

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

VINICIUS SIQUEIRA MORAES

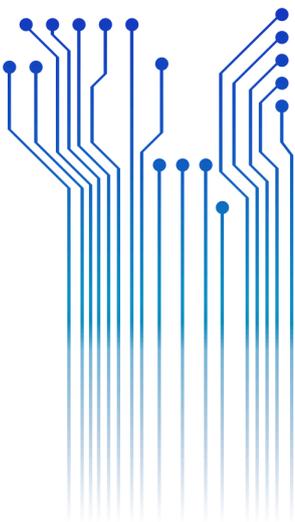


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

RELATÓRIO DE ESTÁGIO  
ENERGY ELETRICIDADE



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2017

VINICIUS SIQUEIRA MORAES

ENERGY ELETRICIDADE

*Relatório de Estágio Integrado submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Alta Tensão

Orientador:

Edgar Roosevelt Braga Filho, D. Sc.

Campina Grande  
2017

VINICIUS SIQUEIRA MORAES

ENERGY ELETRICIDADE

*Relatório de Estágio Integrado submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Alta Tensão

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho às pessoas que participaram de forma direta e indireta em toda minha formação acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, em especial a minha mãe Maria de Fátima e meu pai José Brasilino, por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, agradeço também a minha irmã por ter me ajudado tanto durante todo o processo de graduação. Agradeço a meu orientador professor Edgar Roosevelt, bem como a todos os professores do curso de graduação de engenharia elétrica pelo conhecimento transmitido ao longo da minha formação acadêmica. Agradeço a Empresa Energy eletricidade pela oportunidade, em especial ao proprietário Luiz Alberto Leite e a Leonardo Medeiros Ramos, também agradeço ao engenheiro Dayvson e a José Ivan, enfim agradeço a toda equipe Energy pelo aprendizado que me foi proporcionado. Agradeço a minha namorada Mariana, que com todo carinho e paciência, não mediu esforços para me ajudar em várias ocasiões, sem dúvida a caminhada até o final do processo de graduação se tornou menos árdua ao lado dela. Também agradeço a todos os meus amigos, os que fiz durante o curso Raoni, Rodrigo, Ruan, Suelson, e tantos outros. Além dos amigos de longa data Edvanilson, Alex, André, Douglas, Jairo, Kias, Kel, Robson, Pedro Flávio e tantos outros que sempre estiveram ao meu lado em tantas ocasiões. Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“ Às vezes ouço passar o vento;  
e só de ouvir o vento passar,  
vale a pena ter nascido”.

Fernando Pessoa

.

## RESUMO

Este documento, apresentado sob a forma de relatório, descreve de maneira sequencial as principais atividades desenvolvidas pelo graduando junto à empresa Energy Eletricidade LTDA, correspondente ao estágio discente, prestado durante os meses de abril a de agosto do ano em curso (03/04/2017-31/08/2017), sob forma integrada, no município de Lagoa Nova, estado do Rio Grande do Norte, com ênfase na área de eletrotécnica, particularmente no tocante à transmissão de energia. Os trabalhos levados a efeito e suportado pelo canteiro de obras instalado naquela localidade, disseram respeito à construção de uma linha de transmissão, segundo um nível de tensão de sessenta e nove quilovolts (69 KV) a ser interligada ao sistema de potência da concessão, a partir da geração dos parques eólicos de Pedra Rajada I, II e III. Outrossim, e fundamentadas em documentação normatizada, bem como, padrões e especificações de procedimentos e materiais associados aos circuitos de transmissão de energia, foram desenvolvidas tarefas vinculadas ao planejamento e controle de projetos, locação de estruturas de transmissão, bem como, lançamento de cabos e montagens eletromecânicas afins, como forma de atender demandas próprias e específicas ao processo de interligação anteriormente planejado. Vale salientar que os objetivos foram atingidos satisfatoriamente.

**Palavras-chave:** Parque eólico, Linha de Transmissão, Estruturas, alta tensão.

## ABSTRACT

This document, presented in the form of a report, describes in a sequential manner the main activities carried out by the graduates of the company Energy Eletricidade LTDA, corresponding to the student stage, given during the months of April to August of the current year (03/04/2017-31/08/2017), in an integrated form, in the municipality of Lagoa Nova, state of Rio Grande do Norte, with emphasis on the electrotechnical area, particularly with regard to the transmission of energy. The works carried out and supported by the construction site of works installed in that locality, related to the construction of a transmission line, according to a voltage level of sixty-nine kilovolts (69 KV) to be connected to the power system of the concession, from the generation of the wind farms of Pedra Rajada I, II and III. In addition, based on standardized documentation, as well as standards and specifications of procedures and materials associated with power transmission circuits, tasks related to project planning and control, leasing of transmission structures, as well as cable laying and related electromechanical assemblies as a way to meet specific and specific demands on the previously planned interconnection process.

**Keywords:** Wind farm, Transmission line, Structures, High voltage.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Exemplo de condutor nu com alma de aço.....	17
Figura 2. Cadeias de suspensão .....	19
Figura 3. Amortecedor tipo Stockbridge. ....	19
Figura 4. Grampa de ancoragem.....	20
Figura 5. Estrutura tipo suspensão.....	21
Figura 6. Estrutura tipo ancoragem .....	22
Figura 7. Estrutura tipo ancoragem com uso de post line.....	22
Figura 8. Estrutura tipo ângulo .....	23
Figura 9. Estrutura tipo transposição.....	24
Figura 10. Tipos de estruturas .....	25
Figura 11. Fundação simples. ....	26
Figura 12. Fundação fracionada. ....	27
Figura 13. Fundação tipo grelha. ....	28
Figura 14. Fundação tipo tubulão .....	28
Figura 15. Fundação tipo sapata. ....	29
Figura 16. Fundação tipo plantio de poste.....	29
Figura 17. Acompanhamento da execução das atividades.....	49
Figura 18. Diário de obra - Produção diária. ....	49
Figura 19. Diário de obra -informes ao cliente, relato fotográfico e contingente de homens e máquinas. .	50
Figura 20. Atividade de Topografia. ....	51
Figura 21. Traçado da LT 69 Kv Pedra Rajada. ....	51
Figura 22. Atividade de supressão vegetal e cubagem de madeira.....	52
Figura 23. Atividade de adequação do solo, criação de praças, criação de acessos e planificação. ....	53
Figura 24. Atividade escavação manual. ....	54
Figura 25. Atividade de escavação com uso de rompedor acoplado no compressor e na escavadeira hidráulica. ....	54
Figura 26. Fundação tipo plantio tubulão, sem presença de rocha. ....	55
Figura 27. Fundação tipo plantio de poste, com presença de rocha.....	56
Figura 28. Transporte e inserção do tubulão no solo .....	56
Figura 29. Transporte de estruturas. ....	57
Figura 30. Aparelhamento de estrutura tipo ancoragem .....	58
Figura 31. Aparelhamento de estrutura tipo suspensão. ....	58
Figura 32. Implantação de estruturas.....	59
Figura 33. Praça de lançamento de cabos. ....	60
Figura 34. Lançamento de cabos. ....	60
Figura 35. Tensionamento dos cabos. ....	61
Figura 36. Representação do circuito equivalente da linha de transmissão.....	67
Figura 37. Trecho de um catálogo de isoladores .....	69
Figura 38. Forças atuantes na estrutura tipo suspensão.....	69
Figura 39. Forças atuantes na estrutura tipo ancoragem.....	70
Figura 40. Forças atuantes na estrutura tipo ancoragem.....	71

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de resistência mecânicas das ferragens .....	33
Tabela 2. Distâncias de escoamento em função do grau de poluição .....	33
Tabela 3. Distância mínimas no suporte .....	34
Tabela 4. Distâncias básicas. ....	35
Tabela 5. Cálculo da tensão de operação.....	41
Tabela 6. Cálculo da corrente nominal .....	42
Tabela 7. Cálculo dos parâmetros da linha de transmissão. ....	42
Tabela 8 Cálculo das perdas na linha. ....	42
Tabela 9. Especificação do isolador. ....	43
Tabela 10. Especificação das Ferragens tipo suspensão e ancoragem.....	43
Tabela 11. Cálculo das cagas transversais na estrutura tipo suspensão. ....	44
Tabela 12. Cálculo das cagas verticais e resultante na estrutura tipo suspensão. ....	44
Tabela 13. Cálculo das cagas transversais na estrutura tipo ancoragem. ....	45
Tabela 14. Cálculo das cagas verticais, longitudinal resultante na estrutura tipo ancoragem. ....	45
Tabela 15. Cálculo momento de capotamento. ....	46
Tabela 16. Cálculo momento estabilizador .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SIN	Sistema Interligado Nacional
Cos	Cosseno
Sen	Seno
Tan	Tangente
h	Altura da estrutura
DaN	Decanewton
KN	Quilonewton
mm	Milímetro
Kgf	Quilograma força
KV	Quilovolts
L	Comprimento da linha
V	Tensão
P	Potência
fp	Fator de potência
R	Resistência elétrica
I	Corrente elétrica
$\Delta U$	Queda de tensão
$\Omega$	Ohms
%	Porcentagem
$V_{out}$	Tensão de saída
$F_T$	Força transversal
$F_V$	Força vertical
$F_L$	Força longitudinal
$F_R$	Força resultante
w	Força do vento
w'	Peso do condutor

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
2	Fundamentos .....	16
2.1	Aspecto Elétrico.....	17
2.1.1	Condutores.....	17
2.2	Ferragens e Isoladores.....	18
2.2.1	Cadeias de Suspensão .....	18
2.2.2	Cadeias de Ancoragem .....	20
2.3	Aspecto Mecânico.....	20
2.3.1	Estruturas de Suporte.....	20
2.3.2	Fundações .....	26
3	Cálculo Elétrico e Mecânico.....	30
3.1	Elétricos .....	30
3.1.1	Tensão de operação .....	30
3.1.2	Secção dos condutores.....	31
3.1.3	Perdas de Energia .....	31
3.1.4	Queda de Tensão .....	32
3.1.5	Cálculo das Ferragens e Isoladores.....	32
3.1.6	Distâncias de Segurança .....	33
3.2	Mecânicos .....	35
3.2.1	Estruturas .....	35
3.2.2	Fundações .....	38
4	Estudo de caso .....	41
4.1	Cálculos Elétricos .....	41
4.2	Cálculos Mecânicos .....	44
5	Especificações e Atividade de Campo.....	48
5.1	Planejamento e Controle de projeto:.....	48
5.2	Topografia:.....	50
5.3	Supressão Vegetal, Construção de Acessos: .....	52
5.4	Escavação: .....	53
5.5	Fundações: .....	55
5.6	Distribuição, Montagem Eletromecânica e Implantação de Estruturas.....	57
5.7	Montagem de Cabos condutores .....	59
6	Conclusão .....	62
	Referências .....	64
	ANEXO A.....	65
	ANEXO B .....	66
	APÊNDICE .....	67

# 1 INTRODUÇÃO

Este documento descreve sob a forma de relatório técnico, as atividades desenvolvidas em estágio curricular na área de eletrotécnica, direcionadas para o transporte de energia.

Inicialmente trata da conceituação e classificação das linhas de transmissão, especificando suas principais componentes constituintes, ao levar em conta aspectos técnico-econômicos envolvidos na sua implantação, de modo a viabilizar a execução de um projeto neste domínio.

Na sequência aborda qualitativamente o aspecto eletromecânico do processo de transmissão de energia, considerando descritivos sobre os principais constituintes das partes elétrica e mecânica do projeto e implantação de linha de transmissão entre subestações, com base na geração oriunda de um parque eólico e posterior interligação ao sistema de potência.

Noutro sentido e com base em elementos definidores do projeto de execução, é apresentado um conjunto de relações de interdependência entre as principais grandezas de natureza elétrica e mecânica envolvidas, no sentido de destacar o procedimento quantitativo do seu dimensionamento.

Relativamente às atividades finais desenvolvidas neste período, destacam-se o trabalho de campo de participação e acompanhamento da obra de implantação da linha de transmissão referenciada, bem como, uma síntese de execução de projeto propriamente dito.

Desse modo, foram desenvolvidas tarefas envolvendo especificamente o planejamento e supervisão dos serviços de forma expedita, as quais foram consubstanciadas em relatórios técnicos e memórias periódicas durante o período de estágio, no sentido de acompanhar a evolução físico-temporal da obra e reporte de *status* junto à empresa contratada.

Por outro lado, como forma de materialização do formalismo de adequação desenvolvido neste domínio, um estudo de caso é apresentado, a partir das especificações da linha de transmissão anteriormente proposta entre subestações, o qual foi

posteriormente implementado, por meio de *software* dedicado, consoante com dimensões, grandezas físicas, topografia *in-situ* e limitações estruturais do projeto de execução.

A empresa na qual foi realizado o estágio Energy Eletricidade - LTDA, encontra-se localizada na cidade de Campina Grande e foi fundada pelo engenheiro Luiz Alberto Leite, no ano de 1995, e partir de então, vem atuando no segmento de execução de projetos em instalações elétricas de baixa, média e alta tensão. Mais especificamente, na execução de projetos de Linhas de Transmissão, Subestações, Redes de Distribuição de Energia e Iluminação Pública.

Atualmente o principal ramo de atuação no qual a empresa encontra-se inserida é o eólico, em que vem firmando parcerias junto as empresas do setor, para executar obras de linhas de transmissão de média e alta tensão, assim como na construção e ampliação de subestações.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em descrever sob caráter técnico, as atividades realizadas durante o estágio curricular integrado, direcionado à área correspondente de execução de linhas de transmissão, realizado na empresa Energy Eletricidade.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral do trabalho foram tratados os seguintes itens:

- i. Fundamentar os principais aspectos construtivos eletromecânicos de uma linha de transmissão;
- ii. Fundamentar os cálculos eletromecânicos necessários para especificar os seus componentes;
- iii. Realizar estudo de caso visando a validação dos cálculos apresentados;
- iv. Descrever as atividades de campo.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento, estabelecido em seis capítulos apresenta a seguinte distribuição: O Capítulo 1 é introdutório, contextualiza o trabalho, descreve o local em que foi realizado o estágio, define os objetivos e apresenta a sua distribuição no texto.

No Capítulo 2 é fundamentada a teoria a respeito dos aspectos construtivos eletromecânicos relacionados a uma linha de transmissão, bem como no Capítulo 3, são apresentados os cálculos de maneira sequencial de utilização, necessários durante a etapa de projeto.

