonte: O autor (2019).

Na aba SEÇÃO foram adicionadas diferentes áreas, para as barras dos montantes a área utilizada foi de 0,03cm² em todos os módulos. Já para as diagonais, nos módulos iniciais do topo a área foi de 0,01cm², e para os módulos do corpo foi utilizada uma área de 0,02cm². Para as barras horizontais foi utilizada uma área igual para todos os módulos de 0,01cm².

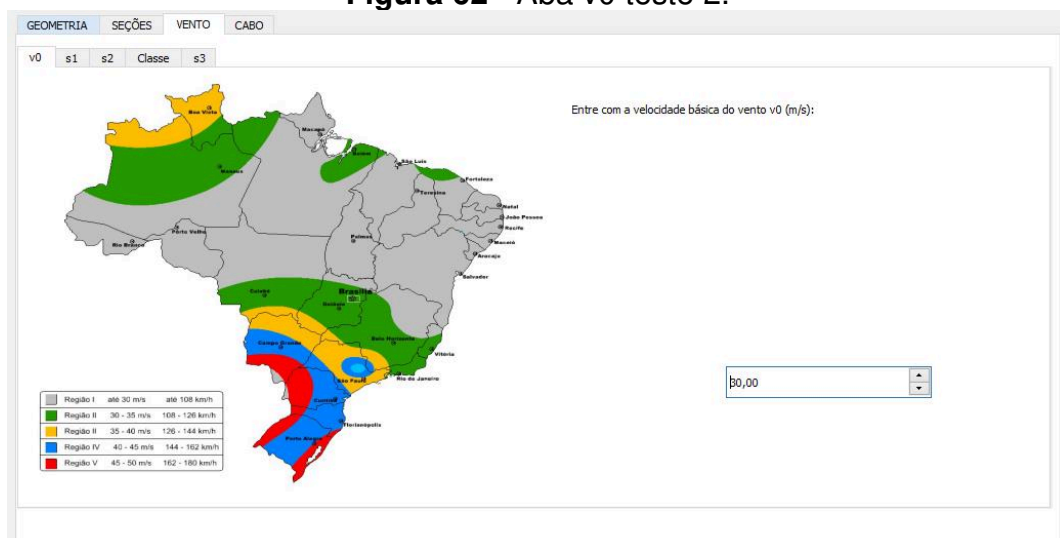
Figura 61 - Aba SEÇÕES teste 2.

Fonte: O autor (2019).

Os dados para o cálculo do vento foram os seguintes:

- V0: 30m/s;
- Fator topográfico: B (base de talude ou morros);
- Fator de rugosidade: IV (terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada);
- Classe da edificação: C (toda edificação ou parte da edificação para qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50m);
- Fator estatístico: 2 (edificação para comércio e indústria com alto fator de ocupação);

Figura 62 - Aba v0 teste 2.



Fonte: O autor (2019).

Figura 63 - Aba s1 teste 2.

GEOMETRIA	SEÇÕES	VENTO	CABO
v0	s1	s2	Classe

Entre com o fator topográfico (A, B, C ou D):

A) Terreno plano ou fracamente acidentado.
 B) Base de taludes ou morros (posição A)
 C) Vales profundos protegidos de vento
 D) Topo de taludes ou morros (posição B)

Se for tipo D entre com:

Ângulo de inclinação do talude(°):

Altura do talude:

Fonte: O autor (2019).

Figura 64 - Aba s2 teste 2.

GEOMETRIA	SEÇÕES	VENTO	CABO
v0	s1	s2	Classe

Entre com o fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (I, II, III, IV, V):

I) Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
 Exemplos:
 - Mar calmo; - Lagos e rios; - Pântanos sem vegetação.

II) Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.
 Exemplos:
 - Zonas costeiras planas; - Pântanos com vegetação rala; - Campos de aviação; - Pradarias e charnecas; - Fazendas sem sebes ou muros.
 A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m.

III) Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.
 Exemplos:
 - Granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; - Fazendas com sebes e/ou muros;
 - Subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
 A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.

IV) Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.
 Exemplos:
 - zonas de parques e bosques com muitas árvores; - cidades pequenas e seus arredores; - subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
 - áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
 A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m.

V) Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.
 Exemplos:
 - florestas com árvores altas, de copas isoladas; - centros de grandes cidades; - complexos industriais bem desenvolvidos.
 A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 m.

Fonte: O autor (2019).

Figura 65 - Aba Classe teste 2.

GEOMETRIA	SEÇÕES	VENTO	CABO
v0	s1	s2	Classe

Entre com a classe da edificação (A, B, C ou D):

A) Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

B) Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

C) Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Fonte: O autor (2019).

Figura 66 - Aba s3 teste 2.

GEOMETRIA SEÇÕES VENTO CABO

v0 s1 s2 Classe s3

Entre com o fator estatístico (1, 2, 3, 4 ou 5):

- 1) Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva.
- 2) Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.
- 3) Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções).
- 4) Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc).
- 5) Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.

Fonte: O autor (2019).

Para o esforço causado pelo cabo foram utilizados valores retirados de uma dissertação de mestrado em engenharia civil, desenvolvida pelo autor Thiago Brazeiro Carlos, 2015. Nesta tese foram calculados valores da carga horizontal de ruptura e o peso dos cabos, a figura 66 exibe os valores obtidos.

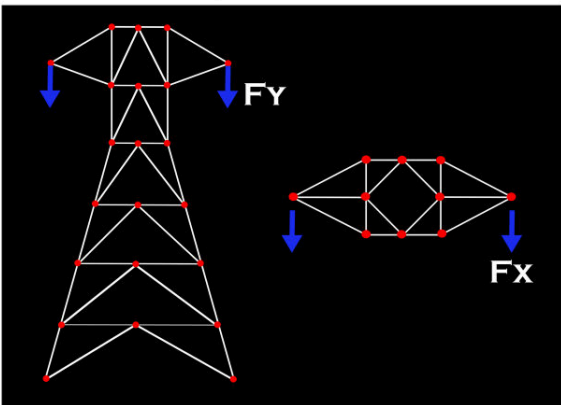
Figura 67 - Valores referentes a utilização do cabo.

Elemento	Carga horizontal de ruptura de cabo (N)			Peso linear (N/m)	Peso dos cabos (N)	
	UTS	16% da UTS	11,75% da UTS		1 Vão (500m)	½ Vão* (250m)
Cabo condutor	72506	11600,96	-	7,9770	3988,5	1994,25
Cabo para-raios	68502,6	-	8049,06	3,9841	1992,05	996,025
Nós de aplicação nos braços do cabo condutor		253	-	-	260 e 267	253

Fonte: O autor (2019).

Figura 68 - Aba CABO teste 2.

GEOMETRIA SEÇÕES VENTO CABO



CARGA ESTATICA EQUIVALENTE DE RUPTURA DO CABO CONDUTOR:

Fx

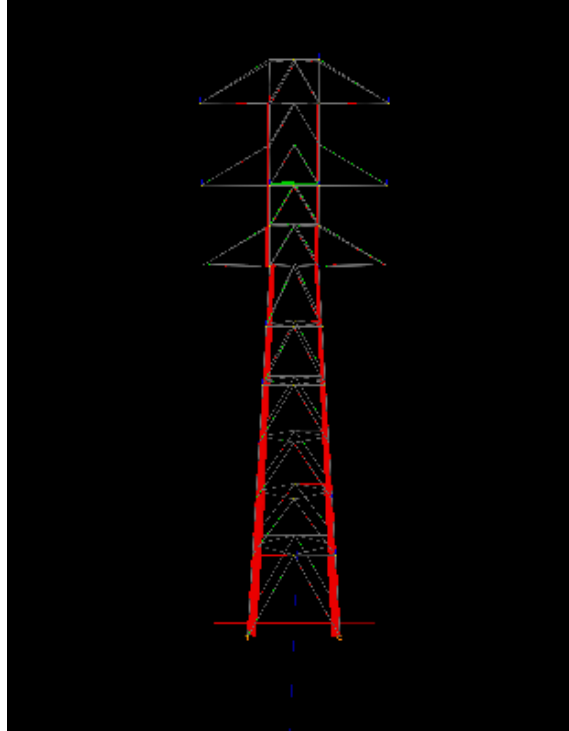
CARGA DE PESO PRÓPRIO DOS CABOS:

Fy

Fonte: O autor (2019).

Após a adição de todos os parâmetros a estrutura foi gerada como a figura 68 demonstra.

Figura 69 - Modelo teste 2.



Fonte: O autor (2019).

O relatório demonstra os resultados de todas as barras, a seguir serão demonstrados valores de compressão e tração obtidos nas barras da base da torre e em barras dos braços.

Figura 70 - Dados de cálculo módulo 0 teste 2.

```
RELATÓRIO FINAL
#####MÓDULO 0#####
Altura: 9.00
Cota: 9.00
Área de Contorno: 84.81
Área Efetiva: 4.75435
Phi (Ae/Ac): 0.05606
S1: 1.0000
S2: 0.8281
S3: 1.0000
Vk: 24.8441
Re: 173908.70
Ca: 1.70
q: 378.36
Fa: 3055.6097
Nfp: 0.9604
Fpp: 12280.6097
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 71 – Distribuição de forças no módulo 0 teste 2.

```
#####MÓDULO 0#####
No_0: No(x = -4.423077, y = 9.000000, z = -4.423077)
Forca_0: Forca(nome=Forca01, fx=0.00, fy=-253.00, fz=253.00)
No_1: No(x = 4.423077, y = 9.000000, z = -4.423077)
Forca_1: Forca(nome=Forca01, fx=0.00, fy=-253.00, fz=253.00)
No_2: No(x = 4.423077, y = 9.000000, z = 4.423077)
Forca_2: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-16903.71, fz=1087.41)
No_3: No(x = -4.423077, y = 9.000000, z = 4.423077)
Forca_3: Forca(nome=F0-4:5-VF, fx=0.00, fy=-16903.71, fz=1087.41)
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 72 – Barra da base submetida a tração teste 2.

```
#####BARRA 5#####
# Verificação a Tração #
#####
Área: 0.0028
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0100
Comprimento: 10.31
Esforço Normal: 898.07
Área Necessária (Escoamento): 3.95150405352e-06
Área Necessária (Ruptura): 0.0000
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 73 – Barra da base submetida a compressão teste 2.