No Capítulo 4, como forma de validação e consolidando a discursão teórica apresentada, é realizado um estudo de caso tomando por base os dados presentes no memorial de cálculo fornecido pela empresa contratante.

No capítulo 5 são descritas por meio de relato escrito e fotográfico, as etapas necessárias à execução do projeto da linha de transmissão referenciada, estabelecendo as atividades de campo realizadas. O Capítulo 6 destaca as principais conclusões do estágio e apresenta sugestões de aprimoramento do curso de engenharia elétrica.

## 2 FUNDAMENTOS

As linhas de transmissão de energia elétrica são parte constituinte de um sistema de potência, as quais têm por objetivo interligar os centros de geração e transformação aos centros de consumo.

O sistema de transmissão de energia elétrica é constituído pela rede de transmissão e por uma subestação elevadora de tensão, a qual é classificada segundo o nível de tensão de operação. Segundo tais níveis, estão estabelecidas as classes A1, A2 e A3. A classe A1 representa tensões iguais ou superiores a 230 KV, constituindo a rede básica denominada por Sistema Interligado Nacional (SIN). As classes A2 e A3 representam tensões de 88 a 138 KV e 69 KV respectivamente denominadas redes de subtransmissão.

A especificação dos componentes de uma linha aérea de transmissão, está correlacionada com três aspectos básicos quais sejam, elétricos, mecânicos e econômicos. Aspectos elétricos, nos quais são definidos, a suportabilidade elétrica e níveis de isolamento requisitados, mediante a classe de tensão e potência elétrica transmitida. Aspectos mecânicos, que definirão as solicitações mecânicas as quais as estruturas serão submetidas, tais como a tração, peso dos condutores e influência de fatores externos, como por exemplo ação do vento. Os aspectos econômicos, definirão a viabilidade da execução do empreendimento, como toda prestação de serviço, deverá ser eficiente, confiável e econômica, ou seja, a parcela anual dos investimentos feitos, adicionado aos custos de operação e manutenção devem ser mínimos, a fim de viabilizar a execução do empreendimento. Para tanto, devem ser realizados estudos técnicos a fim de avaliar orçamentos, custos e perdas de energia, e por comparação definir a aplicação técnica e econômica mais viável (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Segundo (LABEGALINI *et al.*, 1992), uma linha de transmissão é composta por seis elementos básicos, quais sejam: fundações, estruturas de suporte, estruturas isolantes, cabos condutores de energia e acessórios, cabos guarda ou para-raios e aterramentos.

Neste sentido será apresentado neste documento os elementos constituintes de uma linha de transmissão, bem como, as metodologias empregadas em suas especificações de natureza elétrica e mecânica.

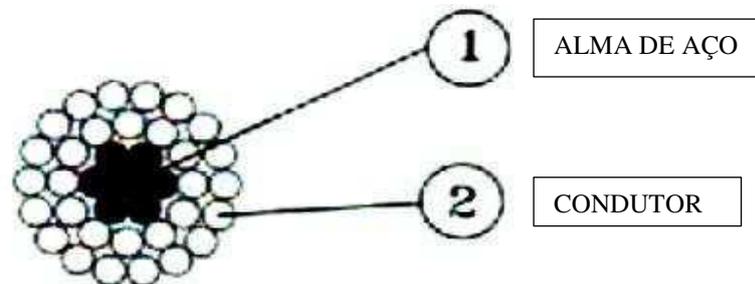
## 2.1 ASPECTO ELÉTRICO

O aspecto elétrico das linhas de transmissão é definido por meio da classe de tensão empregada no transporte de energia elétrica, bem como, a potência a ser transmitida. Com base em tais grandezas é possível estabelecer uma metodologia para tomada de decisão quanto ao uso de condutores, cadeias de isoladores, distâncias básicas de isolamento e parâmetros elétricos básicos, necessários para estabelecer seu a sua funcionalidade operacional.

### 2.1.1 CONDUTORES

Em linhas aéreas de transmissão comumente são empregados cabos nus, obtidos pelo encordoamento de fios metálicos, onde o metal mais empregado em sua fabricação é o alumínio ou alguma liga do mesmo material, podendo ou não possuir alma de aço. A topologia do condutor com alma de aço pode ser observada conforme a Figura 1.

Figura 1. Exemplo de condutor nu com alma de aço.



Fonte: (COMÍN *et al.*, 2008)

O condutor é especificado pelo diâmetro nominal, área de sua seção transversal nominal, o número de fios componentes e pelo metal ou ligas que os constituem. Sob o ponto de vista da aplicação é necessário considerar, além dos cálculos mecânicos, os parâmetros elétricos, tais como, intensidade admissível de tensão em regime permanente e curto circuito, além da queda de tensão por quilômetro de extensão.

## 2.2 FERRAGENS E ISOLADORES

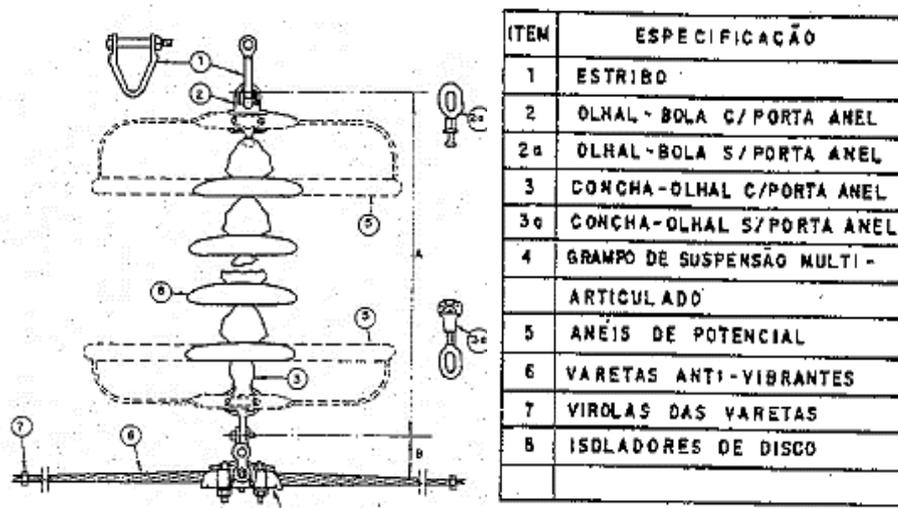
Os condutores das linhas aéreas de transmissão necessitam de isolamento, em relação ao solo, entre si e em relação as estruturas, sendo as primeiras garantidas por distâncias pré-estabelecidas em norma, conforme será discutido mais adiante. A isolamento entre os condutores e as estruturas é garantida pela utilização de cadeias de isoladores, as quais podem ser constituídas pela utilização de porcelana vitrificada, vidro temperado ou material sintético.

As ferragens são responsáveis por garantir a sustentação dos condutores às cadeias de isolamento, as quais devem suportar mecanicamente os esforços a que serão submetidas, e além disso, não devem possuir angulosidades e irregularidades construtivas, haja vista serão fontes de efeito corona, devido a gradientes de potencial superiores aos gradientes iniciadores de eflúvios deste fenômeno (LABEGALINI *et al.*, 1992).

### 2.2.1 CADEIAS DE SUSPENSÃO

As cadeias de isoladores tipo suspensão, possuem como função suportar os condutores, além de promover a devida isolamento. As cadeias do tipo suspensão são submetidas apenas ao peso do condutor e ações do vento, sendo constituídas, basicamente por uma peça de ligação à estrutura, podendo ser empregado o uso de um conector bola - gancho e uma manilha, ou de um conector garfo - bola e uma manilha, conforme observado na Figura 13. Para fixação dos condutores às cadeias, são empregados grampos de suspensão, comumente, constituídos por um conxim de neoprene que abraça o condutor, conforme apontado no item 4 da Figura 2 (LABEGALINI *et al.*, 1992).

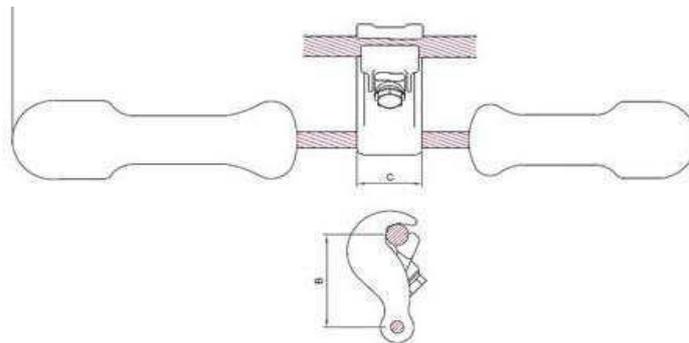
Figura 2. Cadeias de suspensão



Fonte: (LABEGALINI *et al.*, 1992). Pag. 54.

Em virtude dos esforços submetidos sobre os cabos, principalmente de flexão e de cisalhamento é necessário o emprego de mecanismos que mitiguem tais ações, a fim de prolongar o tempo de manutenção e vida útil dos componentes. Para tanto se utilizam amortecedores, comumente do tipo stockbridge conforme apontado na Figura 3, ou tipo vareta conforme mostrado no item 6 da Figura 2 (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Figura 3. Amortecedor tipo Stockbridge.



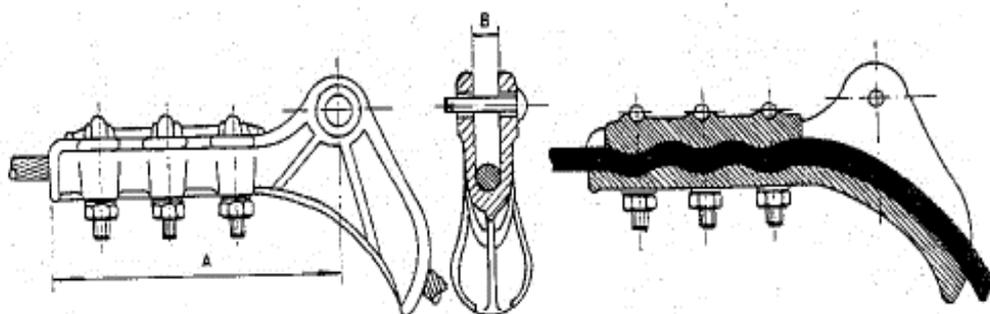
Fonte: (SADEL INDÚSTRICA METALÚRGICA, 2017)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Disponível em [http://www.sadeltransmissao.com.br/produtos.php?p=&k=amortecedores\\_de\\_vibracoes\\_stockbridge&idc=81&cmd=C](http://www.sadeltransmissao.com.br/produtos.php?p=&k=amortecedores_de_vibracoes_stockbridge&idc=81&cmd=C)

### 2.2.2 CADEIAS DE ANCORAGEM

As cadeias de ancoragem, são mais solicitadas mecanicamente quando comparadas com as cadeias de suspensão, pois possuem como papel ancorar os condutores de um tramo, ou seja, entre duas estruturas de ancoragem consecutivas. Portanto são submetidas além do peso do condutor e ações do vento, a um esforço axial transmitido pelos condutores. Estes são presos as cadeias de isolamento por meio de grampo de tensão, conforme ilustrado na Figura 4, dimensionados para suportar entre 110 a 150% da máxima tração de serviço. Assim como nas cadeias de suspensão, também são empregados amortecedores nas cadeias de ancoragem (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Figura 4. Grampa de ancoragem.



Fonte: (LABEGALINI *et al.*, 1992). Pag. 58.

## 2.3 ASPECTO MECÂNICO

Os aspectos mecânicos definem os esforços atuantes nas estruturas, bem como nas fundações, condutores e cadeias de isoladores. Portanto na definição de um projeto de uma linha de transmissão é necessário definir todos os esforços atuantes a fim de estabelecer seus componentes estruturais que atendam com segurança todas as solicitações mecânicas envolvidas.

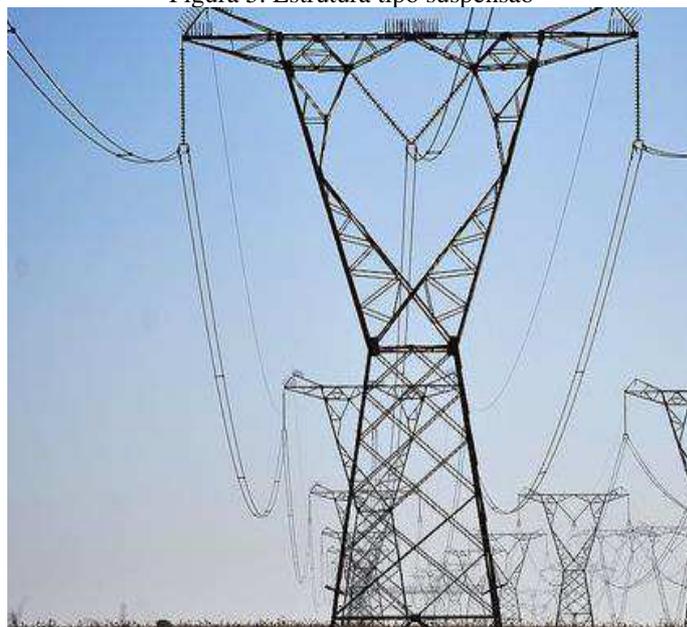
### 2.3.1 ESTRUTURAS DE SUPORTE

As torres de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, possuem como função primária prover sustentação mecânica aos condutores de energia, garantindo as distâncias de segurança entre os condutores energizados, entre os mesmos e os suportes

e entre os condutores e o solo ou qualquer elemento estranho a linha (LABEGALINI *et al.*, 1992). As estruturas são classificadas segundo sua função estrutural e os materiais que as compõe.

Estruturas tipo suspensão são estruturas dispostas em alinhamento ou em pequenos ângulos em relação ao traçado, nessas estruturas não há seccionamento do condutor, que são suspensos pela cadeia de isoladores e ferragens, conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5. Estrutura tipo suspensão



Fonte: (IBASE, 2017) <sup>2</sup>.

Estruturas tipo ancoragem, de maneira antagônica a anterior, seccionam mecanicamente o condutor, conforme observado na Figura 6. São responsáveis por sustentar a tração exercida pelos condutores no tramo.

---

<sup>2</sup>Disponível em <http://ibase.br/pt/wp-content/uploads/2015/08/linhas-de-transmissao-energia-economia-20120914-02-size-598.jpg>

Figura 6. Estrutura tipo ancoragem



Fonte: (EEP, 2014)<sup>3</sup>

Nos casos que as estruturas tipo ancoragem são constituídas de concreto ou madeira, para angulações ou para estruturas em alinhamento, é necessário o emprego de *Post Line*, que serve como sustentação do *jumper*, para que a distância de segurança prevista em norma seja obedecida, conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7. Estrutura tipo ancoragem com uso de post line



Fonte: autoria própria.

---

<sup>3</sup>Disponível em: <http://electrical-engineering-portal.com/analysing-the-costs-of-high-voltage-direct-current-hvdc-transmission>

Estruturas para ângulos, de maneira análoga a anterior, seccionam mecanicamente o condutor, com a dessemelhança no tocante à presença de angulações obtusas em relação ao traçado, conforme pode ser visto na Figura 8. São aplicadas quando há necessidade de alterar drasticamente o alinhamento da linha de transmissão, face as características do terreno no qual será realizado o empreendimento, como por exemplo obstáculos físicos que impeçam a continuidade do alinhamento ou até falta de negociação por parte de proprietários dos terrenos.

Figura 8. Estrutura tipo ângulo.



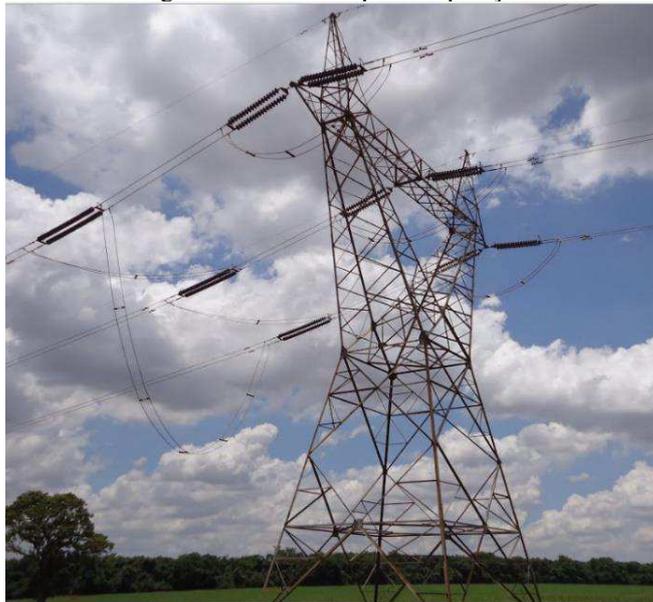
Fonte: (SETOR ENERGÉTICO, 2017)<sup>4</sup>

Estruturas de transposição de fases, são empregadas comumente em linhas longas, nas quais a presença da indutância nos condutores se tornam apreciáveis, e, portanto, resultando em um circuito desequilibrado. Logo por meio da alteração na geometria da linha é possível mitigar tais efeitos, para tanto inverte-se as fases, conforme observado na Figura 9 (GRAINGER e STEVENSON, 1994).

---

<sup>4</sup>Disponível em: <http://www.setorenergetico.com.br/governo-regulamentacao/projeto-crescer-governo-federal-inclui-35-lotes-de-linhas-de-transmissao/21727/>

Figura 9. Estrutura tipo transposição.



Fonte: (JUNIOR, 2013)<sup>5</sup>

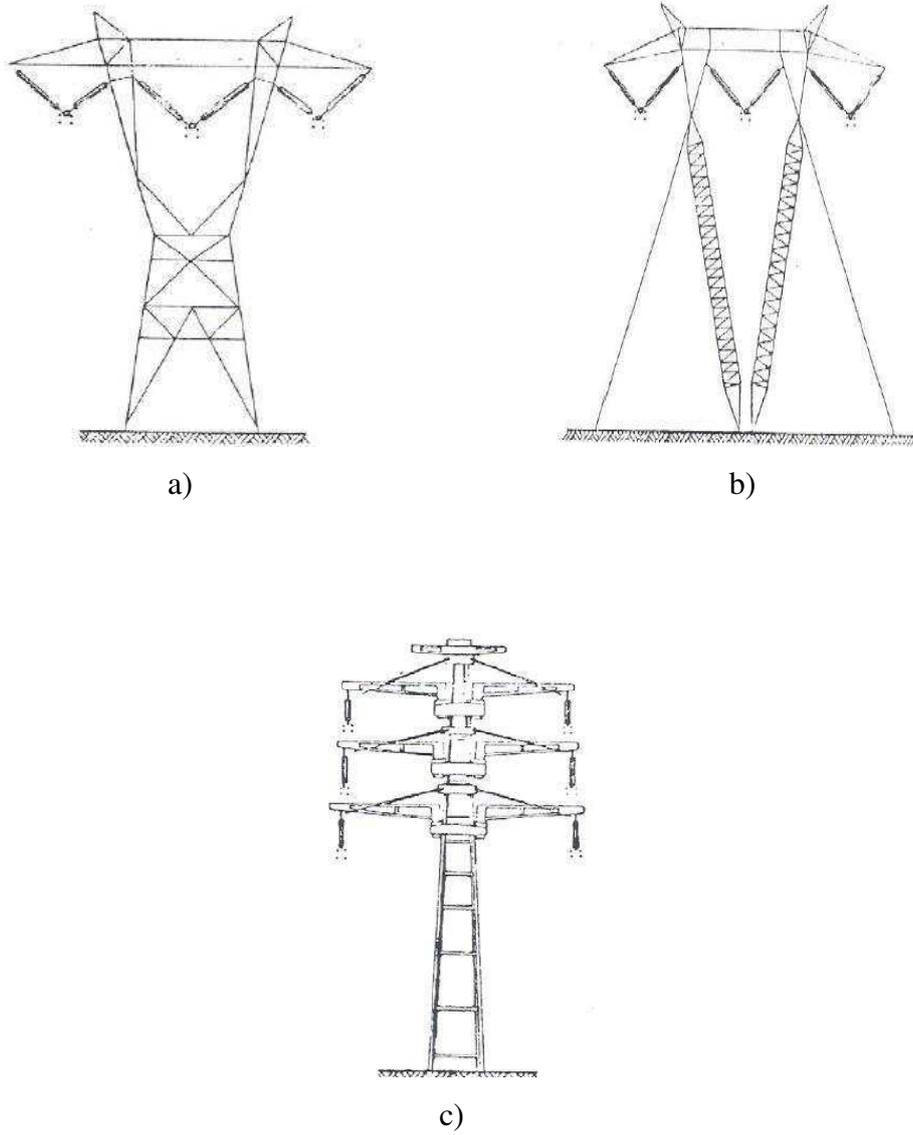
Basicamente os materiais empregados na confecção de estruturas, são metais e concreto. As estruturas metálicas são constituídas de aço carbono comum, alumínio ou liga de alumínio, empregados em estruturas treliçadas (Autoportante ou estaiada), conforme pode ser visto nas Figuras 6 a) e b), respectivamente. São amplamente utilizados em empreendimentos, pois possuem alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão, baixo peso específico e baixo custo de produção, além facilidade de transporte, e versatilidade quanto à topologia. A grande desvantagem desse tipo de estruturas é a faixa de servidão ocupada, logo não são empregadas em centros urbanos, ou em locais onde a faixa de servidão é limitada por fatores físicos ou econômicos (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Estruturas em concreto armado, conforme observado na Figura 10 c). São comumente empregadas em localidades onde há pouca disponibilidade para configuração da faixa de servidão, além disso possuem como vantagem na aplicação o fato de que podem ser pré-fabricados nas proximidades dos locais de uso. A grande desvantagem consiste na necessidade de empregar equipamentos especiais para transporte e implantação, além de serem extremamente pesadas havendo a possibilidade de danificação durante o manuseio (LABEGALINI *et al.*, 1992).

---

<sup>5</sup>Disponível em: <http://www.panoramio.com/photo/99539286>

Figura 10. Tipos de estruturas



Fonte: (PLENA TRANSMISSORAS, 2008) pag.8.

### 2.3.2 FUNDAÇÕES

A fundação de uma estrutura é responsável por transmitir ao solo todas as solicitações mecânicas existentes em sua base, como consequência direta da atuação dos diferentes esforços. De tal sorte que garanta a estabilidade pelo equilíbrio entre os esforços solicitantes e as solicitações do terreno (COMÍN *et al.*, 2008).

A depender do tipo de estrutura empregada e do terreno, as fundações utilizadas podem ser classificadas como fracionadas e simples. As fundações simples, são empregadas em casos nos quais se aplicam postes simples conforme observado na Figura 11 e, portanto, a fundação é dimensionada em função das características do terreno e dos esforços aplicados na estrutura (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Figura 11. Fundação simples.

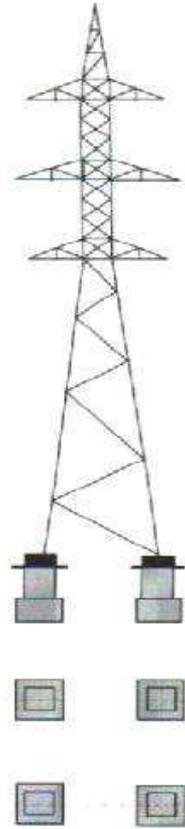


Fonte: (COMÍN *et al.*, 2008). pag 664.

As fundações fracionadas são comumente utilizadas em torres autoportantes, conforme observado na Figura 12, pois estas possuem grandes espaçamentos entre as bases, logo é mais economicamente viável, dimensionar para cada pé da torre, uma fundação própria. Além das torres autoportantes a fundação fracionada é aplicada em

estruturas estaiadas, exigindo uma fundação central e funções isoladas para ancoragem dos estais.

Figura 12. Fundação fracionada.



Fonte: (COMÍN *et al.*, 2008). pag 665

Os métodos construtivos mais comuns empregados na execução das fundações são: fundações em grelhas, tubulões, em sapatas de concreto e plantio de postes

As fundações em grelhas, comumente aplicadas em fundações fracionadas, são constituídas do mesmo material das torres e indicadas para terrenos secos que sejam suficientemente resistentes para absorver com segurança os esforços de tração, compressão e horizontais. Destaca-se a geometria deste tipo de fundação, em que a grelha possui formato piramidal conforme pode ser visto na Figura 13, tal formato possibilita a absorção dos esforços de flexão sem deformar as pernas das torres.

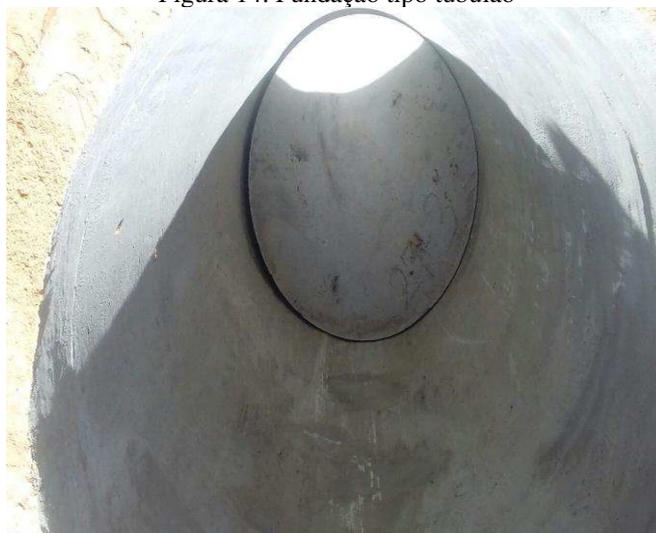
Figura 13. Fundação tipo grelha.



Fonte: (ENTRAN, 2017)<sup>6</sup>

As fundações tipo tubulão, conforme pode ser visto na Figura 14, são empregadas em terrenos argilosos, siltosos ou arenosos, fabricadas em concreto do tipo armado, são capazes de absorver por atrito lateral e por compressão da sua base os esforços verticais.

Figura 14. Fundação tipo tubulão



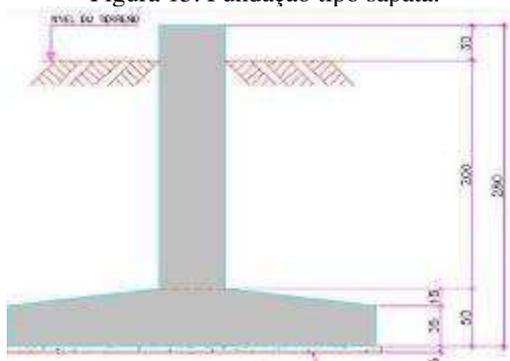
Fonte: autoria própria.

As fundações do tipo sapatas, conforme ilustrada na Figura 15, são bases com escavação em formar quadradas ou retangulares, executas em concreto armado de formato piramidal, são empregados em solos com baixa resistência mecânica à compressão e, portanto, não aplicadas em estruturas do tipo ancoragem (LABEGALINI *et al.*, 1992).

---

<sup>6</sup> Disponível em <http://www.entran.com.br/pc-de-grelha>

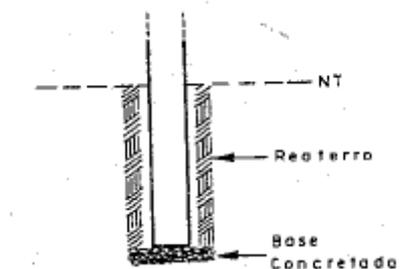
Figura 15. Fundação tipo sapata.



Fonte: (PORTAL METÁLICA, 2017)<sup>7</sup>

O plantio de postes, consiste em engasta-los na base em aberturas cilíndricas feitas no solo, conforme pode ser visto na Figura 16, nesse método construtivo quando os esforços compressivos nas bases das estruturas, são superiores à resistência do terreno, não é necessário realizar a concretagem. Portanto a estrutura é fixada no solo empregando areia adensada para realização do reaterro.

Figura 16. Fundação tipo plantio de poste.



Fonte : (LABEGALINI *et al.*, 1992). Pag. 471.

<sup>7</sup> Disponível em <http://www.metalica.com.br/torres-de-transmissao-de-energia>

## 3 CÁLCULO ELÉTRICO E MECÂNICO

Nesta seção serão abordadas metodologias para realizar cálculos eletromecânicos dos componentes de uma linha de transmissão, conforme a ordem descrita nas seções anteriores, serão apresentados a priori os cálculos elétricos e a posteriori os cálculos mecânicos os quais serão validados em estudo de caso apresentado na próxima seção.

### 3.1 ELÉTRICOS

Linhas aéreas de transmissão em corrente alternada, possuem resistência, indutância e capacitância uniformemente distribuídas ao longo de seu comprimento. A resistência está relacionada com as perdas ôhmicas, a impedância em série, incluindo a resistência e a reatância indutiva produzem quedas de tensão ao longo da linha e capacitância em derivação gera a corrente de carregamento da linha, afetando a estabilidade, rendimento e fator de potência (GRAINGER e STEVENSON, 1994).