```
#####BARRA 0#####
# Verificação a Compressão #
#####
Área: 0.0066
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0300
Comprimento: 9.04
Esforço Normal: -85377.94
Inércia: 0.00000478
Raio de Giração: 0.0269
Comprimento de Flambagem: 9.04
Esbeltez: 335.5372
Teste da Esbeltez: Aumentar o diâmetro da barra.
Tensão Crítica: 332557.8852
Esbeltez Reduzida: 2.2264
Fator X: 0.1769
Área Necessária (Comp): 0.0021
Teste da Área Necessária: 0.01 >= 0.00 => OK!
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 74 - Barra do braço submetida a tração teste 2.

```
#####BARRA 287#####
# Verificação a Tração #
#####
Área: 0.0066
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0300
Comprimento: 8.44
Esforço Normal: 392.77
Área Necessária (Escoamento): 1.72819152336e-06
Área Necessária (Ruptura): 0.0000
```

Fonte: O autor (2019).

Figura 75 - Barra do braço submetida a compressão teste 2.

```
#####BARRA 28S#####
# Verificação a Compressão #
#####
Área: 0.0066
Diâmetro: 0.1000
Espessura: 0.0300
Comprimento: 7.43
Esforço Normal: -721.98
Inércia: 0.00000478
Raio de Giração: 0.0269
Comprimento de Flambagem: 7.43
Esbeltez: 275.9860
Teste da Esbeltez: Aumentar o diâmetro da barra.
Tensão Crítica: 404315.9750
Esbeltez Reduzida: 2.0192
Fator X: 0.2151
Área Necessária (Comp): 0.0000
Teste da Área Necessária: 0.01 >= 0.00 => OK!
```

Fonte: O autor (2019).

Pode-se verificar de acordo com o programa que será necessário aumentar o diâmetro da barra 285, que é referente a dos montantes (Área de $0,03\text{cm}^2$, $L=0,1\text{cm}$), pois esta não passou no teste de esbeltez. Por este fato pode-se atestar a importância que tem a funcionalidade de dimensionar com áreas diferentes de acordo com os módulos e tipos de elementos. Caso esta função não existisse, ao adicionar uma barra que conseguisse resistir a todos os esforços da estrutura acabaria superdimensionando alguns módulos, deixando assim uma estrutura mais cara para construção.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A implementação do módulo de dimensionamento de torres de linha de transmissão no *software* SAnE (*Software* para Análise Estrutural) se mostrou eficaz, principalmente no que diz respeito ao cálculo do esforço exercido pela ação do vento, o principal atuante em torres de linhas de transmissão.

Com a verificação feita no teste 1 foi possível a obtenção de resultados análogos aos comparados, atestando assim a veracidade do dimensionamento. O teste 2 demonstrou a efetiva necessidade de adicionar diferentes áreas para os diversos módulos da estrutura, para que esta não seja superdimensionada, diminuindo o custo de construção da torre.

Contudo, deve-se ressaltar a importância de que o usuário desta ferramenta seja uma pessoa capacitada, para que possa ler e confrontar os resultados de acordo com as teorias constituintes da análise.

Como perspectivas futuras deste trabalho, pode-se aumentar a diversidade de possibilidades, adicionando modelos de torres com outras configurações, como por exemplo torres com base triangular. Bem como, pode-se adicionar uma plataforma de cálculo para a ruptura do cabo condutor. Em busca de transformar o SAnE em uma ferramenta com uma menor quantidade de falhas, melhorando sua estrutura para uma obtenção de resultados em análises estruturais cada vez mais fidedigna.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123 – **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8681 – **Ações e segurança nas estruturas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800 – **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AMADOR, Sandro Diord Rescinho. **Programa computacional com interface gráfica para identificação estocástica de parâmetros modais de estruturas civis - Aplicação em pontes e torres de linhas de transmissão**. 2007. 180 f. Dissertação (Pós-Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BORGES, L. E. **Python para desenvolvedores**. 2. ed. Rio de Janeiro: Edição do Autor, 2010.

CARLOS, Thiago Brazeiro. **Análise dinâmica de torres estaiadas de linhas de transmissão submetidas à ruptura de cabo**. 2015. 207 f. Dissertação (Pós-Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

DOWNEY, A. et al. **Aprenda computação com Python 3.0**. 1. ed. 2009.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1992.

PFEIL, W. **Estruturas de aço: Dimensionamento prático de acordo com NBR8800:2008**. 8ª ed. Rio de Janeiro. 2009.

R.C. Hibbeler, **Resistência dos Materiais**. 7ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2010.

SILVERIO, Acacio Oliveira. **Desenvolvimento de programa para dimensionamento estrutural de torres autoportantes para telecomunicação**. 2019. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2019.