A depender do comprimento da linha, são empregados diferentes modelos de circuitos a fim de melhor representar seus parâmetros. Segundo (GRAINGER e STEVENSON, 1994), para linhas curtas de até 80 km, resistência e reatância são tratados como elementos concentrados, para linhas entre 80 e 240 km usa-se o modelo pi nominal e para linha com comprimento superior a 240 km, emprega-se o modelo pi exato. Cabe destacar que o modelo que será empregado no presente trabalho é o modelo para linhas curtas, pois a extensão da linha é de 32 Km.

#### 3.1.1 TENSÃO DE OPERAÇÃO

Baseado na distância e potência a serem transmitidas, pode-se empregar critérios na tomada de decisão quanto ao nível de tensão empregado na transmissão de energia elétrica. Sabe-se que a escolha da classe de tensão pode ser baseada em estudos criteriosos a fim de minimizar os encargos e otimizar os custos.

Dada a complexidade para realizar levantamentos econômicos, métodos como de Alfred Still para linhas longas equacionado segundo a fórmula (1) abaixo, vem sendo empregado na tomada de decisão quanto a determinação da classe de tensão empregada.

$$V = 5,5 \sqrt{0,62 \cdot L + \frac{P}{100}} \quad (1)$$

Em que:

$V$ : é tensão obtida em KV;

$L$ : é o comprimento da linha em Km;

$P$ : é a potência transmitida em KW.

Para linhas com comprimento inferior a 30 Km, a equação (2) produz resultados bem apreciáveis.

$$V = 0,25\sqrt{P} \quad (2)$$

### 3.1.2 SECÇÃO DOS CONDUTORES

Para estabelecer a secção transversal do condutor, é necessário conhecer a corrente elétrica de serviço atuante no circuito, para tanto, basta empregar a equação (3) abaixo

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot fp} \quad (3)$$

Em que:

$I$ : é corrente de serviço em A;

$P$ : é a potência transmitida em KW;

$V$ : é tensão em KV;

$fp$ : é o fator de potência.

Conhecida a corrente de operação do sistema, é possível especificar um condutor que atenda às necessidades de transmissão de energia elétrica, para tanto além de possuir uma secção transversal que suporte a corrente elétrica, o condutor deve possuir como maior queda de tensão valores inferiores a 5% da tensão de operação, bem como a maior perda de potência deve ser inferior a 2% da potência a ser transmitida.

### 3.1.3 PERDAS DE ENERGIA

Em suma as perdas de energia são associadas ao efeito joule, oriundo da passagem da corrente elétrica pelo condutor. Para se obter uma aproximação da potência dissipada pelo efeito joule é necessário ter posse do valor da resistência do condutor por unidade de quilômetro, valor no qual é fornecido pelo fabricante. Portanto emprega-se a equação (4) para calcular a perda de potência ao se transmitir energia elétrica em linhas curtas.

$$P_{perda} = 3. R. I^2 l \quad (4)$$

Em que:

$P_{perda}$ : é a potência dissipada por efeito joule em KW;

$R$ : é a resistência fornecida pelo fabricante em  $\Omega/\text{Km}$ ;

$I$ : é corrente de serviço em A;

$l$ : é o comprimento da linha em Km.

### 3.1.4 QUEDA DE TENSÃO

Para linhas curtas, a queda de tensão entre a emissão e recepção é calculada em função da resistência em série associada a reatância indutiva por fase. A susceptância capacitiva e a condutância em paralelo são consideradas desprezíveis (GRAINGER e STEVENSON, 1994). Portanto emprega-se a equação (5) abaixo para estimar a queda de tensão na recepção da linha de transmissão

$$|\Delta U|_{\%} = \frac{P. l. (R'_{\theta} + X' \tan(\varphi))}{U_{out}^2} . 100 \quad (5)$$

Em que:

$|\Delta U|_{\%}$ : é a queda de tensão em %;

$R_{\theta}$ : é a resistência em série por fase em  $\Omega$ ;

$X$ : é a reatância indutiva por fase em  $\Omega$ ;

$P$ : é a Potência demanda pela carga;

$\varphi$ : ângulo formado ente a tensão de entrada e a corrente na linha;

$l$ : é o comprimento da linha em Km;

$U_{out}$ : é a tensão na carga.

### 3.1.5 CÁLCULO DAS FERRAGENS E ISOLADORES

As ferragens das cadeias, segundo a NBR 7095 são especificadas por sua resistência à tração e definidas segundo as classes de resistência, conforme mostrado na Tabela 1 abaixo. Tendo como fator determinante para sua classe, a tensão máxima de ruptura do condutor empregado, escolhe -se a classe imediatamente superior a tensão máxima de ruptura (ABNT, 1981).

Tabela 1. Classes de resistência mecânicas das ferragens

<b>KN</b>	<b>Kgf</b>	<b>Diâmetro do pino do isolador (mm)</b>
80	8000	16
120	12000	16
160	16000	20
240	24000	24

Fonte: (ABNT, 1981) Pag.6.

Para definição do tipo de isolador, é necessário ter posse de 4 parâmetros básicos, o primeiro denominado por linha de escoamento, calcula-se em detrimento ao grau de poluição apresentado no local do empreendimento conforme mostrado na equação (6) abaixo, para tanto se utiliza da Tabela 2 para determinar a mínima distância de escoamento em função do grau de poluição. (IEC, 1996).

$$L_e = V_{max} \cdot D_e \quad (6)$$

Em que:

$L_e$ : Linha de escoamento (*mm*);

$D_e$ : Distância de escoamento (*mm/Kv*);

$V_{max}$ : Máxima tensão admissível (*V*)

Tabela 2. Distâncias de escoamento em função do grau de poluição

<b>Grau de Poluição</b>	<b>Mínima distância de escoamento (mm/kV)</b>
I - Quase nada	16
II - Meio	20
III - Forte	25
IV - Muito forte	31

Fonte: (IEC, 1996).

Após calculado o limite de escoamento, é necessário conhecer o nível de tensão nominal que se deseja operar, bem como as tensões nominais suportadas a descargas atmosféricas e de curta duração a frequência industrial. E então escolher no catálogo do fabricante um isolador que atendas as solicitações eletromecânicas.

### 3.1.6 DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA

Segundo a (ABNT, 1985), as distâncias de segurança são os afastamentos mínimos recomendados do condutor e seus acessórios energizados e quaisquer

partes, energizadas ou não, da própria linha, do terreno ou dos obstáculos atravessados

Portanto na execução de um projeto de uma linha de transmissão é imprescindível obedecer às distâncias preconizadas em norma, para garantir a segurança na operação do sistema, bem como garantir seu normal funcionamento no que se refere a sensibilização de relés de proteção, que poderão atuar caso o sistema enxergue um curto fase terra por exemplo, quando não se respeita uma distância em relação a uma das fases a um estai.

Segundo a (ABNT, 1985), as distâncias mínimas em relação aos suportes podem ser estabelecidas segundo as recomendações prescritas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Distância mínimas no suporte

Descrição		Distâncias mínimas
Mesmo circuito	Distância horizontal entre fases para $U \leq 50$ kV	Tomar o maior valor entre: a) $D = 0,22 + 0,01 D_U$ b) $D = 0,37 \sqrt{F} + 0,0076 D_U$
	Distância vertical entre fases para $U \leq 50$ kV	1,0 metro
	para $U > 50$ kV	não especificado
Circuitos Diferentes	Distância horizontal entre fases	Tomar o maior valor entre: a) $D = 0,22 + 0,01 D_U$ b) $D = 0,37 \sqrt{F} + 0,0076 D_U$
	Distância vertical entre fases	$D = 0,50 + 0,01 D_U$ , respeitado o mínimo de 1,0 metro
Distância entre fase e cabo para-raios		$D = 0,22 + 0,01 D_U$
Distância entre partes vivas e aterradas:		
- elementos do suporte		$D = 0,03 + 0,005 D_U$
- estais		$D = 0,09 + 0,006 D_U$

Fonte: (ABNT, 1985). Pag.22.

Ainda de acordo com a (ABNT, 1985), para níveis de tensão inferiores a 87 KV as distâncias básicas a serem praticadas serão de acordo com a Tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Distâncias básicas.

Natureza da região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica a (m)	Seção de Referência	Figura no Anexo A
Locais acessíveis apenas a pedestres	6,0		8
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,5		-
Rodovias, ruas e avenidas	8,0		9
Ferrovias não eletrificadas	9,0		10
Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12,0		-
Suporte de linha pertencente à ferrovia	4,0		-
Águas navegáveis	H +2,0	10.3.1.4	11
Águas não navegáveis	6,0		-
Linhas de energia elétrica	1,2	10.3.1.5	12
Linhas de telecomunicações	1,8		12
Telhados e terraços	4,0	10.3.1.6	13
Paredes	3,0	10.3.1.7	14
Instalações transportadoras	3,0		15
Veículos rodoviários e ferroviários	3,0	10.3.1.8	16

Fonte: (ABNT, 1985). Pag.25.

## 3.2 MECÂNICOS

Para definir qual o esforço da estrutura que será empregada numa linha de transmissão é necessário calcular os esforços atuantes mediante a ações do vento, tensões mecânicas e o próprio peso da estrutura. Portanto deve-se especifica-las segundo suas solicitações mecânicas e funções na linha de transmissão, além disso é necessário estabelecer o tipo de fundação na qual a estrutura será inserida e se esta atende aos pré-requisitos normativos de segurança.

### 3.2.1 ESTRUTURAS

Para definir qual o esforço da estrutura que será empregada numa linha de transmissão é necessário calcular os esforços atuantes mediante a ações do vento, tensões mecânicas e o próprio peso da estrutura. A definição dos cálculos é baseada segundo a função das estruturas.

Para estruturas tipo suspensão, segundo (DIREÇÃO DE SERVIÇOS DE ENGENHARIA, 1993), considera-se duas hipóteses para fins de cálculo dos esforços mecânicos.

Na hipótese 1, é definido que a sobrecarga do vento atua normalmente à direção da linha, sobre o poste, sobre os isoladores, condutores e cabos guarda, para tanto calcula-se o esforço transversal segundo a equação (7) abaixo.

$$F_T = 3 \cdot w \cdot \left[ \frac{S_1 + S_2}{2} \right] \quad (7)$$

Em que:

$F_T$ : é o esforço transversal em daN;

$w$ : é a força do vento sobre os condutores em daN/m;

$S_1$  e  $S_2$  são os vão adjacentes ao poste em m.

Ainda no conexo da hipótese 1, calcula-se o esforço vertical devido ao peso dos próprios condutores, conforme evidenciado na equação (8)

$$F_V = 3 \cdot w' \cdot \left[ \frac{S_1 + S_2}{2} \right] + 3 \cdot P_{cadeias} + P_{cruz} + P_{fo} \cdot \left[ \frac{S_1 + S_2}{2} \right] \quad (8)$$

Em que:

$F_V$ : é o esforço vertical devido ao peso dos condutores em daN;

$w'$ : é o peso do condutor em daN/m;

$S_1$  e  $S_2$  são os vão adjacentes ao poste em m;

$P_{cadeias}$ : é o peso das cadeias de isolamento em daN;

$P_{cruz}$ : é o peso da cruzeta em daN;

$P_{fo}$ : é o peso da fibra óptica em daN.

A segunda hipótese, é definido que a força horizontal, deve ter valor igual a um quinto das forças provenientes da ação do vento, portanto o esforço horizontal é calculado segundo a equação (9) abaixo.

$$F_L = \frac{F_T}{5} \quad (9)$$

Em que:

$F_L$ : é o esforço horizontal longitudinal em daN;

$F_T$ : é o esforço horizontal transversal em daN.

Para estruturas em ângulo, segundo (DIREÇÃO DE SERVIÇOS DE ENGENHARIA, 1993), considera-se de maneira análoga a anterior duas hipóteses para fins de cálculo dos esforços mecânicos, com a ressalva que deve-se considerar a presença de um força longitudinal, dada pela tração do condutor em função do ângulo existente.

Para o cálculo do esforço horizontal transversal tem-se

$$F_T = 3. (w. \cos^2(\beta)). \left[ \frac{S_1 + S_2}{2} \right] + 2. T. \sin(\beta) \quad (10)$$

Em que:

$F_T$ : é o esforço horizontal transversal em daN.

$w$ : é a força do vento sobre os condutores em daN/m;

$S_1$  e  $S_2$  são os vão adjacentes ao poste em m;

$\beta$  : é o ângulo do poste em °;

$T$ : é a tração exercida pelo condutor em daN.

Para o cálculo do esforço vertical tem-se

$$F_V = 3. w'. \left[ \frac{S_1 + S_2}{2} \right] \quad (11)$$

Em que:

$F_V$ : é o esforço vertical em daN.

$w'$ : é o peso do condutor em daN/m;

$S_1$  e  $S_2$  são os vão adjacentes ao poste em m.

Para o cálculo do esforço horizontal longitudinal tem-se

$$F_L = 3. T. \cos(\beta) \quad (12)$$

Em que:

$F_L$ : é o esforço horizontal longitudinal em daN;

$\beta$  : é o ângulo do poste em °;

$T$ : é a tração exercida pelo condutor em daN.

Calcula-se o esforço horizontal empregando a mesma equação para a estrutura tipo suspensão.

Portanto após realizar os cálculos supracitados escolhe-se a estrutura na qual satisfaça os esforços calculados, para tanto o fabricante deve fornecer em seu catálogo o digrama de esforços úteis da estrutura, além disso deve-se escolher a altura do poste que satisfaça as alturas mínimas prescritas na norma NBR 5422.

### 3.2.2 FUNDAÇÕES

A profundidade da escavação é estabelecida, em conformidade com a equação (13) (COMÍN, VECINO, *et al.*, 2008).

$$t = 0,10 \cdot h + 0,5 \quad (13)$$

Sendo:

$t$ : Profundidade da fundação

$h$ : Altura da estrutura

Para fins de cálculo, e análise quanto a segurança de fundações em estruturas lineares verticais quando sujeitas a ações transversais, emprega-se método de Sulzberger. Método no qual define como condição de estabilidade expressa pela equação (14).

$$M_1 + M_2 \geq K \cdot M_v \quad (14)$$

Em que:

$M_1$ : Momento estabilizador devido as reações laterais do terreno;

$M_2$ : Momento estabilizador devido as reações verticais do terreno;

$M_v$ : Momento de capotamento;

$K$ : Coeficiente de segurança. Este coeficiente pode ser 1.2 para condições anormais e 1.5 para condições normais.

O momento de capotamento é expresso segundo a equação (15) abaixo:

$$M_v = M_{v1} + M_{v2} \quad (15)$$

Em que:

$M_{v1}$ : Momento de capotamento devido ao esforço  $F$ ;

$M_{v2}$ : Momento capotamento devido a ação do terreno;

O cálculo Momento de capotamento  $M_{v1}$ , é dado pela seguinte expressão:

$$M_{v1} = F * \left( h_t + c - h_0 - \frac{1}{3} * t \right) \quad (16)$$

Em que:

$F$ : Força aplicada na parte superior da estrutura (kg).

$h_t$ : Altura total da estrutura (m).

$c$ : Espessura da estrutura (m).

$h_0$ : Altura donde se aplica o esforço  $F$  (m).

$t$ : Profundidade da fundação (m).

O cálculo Momento de capotamento devido a esforço devido as ações do vento sobre a estrutura  $M_{v2}$ , é dado pela seguinte expressão:

$$M_{v2} = F_v * \left( \frac{h_t}{2} + \frac{2 * t}{3} \right) \quad (17)$$

Em que:

$F_v$ : Força aplicada pelas ações do vento (kg)

$h_t$ : Altura total da estrutura (m).

$t$ : altura da fundação (m)

O momento estabilizador devido as ações laterais é expresso segundo a equação (18) abaixo:

$$M_1 = \frac{b \cdot h^3}{36} C_h \tan \alpha \left( H_L + \frac{2}{3} \cdot h \right) \quad (18)$$

Em que:

$b$ : Espessura da fundação em m;

$h$ : Profundidade da fundação em m;

$\alpha$ : Ângulo máximo de giro da fundação, para  $\tan \alpha = 0,01$ ;

$C_h$ : Coeficiente de compressibilidade do solo ( $\text{kg/m}^3$ ). A fórmula para o cálculo de  $C_h$  tendo em conta o fator de compressibilidade a 2 metros é dada pela equação abaixo, em que  $C_2$  é definido, segundo tabela no anexo I.

$$C_h = h * \frac{C_2}{2} \quad (19)$$

O momento estabilizador devido as ações verticais é expresso segundo a equação (20) abaixo:

$$M_2 = (P_{est} + P_{fund}) * a * \left[ 0,5 - \frac{2}{3} * \sqrt{\frac{(P_{est} + P_{fund})}{2 * a^2 * b * C_h * 10^6 * \tan \alpha}} \right] \quad (20)$$

Em que:

$P$ : Peso, possui 2 componentes. Peso da estrutura ( $P_{est}$ ) e o peso da Fundação ( $P_{fund}$ ).

$a=b$ : Largura de fundação (m)

$C_h$ : Fator de compressibilidade do terreno ( $\text{kg/m}^3$ ). Idem ao caso anterior para cálculo de  $C_h$ . Portanto, ao se calcular os momentos e estes satisfazendo a condição inicial explicitada pela equação 7, pode-se afirmar que os parâmetros da função atendem os requisitos normativos de segurança.

## 4 ESTUDO DE CASO

Nesta seção serão apresentados os cálculos elétricos e mecânicos da linha de transmissão na qual foi realizado o estágio. A fim de validar as metodologias apresentadas nas seções anteriores e a partir disso inferir sobre os resultados obtidos comparando-os com os aplicados durante a execução da obra. Para tanto foi criada uma planilha com auxílio *software* Microsoft Excel, na qual foram realizados os cálculos descritos na seção anterior, onde maiores detalhes desta etapa encontram-se em apêndice específico.

### 4.1 CÁLCULOS ELÉTRICOS

A primeira etapa consiste em realizar os cálculos elétricos conforme discutido na seção 2.4.1. deste relatório. Para tanto foram inseridos os dados de comprimento e potência da linha a fim de estabelecer a tensão de operação, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5. Cálculo da tensão de operação

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>CÁLCULOS ELÉTRICOS - LT 69 KV PEDRA RAJADA</b>										
3	<b>DADOS DE ENTRADA</b>							<input type="checkbox"/> Linha Longa <input checked="" type="checkbox"/> Linha Curta			
5	<b>DEFINIÇÃO DA CLASSE DE TENSÃO</b>										
7	Comprimento da Linha [Km]					32					
8	Potência da linha [KW]					50000					
9	Tensão Calculada [KV]					55.90					
10	Classe de tensão operacional [KV]					69					
11											

Fonte: autoria própria.

Definida a classe de tensão de operação a próxima etapa consiste em definir a corrente elétrica da linha conforme observado na Tabela 6.

Tabela 6. Cálculo da corrente nominal

DEFINIÇÃO DA CORRENTE DE OPERAÇÃO	
Frequência [Hz]	60
Fator de Potência	0.95
Número de Circuitos	1
Número de Condutores por fase	1
Corrente de Operação [A]	440.39



Fonte: autoria própria.

A posteriori com auxílio do catálogo do fabricante, foi possível calcular os parâmetros da linha para o tipo de condutor especificado no projeto, conforme pode ser visto na Tabela 7, neste caso o condutor analisado foi o tipo Rail o qual possui suas características elétricas em conformidade com o catálogo presente no anexo B. Portanto foram avaliadas as perdas de energia, bem como a queda de tensão ocasionadas pela impedância intrínseca do condutor, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 7. Cálculo dos parâmetros da linha de transmissão.

PARÂMETROS DA LINHA	
Condutor	Rail
D12 [mm]	1000
D31 [mm]	2000
D23 [mm]	11000
DME [mm]	2.80
RMG [m]	1.17E-02
(r) Resistência Elétrica [ $\Omega$ /Km]	7.33E-02
(C) Capacitância [F/m]	1.02E-08
(y) Admitância [ $\Omega$ /Km]	3.83E-06
(L) Indutância [H/Km]	1.10E-03
(x) Reatância [ $\Omega$ /m]	4.13E-01
(Y) Admitância [ $\Omega$ ]	1.22E-04
(X) Reatância [ $\Omega$ ]	1.32E+01



Fonte: autoria própria.

Tabela 8 Cálculo das perdas na linha.

PERDAS NA LINHA	
Vs [KV]	74.90
Is [A]	440.39
PERDAS DE ENERGIA [KW]	1435
PERDAS DE ENERGIA [%]	3%
QUEDA DE TENSÃO [%]	2.60%

Fonte: autoria própria.

Definidos os condutores a próxima etapa consiste em especificar os isoladores e suas respectivas ferragens, para tanto é necessário conhecer o nível de tensão aplicado e estimar o nível de poluição local, para então calcular a linha de escoamento em conformidade com a Tabela 9 e partir disso verificar no catálogo do fabricante o modelo que atenda aos requisitos elétricos. Cabe destacar que além dos critérios elétricos o isolador deve atender o critério mecânico e, portanto, deve ser capaz de suportar a máxima tensão de ruptura do condutor.

Tabela 9. Especificação do isolador.

DEFINIÇÃO DO ISOLADOR		
52	Tensão Max [KV]	72.45
53	Distância de Escoamento [mm/KV]	Muito Forte
54	Linha de escoamento [mm]	2246
55	Máxima Tensão de Ruptura do Condutor [daN]	11540
56	Esforço da cadeia [daN]	12000
57	Esforço da cadeia [N]	120000
58	Isolador Selecionado	ISI - ROK-A09+8-120 -SB
59	Nº de Cadeia de Isoladores	3
60	Massa da cadeia [Kg]	4.4
61	Peso do Condutor [daN/m]	12.95

Fonte: autoria própria.

As ferragens são definidas segundo suas funções, para cadeias tipo suspensão ou ancoragem, logo em consonância com a afirmação anterior também devem ser especificadas a fim de suportar a máxima tensão de ruptura do condutor, conforme pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10. Especificação das Ferragens tipo suspensão e ancoragem

DEFINIÇÃO DAS FERRAGENS - CADEIAS DE SUSPENSÃO		
64	GRAMPA TIPO SUSPENSÃO	Liga 954 MCM CAA -RAIL
65	Massa da cadeia [Kg]	2.3
66	Nº de Cadeia de Isoladores	3
67	Peso da Ferragem [daN]	6.77
68	RESISTÊNCIA MECÂNICA [daN]	12000
DEFINIÇÃO DAS FERRAGENS - CADEIAS DE ANCORAGEM		
71	GRAMPA TIPO ANCORAGEM	Liga 954 MCM CAA -RAIL
72	Massa da cadeia [Kg]	3.14
73	Nº de Cadeia de Isoladores	3
74	Peso da Ferragem [daN/m]	9.24
75	RESISTÊNCIA MECÂNICA [daN]	12000

Fonte: autoria própria.

Ao término desta etapa foi possível realizar todos os cálculos elétricos propostos na discursão teórica do presente relatório e com isso especificar os parâmetros elétricos da linha de transmissão. Portanto é possível inferir que os cálculos realizados estão em conformidade com as especificações descritas no memorial de cálculo da linha de transmissão.

Cabe destacar que a escolha de outro tipo de condutor poderia incorrer em menores perdas de energia, como por exemplo do condutor tipo Bluejay, que promove uma perda de energia de aproximadamente 1% a menos em relação condutor tipo Rail, tornando a linha mais eficiente. Porém é prudente destacar que a escolha do tipo de condutor também está correlacionada com seu preço de mercado, pois é o componente mais dispendioso da linha de transmissão, portanto devem ser feitos estudos mais detalhados a fim de estabelecer qual possui o melhor custo benefício quando aplicados.

## 4.2 CÁLCULOS MECÂNICOS

A segunda etapa consiste em realizar os cálculos mecânicos a fim de estabelecer qual tipo de estrutura será empregada na construção da linha de transmissão, bem como verificar se a fundação escolhida atende aos requisitos mecânicos necessários.

O primeiro passo desta etapa consiste em calcular os esforços atuantes na estrutura tipo suspensão, os quais são as cargas verticais e transversais, conforme pode ser visto na Tabela 11 o cálculo da carga vertical atuante na estrutura, bem como na Tabela 12 tem-se o cálculo das cargas transversais e o esforço resultante entre as duas forças obtidas.

Tabela 11. Cálculo das cargas transversais na estrutura tipo suspensão.

ESTRUTURA TIPO SUSPENSÃO - CARGA TRANSVERSAL		
25	Coefficiente de Redução	0.6
26	Coefficiente de Forma	1
27	Pressão dinâmica do vento	750
28	Área da Superf.	29.59
29	Força do vento [daN]	1.332
30	Total de forças Transversais Ft [daN]	689.20

Fonte: autoria própria.

Tabela 12. Cálculo das cargas verticais e resultante na estrutura tipo suspensão.

ESTRUTURA TIPO SUSPENSÃO - CARGA VERTICAL		
3		
4		
5	Condutor	Rail
8	Vão médio [m]	150
9	Nº de Condutores	3
10	Peso do Condutor [daN/m]	1.570
11	Peso Total do Condutor [daN]	706.40829
12	Nº de Cadeia de Isoladores	3
14	Peso do Isolador [daN]	12.95
15	Peso da Ferragem [daN]	6.77
16	Peso da Cadeia [daN]	19.72
18	Peso da F.O [daN]	88.00
19	Peso do Cabo G. [daN]	15.89
20	Peso da Cruzeta [daN]	166.77
21	Total de forças verticais Fv [daN]	996.78
32	Resultante [daN]	1211.85

Fonte: autoria própria.

De forma análoga a anterior calcula-se os esforços atuantes na estrutura tipo ancoragem, com acréscimo do cálculo do esforço longitudinal, provocado pela alteração do alinhamento da linha. Portanto foram calculados os esforços transversal, vertical, longitudinal, e a força resultante entre os três esforços. Para tanto foi utilizado os ângulos que configuram o melhor e o pior caso os quais possuem 0° e 90° respectivamente, mais especificamente o menor e a maior força resultante conforme pode ser visto nas Tabelas 13 e 14,

Tabela 13. Cálculo das cargas transversais na estrutura tipo ancoragem.

CÁLCULOS MECÂNICOS - LT 69 KV PEDRA RAJADA	
<b>ESTRUTURA TIPO ANCORAGEM - CARGA TRANSVERSAL</b>	
Conductor	Rail
VÃO RÉ [m]	120
Vão Vante [m]	120
Vão médio [m]	120
Nº de Condutores	3
Ângulo $\beta$	0
Tração do Conductor [daN/mm <sup>2</sup> ]	1500.00
Força Transversal Ft [daN]	282.24
<b>ESTRUTURA TIPO ANCORAGEM - CARGA VERTICAL</b>	
VÃO RÉ [m]	120
Vão Vante [m]	120
Vão médio [m]	120
Nº de Condutores	3
Força Transversal Ft [daN]	565.13
<b>ESTRUTURA TIPO ANCORAGEM - CARGA LONGITUDINAL</b>	
TRAÇÃO [daN/mm <sup>2</sup> ]	1500.00
cos( $\beta$ )	0
Força Transversal Ft [daN]	4500.00
Resultante para 0º [daN]	4544.12

Fonte: autoria própria.

Tabela 14. Cálculo das cargas verticais, longitudinal resultante na estrutura tipo ancoragem.

CÁLCULOS MECÂNICOS - LT 69 KV PEDRA RAJADA	
<b>ESTRUTURA TIPO ANCORAGEM - CARGA TRANSVERSAL</b>	
Conductor	Rail
VÃO RÉ [m]	120
Vão Vante [m]	120
Vão médio [m]	120
Nº de Condutores	3
Ângulo $\beta$	90
Tração do Conductor [daN/mm <sup>2</sup> ]	1500.00
Força Transversal Ft [daN]	9000.00
<b>ESTRUTURA TIPO ANCORAGEM - CARGA VERTICAL</b>	
VÃO RÉ [m]	120
Vão Vante [m]	120
Vão médio [m]	120
Nº de Condutores	3
Força Transversal Ft [daN]	565.13
<b>ESTRUTURA TIPO ANCORAGEM - CARGA LONGITUDINAL</b>	
TRAÇÃO [daN/mm <sup>2</sup> ]	1500.00
cos( $\beta$ )	90
Força Transversal Ft [daN]	0.00
Resultante para 90º [daN]	9017.73

Fonte: autoria própria.

Após realizados os cálculos, deve-se escolher as estruturas que atendam as solicitações mecânicas encontradas. Na Linha de transmissão de Pedra Rajada, foram utilizados postes tipo DT tipo B-6 18 m 2500 daN, para estruturas tipo suspensão e DT

tipo B-6 18 m 5000 daN, para estruturas tipo ancoragem. Cabe destacar que em estruturas com ângulos superiores a 15° a força resultante é maior que o esforço do poste especificado, neste caso são utilizados estais a fim de promover um esforço contrário a resultante e assim garantir que a estrutura seja empregada com segurança. Mais detalhes são discutidos no apêndice

Portanto pode-se afirmar que as estruturas tipo suspensão encontram-se superdimensionadas, uma vez que estrutura DT tipo B-6 18 m 1800 daN seria capaz de atender bem as solicitações mecânicas, além de ser mais economicamente viável. Por outro lado, a estrutura tipo ancoragem encontra-se bem dimensionada, pois o próximo limite superior para o valor calculado seria de 5000 daN, que foi esforço escolhido para ser empregado na linha de transmissão. Cabe salientar que a tomada de decisão quanto a escolha da estrutura tipo suspensão, pode estar correlacionado com a disponibilidade de mercado, bem como da logística, tornado a estrutura escolhida a mais atrativa do ponto de vista econômico.

Para fins de validação do método de Sulzberger, quanto a segurança da fundação utilizada, foram desenvolvidos os cálculos necessários a fim de se obter o coeficiente de segurança conforme pode ser observado na Figura 15.e 16.

Tabela 15. Cálculo momento de capotamento.

MOMENTO DE CAPOTAMENTO	
Força aplicada na Estrutura [daN]	2500
Altura Total ht [m]	18
Espessura da base c [m]	0.20
Altura de aplicação dos Esforço h0 [m]	0.66
Profundidade da Fundação t [m]	2.50
Momento de Capotamento F aplicado Mv1 [daN m]	41766.67
q	50.00
d	0.0296
VÃO RÉ [m]	200.00
Vão Vante [m]	200.00
Força aplicada pelas ações do vento Fv	296.10
Momento de Capotamento F ação do vento Mv2 [daN m]	3158.40
Momento de Capotamento F aplicado Mv [daN m]	44925.07

Fonte: autoria própria.

Tabela 16. Cálculo momento estabilizador

MOMENTO DE ESTABILIZADOR	
b Largura da Fundação [m]	1.36
Condição do Terreno C2 [Kg/m3]	8
Ch [Kg/m3]	10
tan $\alpha$	0.01
Momento Estabilizador reação Lateral M1 [daN m]	59027.78
Peso da Estrutura Pest + Cruzeta	6500
Peso da Fundação Pfund	5408.65
Largura da Fundação [m] a	1.36
Parâmetro	0.0237
Momento Estabilizador reação Lateral M2 [daN m]	6435.87
Coefficiente de segurança	1.46

Fonte: autoria própria.

Com o valor obtido para o coeficiente de segurança é possível afirmar que a fundação atende aos requisitos normativos de segurança, pois  $1.46 > 1.2$  que é a condição de estabilidade para terrenos arenosos.

## 5 ESPECIFICAÇÕES E ATIVIDADE DE CAMPO

O papel do engenheiro eletricitista na construção de uma linha de transmissão consiste em supervisionar, coordenar e orientar equipes para execução das atividades. Também é de sua competência, pôr em prática o planejamento para realização da obra, acompanhando a progressão de todos os serviços e assim escolher equipes para atuação em campo. Além disso, é de sua responsabilidade preencher o diário de obra para inteirar o cliente a respeito do cumprimento das tarefas, bem como elaborar relatórios de medição e faturamento, para posterior prestação de contas junto ao cliente e a diretoria da empresa.

Durante o período de estágio as atividades desenvolvidas e acompanhadas foram: o planejamento e controle de projeto, topografia, supressão vegetal e construção de acessos, escavação, execução das fundações distribuição, implantação e aparelhamento de estruturas e lançamento de cabos condutores.

### 5.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DE PROJETO:

Para a execução de quaisquer uma das tarefas supracitadas é necessário planejá-las com a devida antecedência, a fim de realizar a escolha das equipes, equipamentos e materiais necessários à sua execução. Para tanto há necessidade de que o engenheiro faça um acompanhamento da obra a partir do qual seja possível ter uma visão geral do escopo do que fora realizado e assim direcionar as equipes para as demais atividades a serem executadas.

Portanto, foi realizado um acompanhamento no qual foi possível estabelecer um planejamento para realização das ordens de serviço. A ferramenta empregada nesse processo foi uma planilha criada no Microsoft Excel®, conforme observado na Figura 17, cada atividade desenvolvida é disposta em uma coluna, sendo assinaladas com “1” quando realizada.

Esta planilha era atualizada diariamente a fim de realizar a programação das frentes de serviços para dia posterior. Sendo de primordial importância tanto no escopo do departamento de engenharia, quanto no admirativo, pois por meio desta ferramenta eram emitidos relatórios diários (RDO) para cliente, assim como eram emitidos relatório

mensais para medição e prestação de contas. A atualização da planilha sempre fora realizada seguindo o procedimento de recolhimento de informações junto aos encarregados responsáveis pelos serviços, além de posterior verificação em campo.

Figura 17. Acompanhamento da execução das atividades.

ENERGY					EXECUTADO								
ESTRUTURA	POSTE	VÃO DE FRENTE (m)	FUNDAÇÃO	SUPRESSÃO VEGETAL	ACESSO (FAIXA DE SERVIÇÃO)	LOCAÇÃO	ESCAVAÇÃO	MANILHAS	IMPLANTAÇÃO ESTRUTURA	MONTAGEM DE ESTRUTURA / MISCELÂNEAS	CONTRAPESO	LANÇAMENTO DE CABOS	LANÇAMENTO DA FIBRA ÓPTICA
NÚMERO	TIPO			ALT./CARGA	SUPRESSÃO VEGETAL	ACESSO (FAIXA DE SERVIÇÃO)	LOCAÇÃO	ESCAVAÇÃO	MANILHAS	IMPLANTAÇÃO ESTRUTURA	MONTAGEM DE ESTRUTURA / MISCELÂNEAS	CONTRAPESO	LANÇAMENTO DE CABOS
294	Ia4 18 VERTICAL	18/5000	18/5000	Tipo B	1	1	1	1	1	1	1		
293	Ia4 18 VERTICAL	18/5000	18/5000	Tipo B	1	1	1	1	1	1			
292	Ia4 18 VERTICAL	18/5000	20,40	Tipo B	1	1	1	1	1	1			
291	Ia4 18 VERTICAL	18/5000	63,36	Tipo B	1	1	1	1	1	1			
290	vs 18m	18/2500	82,01	Tipo A	1	1	1	1	1	1			

Fonte: autoria própria.

Além do acompanhamento, era realizado o preenchimento do diário de obra (RDO) conforme observado nas Figuras 18 e 19, documento no qual é utilizado para registro de informações relevantes sobre a rotina de trabalho, este contém a produção diária realizada, contingente de homens e máquinas, fotografias dos serviços, condições climáticas, bem como solicitações e informes feitos ao cliente sobre qualquer evento anômalo à execução dos serviços. Tal registro diário auxilia a empresa a organizar melhor a rotina de trabalho. Além disso, do ponto de vista dos colaboradores, comprova a presença no canteiro e suas respectivas tarefas executadas a cada dia.

Figura 18. Diário de obra - Produção diária.

ENERGY		TSK		LT 69 KV _ Pedra Rajada			DATA	116405 RDO *****
Sond. Climática: Manhã (2)		Tarde (2)		Noite: (1)		15/06/2017		
				Legenda: 1 - Bom 2 - Chuva		quinta-feira		
SERVIÇOS EXECUTADOS / OCORRÊNCIAS				MAO DE OBRA INDIRETA-TSK				
ATIVIDADES	PRODUÇÃO			Função	Qtde			
SUPRESSÃO VEGETAL	-			Eng. De minas-consultor				
LOCAÇÃO TOPOGRAFICA	-			Eng. de Planejamento				
ESCAVAÇÃO	E.76			Eng. elétrica				
ESCAVAÇÃO EM ANDAMENTO (Rocha)	Estruturas em H E.144 (2,70 m) (2,70 m) E.146 (2,50 m) (2,50 m).			Coord. de Meio Ambiente				
INSERÇÃO DE MANILHAS	E.62.			Site Manager				
IMPLANTAÇÃO DE POSTES (18/2500)	E.59, E.60, E.62, E.81.			Auxiliar Administrativo				
IMPLANTAÇÃO DE POSTES (18/5000)								
INSTALAÇÃO DE CONTRAPESO								
MONTAGEM DE ESTRUTURAS (CRUZETAS, ATERRAMENTO, MISCELÂNEAS..)								
DISTRIBUIÇÃO DE CRUZETAS								

Fonte: autoria própria.



Figura 20. Atividade de Topografia.

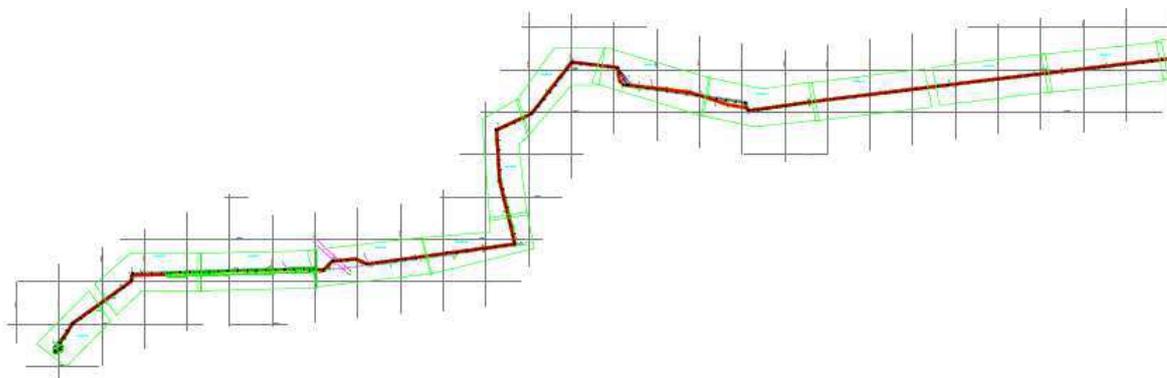


Fonte: autoria própria.

As etapas para realização de locação topográfica consistem em inserir o tripé nas coordenadas desejadas, nivelar o equipamento por meio de ajustes nos parafusos da base e laser de prumo, inserir as coordenadas desejadas e por fim marcar os pontos com piquetes.

As coordenadas de cada estrutura são especificadas em projeto, portanto é papel da equipe de topografia localá-las, sinalizando ao longo do traçado por meio de piquetes, para posterior escavação das fundações e implantação dos postes. A configuração de parte do traçado pode ser vista na Figura 21 abaixo.

Figura 21. Traçado da LT 69 Kv Pedra Rajada.



Fonte: autoria própria

### 5.3 SUPRESSÃO VEGETAL, CONSTRUÇÃO DE ACESSOS:

O procedimento de supressão vegetal consiste em retirar uma porção da vegetação de determinado espaço, com objetivo de usar a área anteriormente ocupada para fins alternativos. Nos trechos nos quais se possuía mata nativa, foi necessário requisitar uma licença ambiental junto ao órgão ambiental regulador, sendo IDEMA o órgão atuador no estado do Rio Grande do Norte.

Após conseguida a licença ambiental, a vegetação foi suprimida e a madeira retirada foi devidamente medida, conforme observado nas figuras 22 a) e b), sendo os expurgos devidamente condicionados para posterior destinação, segundo as recomendações do órgão ambiental regulador.

Figura 22. Atividade de supressão vegetal e cubagem de madeira.



a)

b)

Fonte: autoria própria.

Finalizada a abertura da faixa de servidão, iniciou-se o processo de planejamento do solo, construção de acessos vicinais para rodagem de máquinas e equipamentos e criação de praças para posterior implantação das estruturas. Essas atividades foram realizadas com auxílio de uma máquina tipo escavadeira hidráulica e uma pá carregadeira, conforme pode ser observado na Figuras 23 a), b), c) e d).

Figura 23. Atividade de adequação do solo, criação de praças, criação de acessos e planificação.



a)



b)



c)



d)

Fonte: autoria própria.

## 5.4 ESCAVAÇÃO:

Após realizada a locação topográfica e supressão vegetal, os colaboradores dão início a escavação das fundações, cuja profundidade adotada foi especificada, conforme discutido no referencial teórico.

À princípio, as fundações foram escavadas manualmente conforme pode ser visto nas Figuras 24 a) e b), onde nesta etapa, a equipe deparou-se com diversas inconsistências de locação fornecida pelo cliente. A primeira delas, se deu ao nos depararmos com uma linha subterrânea, razão pela qual houve a necessidade de alteração do traçado original

Figura 24. Atividade escavação manual.



a)



b)

Fonte: autoria própria.

No decorrer do traçado, o terreno passou de consistência arenosa para rochosa, o que alterou o processo de escavação, passando de manual para a utilização de rompedores, dos tipos acoplados em compressores e rompedores hidráulicos, conforme pode ser visto nas Figuras 25 a) e b).

Figura 25. Atividade de escavação com uso de rompedor acoplado no compressor e na escavadeira hidráulica.



a)



b)

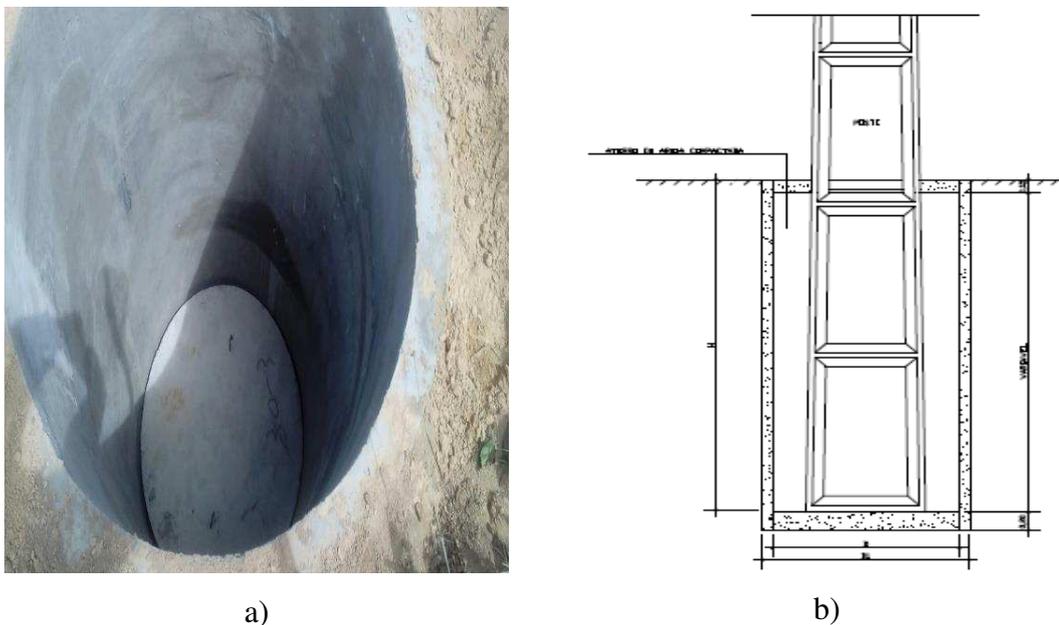
Fonte: autoria própria.

## 5.5 FUNDAÇÕES:

Segundo estudos realizados pelo cliente, responsável pelo projeto da obra, foram recomendados o emprego de quatro tipos de fundação, as quais foram definidas como aquelas para estruturas de suspensão, em terreno com e sem a presença de rocha e de outro tipo, para estruturas de ancoragem em terreno com e sem a presença de rocha.

Definiu-se então a utilização de fundação tipo tubulão em situações nas quais o terreno fosse arenoso, seja para estruturas do tipo suspensão ou ancoragem, onde no caso, foi empregado o uso de uma peça única em concreto armado e um fundo de cava conforme observado nas Figuras 26 a) e b).

Figura 26. Fundação tipo plantio tubulão, sem presença de rocha.



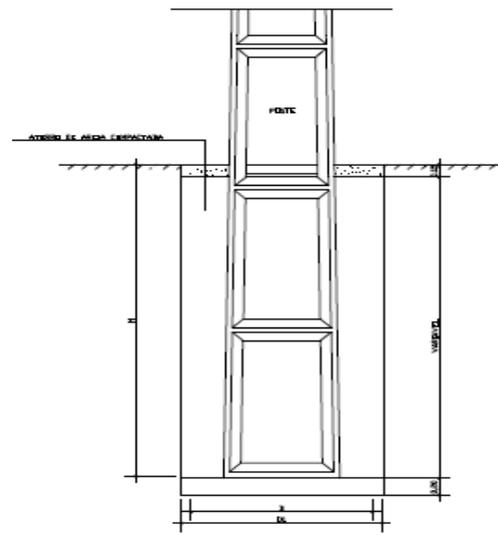
Fonte: autoria própria.

Para situações nas quais foi verificado terreno rochoso, definiu-se o emprego da fundação tipo de plantio de postes conforme pode ser observado nas Figuras 27 a) e b), onde a rocha por si só é capaz de desempenhar o papel de contenção do solo.

Figura 27. Fundação tipo plantio de poste, com presença de rocha.



a)



b)

Fonte: autoria própria.

O procedimento para inserção dos tubulões, foi segmentado em duas etapas, onde a primeira, consiste em transportá-las e distribuí-las ao longo do traçado, segundo o tipo fundação. A segunda etapa consiste em inserir o tubulão na perfuração, e compactar bem o solo em torno, para garantir a estabilidade do terreno. Para execução deste serviço se utilizou de um caminhão guindado e compactadores, conforme observado na Figura 28 a) e b) respectivamente.

Figura 28. Transporte e inserção do tubulão no solo.



a)



b)

Fonte: autoria própria.

## 5.6 DISTRIBUIÇÃO, MONTAGEM ELETROMECCÂNICA E IMPLANTAÇÃO DE ESTRUTURAS

O processo mecânico-hidráulico de içar as estruturas e fixá-las no solo, foi segmentado em 3 etapas. A primeira, consiste em transportá-las segundo sua função estrutural, até o local de implantação, conforme pode ser observado nas Figura 29 a) e b), o que para tal, utilizou-se caminhões guindados devidamente equipados.

Figura 29. Transporte de estruturas.



a)



b)

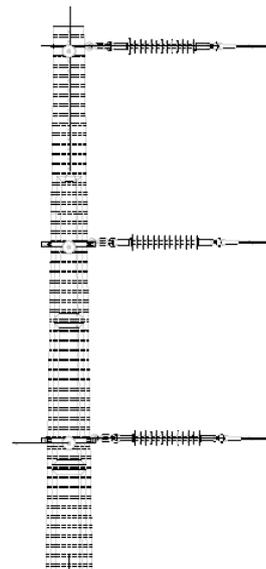
Fonte: autoria própria.

Após a distribuição das estruturas é realizada a montagem eletromecânica. Tal processo consiste em instalar o sistema de aterramento no qual os elementos metálicos são aterrados, por meio de uma cordoalha do tipo 4 BGW e além disso, são inseridos parafusos olhais para fixação dos isoladores. Por fim, são fixadas cantoneiras para estruturas tipo ancoragem, conforme mostrado nas Figuras 31 a) e b) ou cruzetas para estruturas tipo suspensão, conforme visto nas Figuras 30 a) e b), as quais são interligadas ao sistema de aterramento utilizando o mesmo cabo do tipo 4 BGW e conectores específicos para este fim.

Figura 30. Aparelhamento de estrutura tipo ancoragem.



a)



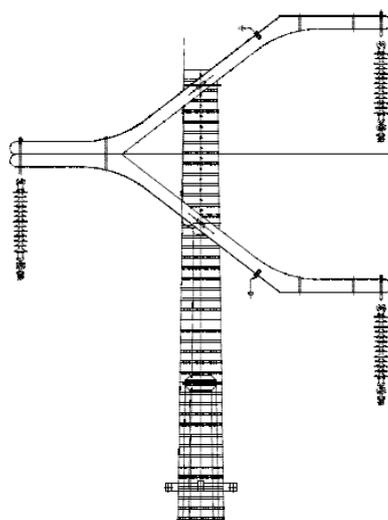
b)

Fonte: autoria própria.

Figura 31. Aparelhamento de estrutura tipo suspensão.



a)



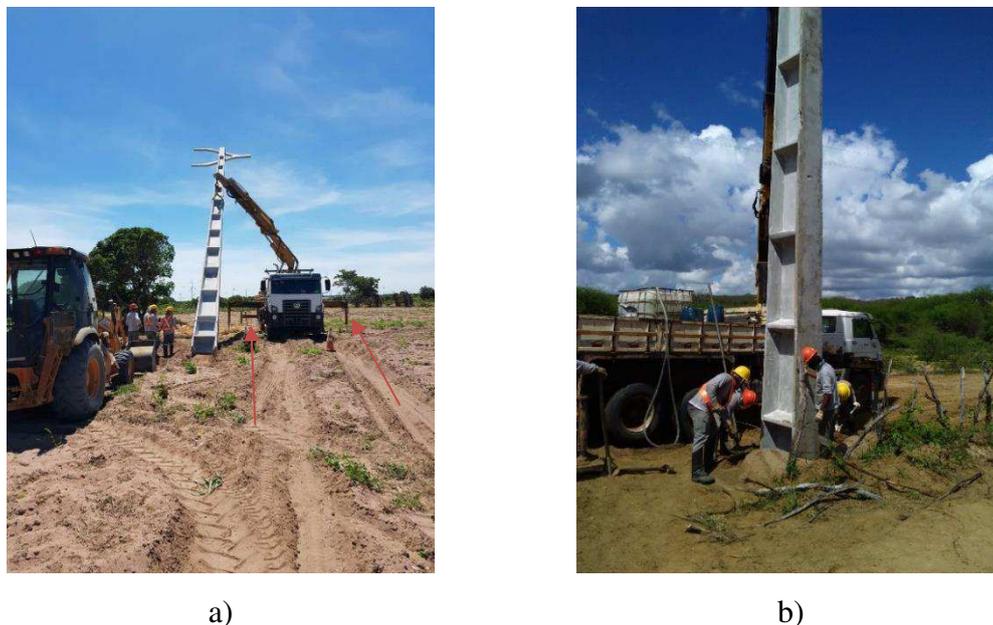
b)

Fonte: autoria própria.

A última etapa deste processo, consiste em içar a estrutura e instalá-la na fundação, conforme pode ser visto nas Figuras 32 a) e b), o que para tal, é necessário a utilização do caminhão guindado, retroescavadeira e compactadores. Esta atividade é a mais crítica, pois há movimentação de carga de massa muito elevada, portanto é necessário garantir que o equipamento esteja devidamente “patolado”, este processo consiste em adequar o

terreno a fim de empregar as patolas do caminhão conforme apontado na Figura 32, este procedimento aumenta o momento de tombamento do veículo, garantindo que este não tombe durante a execução da manobra.

Figura 32. Implantação de estruturas.



Fonte: autoria própria.

## 5.7 MONTAGEM DE CABOS CONDUTORES

O procedimento montagem dos condutores é dividido em 4 etapas. A primeira etapa consiste em montar a praça de lançamento, conforme observado na Figura 33. As bobinas de condutores são dispostas lado a lado e postas sobre cavaletes denominados desbobinadeiras. Ademais, por medidas de segurança, a praça é devidamente cercada e os condutores aterrados por meio de aterramentos deslizantes, equipamento no qual é constituído por um sistema de polias fixas, as quais são acopladas mecanicamente a uma haste de cobre fixada no solo.

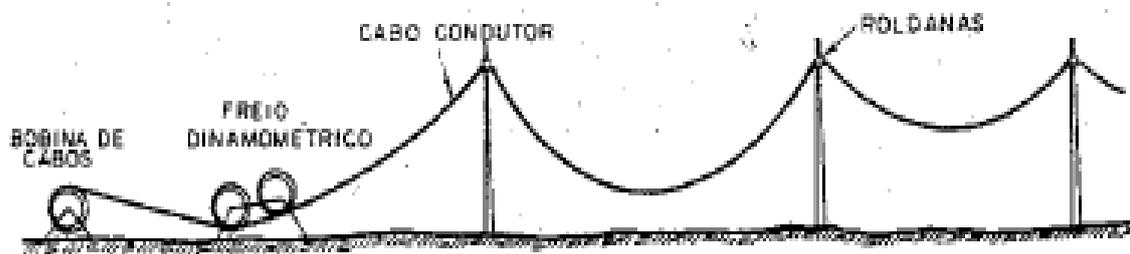
Figura 33. Praça de lançamento de cabos.



Fonte: autoria própria.

A segunda etapa do processo é denominada lançamento de cabos, na qual os condutores são retirados das bobinas e por arrasto são levados a cada estrutura, conforme ilustrado na Figura 34, onde o condutor é passado por roldanas, que servem como guia, além de eliminar o atrito entre o condutor e o solo. Esse procedimento é repetido até ser completado o tramo previsto no plano de lançamento.

Figura 34. Lançamento de cabos.



Fonte: (LABEGALINI, FUCHS, *et al.*, 1992). Pag.243.

Nessa etapa deve-se atentar para situações nas quais possam vir a danificar o condutor durante o procedimento de arrasto, portanto é necessário protegê-lo de obstáculos, como por exemplo cercas e rochas, para tanto se faz uso de cavaletes, sobre os quais deslizam os cabos. Ademais, durante esta etapa, deve-se atentar para eventuais falhas no condutor, onde, caso seja identificada alguma, o mesmo é descartado e empregase um outro sem falhas.

A terceira etapa do processo consiste em nivelar os condutores, tracionados de acordo com a temperatura vigente associada ao tensionamento estabelecido na tabela de normatização do projeto. Para tanto empregam-se máquinas para aplicar a devida tração, como por exemplo retroscavadeiras conforme é observado na figura 35 a), nelas são

instalados dinamômetros conforme pode ser visto na Figura 35 b) a fim de garantir que a tração aplicada seja a especificado em projeto.

Figura 35. Tensionamento dos cabos.



a)



b)

Fonte: autoria própria.

A última etapa deste processo, consiste em retirar os condutores das roldanas e realizar o procedimento de grampeação, processo este que consiste em retirar os condutores das roldanas tipo suspensão ou ancoragem, instalar as grampas e amortecedores, a depender do tipo de estrutura.

## 6 CONCLUSÃO

Ao longo do estágio foi possível aplicar o conteúdo acadêmico assimilado à vivência diária de um engenheiro em campo, com isso alinhar o conhecimento teórico ao prático. Portanto o estágio torna-se uma experiência imprescindível na formação de um engenheiro que se destine a atuar no setor elétrico, uma vez que o convívio diário com profissionais mais experientes e de áreas distintas proporciona um processo de aprendizagem à medida que o estudante tem a possibilidade de assimilar e desenvolver novas habilidades

No período correspondente foi adquirida uma perspectiva geral de ordem prática quanto a aplicação de conhecimentos básicos de engenharia, aplicados em sistemas de transmissão de energia elétrica, tais como conceitos de elétrica e mecânica. Além do conhecimento técnico foi possível desenvolver habilidades necessárias a todo engenheiro que atue na execução de uma obra, tais como a capacidade de gerir pessoas e o desenvolvimento da comunicação interpessoal.

Destaca-se ainda que o conjunto de atividades desenvolvidas durante a obra foram suficientemente satisfatórias. No tocante aos objetivos estabelecidos foram realizados com êxito, tais como preencher o relatório diário de obra e realizar o acompanhamento dos serviços diariamente, mostraram-se importantes para a previsão de problemas futuros e para a resolução dos atuais com maior facilidade, tais procedimentos foram adotados até a etapa de energização de linha de transmissão no dia 24/08, que atualmente encontra-se em operação, despachando energia elétrica gerada pelos parques para o SIN.

Sob o aspecto técnico desenvolvido no estudo de caso, foi possível aplicar a teoria discutida, e validar os resultados obtidos para os cálculos elétricos e mecânicos, confrontando com os presentes no memorial de cálculo. No qual constatou-se que a escolha de outros componentes tais como o condutor, poderia incorrer em um melhor rendimento da linha de transmissão. Da mesma forma foi verificado, que a escolha da estrutura tipo suspensão encontra-se superdimensionada, logo poderia ter sido empregada outra estrutura de menor esforço e, portanto, com menor custo.

Embora não tenha sido possível ter acesso aos custos dos componentes para realização de um detalhamento econômico, é possível concluir que há possibilidades a serem exploradas a fim de minimizar os custos tanto na execução quanto de operação da

linha de transmissão. É praxe por parte das empresas utilizar 2/3 do tempo para construção e somente 1/3 na fase de projeto, com a mudança de tal paradigma seria possível conduzir estudos mais detalhados a fim de prever problemas durante a execução, assim como avaliar melhor a escolha dos componentes.

No âmbito prático, foi possível verificar que o curso de engenharia poderia, em sua grade curricular ser acrescido de alguma disciplina na qual fosse possível vivenciar a realidade defrontada por um engenheiro no mercado de trabalho, por meio de estudos de casos, revisão de materiais técnicos como por exemplo memorial de cálculo e normas direcionados a área de atuação, além disso promover maior número de visitas técnicas, a fim de proporcionar maior integração entre alunos e empresas.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7095 - Ferragens eletrotécnicas para linhas de transmissão e subestações de alta e extra alta tensão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. 1981. p. 20.

ABNT. **NBR 5422-Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. 1985.

COMÍN, P. S. et al. **Cálculo y diseño de líneas eléctricas de alta tensión**. MADRID: Garceta, 2008.

DIREÇÃO DE SERVIÇOS DE ENGENHARIA. **R.S.L.E.A.T. - Edição DGE do regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão**. Lisboa: Direção Geral de Energia. 1993.

EEP. Analysing the costs of high voltage direct current (HVDC) transmission. **Electrical Engineering Portal**, 2014. Disponível em: <<http://electrical-engineering-portal.com/analysing-the-costs-of-high-voltage-direct-current-hvdc-transmission>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

ENTRAN. Protetor catódico de torres de linha de transmissão. **Etran**, 2017. Disponível em: <<http://www.entran.com.br/pc-de-grelha>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

GRAINGER, J.; STEVENSON, W. D. **Power system analysis**. New York: McGraw-Hill Book, 1994.

IBASE. **Portal Ibase**, 2017. Disponível em: <Disponível em <http://ibase.br/pt/wp-content/uploads/2015/08/linhas-de-transmissao-energia-economia-20120914-02-size-598.jpg>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

IEC. **IEC 71-2 - Insulation co-ordination, Part 2: Application Guide**. [S.l.]: IEC. 1996.

ISOELETRIC. **Catálogo isoeletric**. Bagnolo Cremasco: [s.n.], 2006.

JUNIOR, I. R. Panoramio. **Panoramio**, 2013. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/99539286>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

LABEGALINI, P. R. et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2ª. ed. SÃO PAULO: EDGARD BLUCHER, 1992.

PLENA TRANSMISSORAS. **Transmissão de energia elétrica**. BRASÍLIA, p. 30. 2008.

PORTAL METÁLICA. Torres de transmissão de energia. **Portal Metálica**, 2017. Disponível em: <<http://wwwo.metlica.com.br/torres-de-transmissao-de-energia>>. Acesso em: 29 ago. 2017.

SADEL INDÚSTRICA METALÚRGICA. Amortecedores de vibrações tipo stockbridge. **SADEL INDÚSTRICA METALÚRGICA**, 2017. Disponível em: <[http://www.sadeltransmissao.com.br/produtos.php?p=&k=amortecedores\\_de\\_vibracoes\\_stockbridge&idc=81&cmd=C](http://www.sadeltransmissao.com.br/produtos.php?p=&k=amortecedores_de_vibracoes_stockbridge&idc=81&cmd=C)>. Acesso em: 30 ago. 2017.

SETOR ENERGÉTICO. Projeto Crescer: Governo Federal inclui 35 lotes de linhas de transmissão. **Setor Energético**, 2017. Disponível em: <<http://www.setorenergetico.com.br/governo-regulamentacao/projeto-crescer-governo-federal-inclui-35-lotes-de-linhas-de-transmissao/21727/>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

## ANEXO A

Tabla 4.1. Características orientativas del terreno para el cálculo de cimentaciones

Naturaleza del terreno	Peso específico aparente (T/m <sup>3</sup> )	Ángulo de talud natural (Grados sexag.)	Carga admisible (daN/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de rozamiento entre cimiento y terreno al arranque (Grados sexag.)	Coefficiente de compresibilidad $C_a$ a 2 m de profundidad (daN/cm <sup>2</sup> ) <sup>(a)</sup>
I. Rocas en buen estado (sotopés, Estratificadas (con algunas grietas)			70-80 10-20		
II. Terrenos no coherentes					
a) Grava arenosa (máximo F3 de volumen de grava hasta 70 mm de tamaño)	1,80-1,90		4-8	20°-25°	
b) Arenas gruesas (con diámetros de partículas entre 2 mm y 0,2 mm)	1,60-1,80	30°	2-4	20°-25°	8-10
c) Arenas finas (con diámetros de partículas entre 2 mm y 0,2 mm)	1,50-1,60		1,5-3		
III. Terrenos no coherentes sueltos					
a) Grava arenosa	1,70-1,80		3-5		
b) Arenas gruesas	1,60-1,70	30°	2-3	20°-25°	10
c) Arenas finas	1,40-1,50		1-1,5	20°-25°	6-8
IV. Terrenos coherentes <sup>(b)</sup>					
a) Arcilloso duro	1,80		4	14°-16°	2-3
b) Arcilloso semiduro	1,80	20°	2	0°	10-15
c) Arcilloso blando	1,50-2,00		1		10-15
d) Arcilloso fluido	1,60-1,70		1		10-15
V. Fungos tuberosos y terrenos pastosos en general	0,80-1,1		0		10-15
VI. Terrenos de relleno sin cohesión	1,40-1,60	30°-40°	0	14°-20°	10-15

(a) Datos: Los terrenos con su horizontal natural difícilmente con la mano. Totalidad en general clara.

Suelto: Los terrenos con su humedad natural se amasan fácilmente con la mano. Totalidad en general oscura.

Blando: Los terrenos con su humedad natural se amasan fácilmente, permitiendo obtener entre las manos cilindros de 3 mm de diámetro. Totalidad oscura.

Fácil: Los terrenos con su humedad natural moldeables en la mano cerrada. Fluyen entre los dedos. Totalidad en general oscura.

(b) Puede admitirse que sea proporcional a la profundidad en que se considere la acción.

(c) Se determinan experimentalmente.

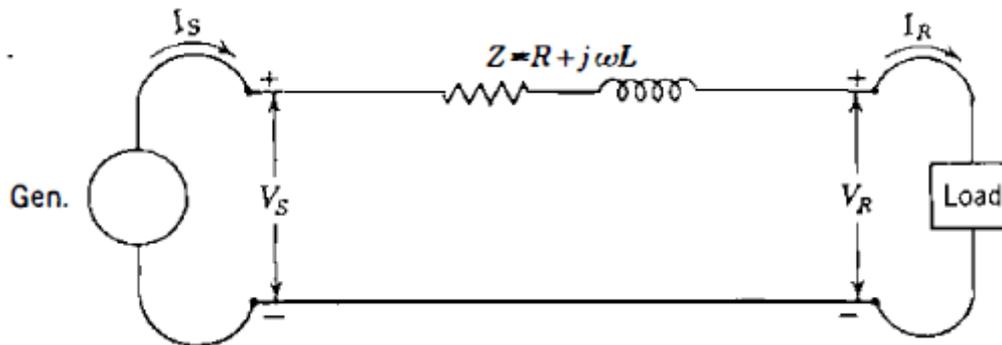
# ANEXO B

Condutor	Carga de ruptura (kgf)		Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)	Bitola AVG ou kernil	Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)			Porcentagem no peso total (%)	
	Classe A	Classe B	CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)			Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço
<b>Cuckoo</b>	12639	12281	0.0717	0.0865	0.0114	0.3391	0.2042	1014	<b>795</b>	9.24	27.74	116.2	407.7	1523.8	73.2	26.8
<b>Drake</b>	14266	13817	0.0717	0.0864	0.0142	0.3373	0.2035	1018	<b>795</b>	10.36	28.13	116.3	512.3	1628.7	68.5	31.5
<b>Mallard</b>	17453	16853	0.0719	0.0858	0.0196	0.3338	0.2022	1029	<b>795</b>	12.41	28.95	118.3	719.5	1838.4	60.9	39.1
<b>Tern</b>	9998	9807	0.0717	0.0876	0.01072	0.3421	0.2055	1000	<b>795</b>	6.75	27.01	116	217.4	1333.4	83.7	16.3
<b>Condor</b>	12761	12403	0.0717	0.087	0.0123	0.3386	0.2042	1011	<b>795</b>	9.24	27.73	115.4	407.7	1523.1	73.2	26.8
<b>Ruddy</b>	1103	10887	0.0633	0.0768	0.0141	0.3374	0.2025	1086	<b>900</b>	7.19	28.74	1263.4	246.4	1509.8	83.7	16.3
<b>Canary</b>	14453	14048	0.0633	0.0771	0.0195	0.3339	0.2013	1091	<b>900</b>	9.84	29.51	1263.4	461.7	1725.1	73.2	26.8
<b>Rail</b>	11768	11539	0.0597	0.0733	0.0174	0.3352	0.2011	1120	<b>954</b>	7.4	29.59	1339.1	261.1	1600.2	83.7	16.3
<b>Cardinal</b>	15321	14892	0.0597	0.0727	0.0123	0.3317	0.1989	1132	<b>954</b>	10.13	30.38	1339.2	493.4	1828.7	73.2	26.8
<b>Orolan</b>	12545	12297	0.0552	0.0684	0.01222	0.3322	0.1992	1172	<b>1.033.5</b>	7.7	30.78	1449.9	282.5	1732.5	83.7	16.3
<b>Curlew</b>	16590	16125	0.0552	0.0671	0.0128	0.3287	0.198	1191	<b>1.033.5</b>	10.54	31.62	1450.1	530	1980.1	73.2	26.8
<b>Bluejay</b>	13526	13258	0.0512	0.0634	0.01269	0.3293	0.1975	1229	<b>1.113.0</b>	7.99	31.96	1562.8	304.8	1867.6	83.7	16.3
<b>Finch</b>	17729	17254	0.0514	0.0628	0.01329	0.3268	0.1962	1244	<b>1.113.0</b>	10.95	32.83	1570.5	559.6	2130.1	73.7	26.3
<b>Bunting</b>	14495	14199	0.0478	0.0593	0.01313	0.3268	0.1958	1283	<b>1.192.5</b>	8.27	33.08	1674.3	326.2	2000.5	83.7	16.3

## APÊNDICE

Nesta seção será detalhado o procedimento numérico realizado para obtenção dos resultados na seção estudo de caso, portanto as análises serão conduzidas detalhando os cálculos, obedecendo a ordem explicitada na referida seção. A priori é possível inferir, baseado na extensão da linha de transmissão, qual topologia de circuito será empregada na representação da mesma. Conforme já discutido para linhas com extensão inferior a 80 km é possível representá-las por uma impedância em série, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36. Representação do circuito equivalente da linha de transmissão



Fonte. (GRAINGER e STEVENSON, 1994)

A primeira etapa consiste em estabelecer a tensão de operação, para tanto conforme discutido no referencial teórico, devido ao comprimento da linha de transmissão é utilizada a equação 2 para o devido cálculo.

$$V = 0,25\sqrt{50000000}$$

$$V = 55.90 \text{ KV}$$

É possível observar que o resultado obtido não se encontra nas classes de tensão normatizadas. Portanto é necessário escolher o nível de tensão superior mais próximo o qual seja previsto em norma para subtransmissão de energia elétrica, à vista disso é possível estabelecer que a classe de tensão de operação será A3 e, portanto 69 KV.

A posteriori é calculado o valor da corrente nominal da linha de transmissão por meio da equação 3, para tanto é necessário conhecer, além do valor da tensão de operação, o fator de potência e potência.

$$I = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} * 69 * 10^3 * 0.95}$$

$$I = 440,39 \text{ A}$$

Para o valor da corrente calculada é possível verificar no catálogo do fabricante (Anexo B) qual os condutores possuem ampacidade compatível com o valor obtido. Os condutores tipo CAA analisados atendem a este requisito que é necessário, porém não suficiente para escolha do condutor, além de quantificar a corrente é necessário verificar a perda de energia e a queda de tensão provocada pelo condutor. Para calcular a perda de energia da linha foi utilizada a equação 4, conforme mostrado abaixo.

$$P_{perda} = 3 * 0.01174 * 440,39^2 * 32$$

$$P_{perda} = 1365 \text{ Kw}$$

O resultado obtido indica que há uma perda de 3% da energia transmitida, portando o condutor atende ao requisito de perda máxima que deve ser de 5%. Ademais foi calculada a queda de tensão provocada pelos elementos resistivos do condutor, empregando a equação 5.

$$|\Delta U|_{\%} = \frac{50.32 * (7.33 \times 10^{-2} + 1.09 \times 10^{-2} * \tan(18.20))}{(69 \times 10^3)^2} \times 100$$

$$|\Delta U|_{\%} = 2.48\%$$

Portanto, tem-se uma queda de tensão que se encontra em valores aceitáveis. O próximo passo consiste em estabelecer qual tipo de isolador atende aos requisitos elétricos e mecânicos, este foi especificado de acordo com a tensão mecânica de ruptura do condutor que é de 11315.89 daN, e a partir disso foi calculada a linha de escoamento de acordo com a equação 6

$$L_e = 72.45 * 32$$

$$L_e = 2245.95 \text{ mm}$$

Por meio das informações obtidas foi possível selecionar o isolador ISI - ROK-A09+8-120 -SB que atende aos requisitos eletromecânicos necessários. Na Figura 37 tem-se um trecho de um catálogo de um fabricante de isoladores no qual possui tensão máxima de ruptura 12000 daN, tensão de operação 72 KV e linha de escoamento de 2270 mm, portanto atende a todos os requisitos calculados. Destaca-se que as grampas tipo suspensão e ancoragem são escolhidas de acordo com o isolador selecionado sendo comum a venda da cadeia completa, cabendo ao comprador especificar apenas a função

Figura 37. Trecho de um catálogo de isoladores

Classe de Tensão					Catálogo	Nº de Aletas	Comp. L	Escoa-mento	Dist. de Arco	Freq. Industrial 50-60 Hz		Impulso Atmosférico /1,2/ 50		Peso	
72	123	145	170	250						400	Cód. (♦)	A n° (1)	± 10 mm		mm
■	:	:	:	:	:	ISI-ROK-*	9+8	940	2270	640	275	195	460	495	4,4

Fonte: (ISOELETRIC, 2006)

Para determinar o esforço no qual será necessário para especificar a estrutura tipo suspensão foi calculada a resultante entre os esforços atuantes na estrutura os quais são o esforço transversal e o esforço vertical.

O esforço transversal surge pela ação do vento, portanto é calculado segundo a equação 7

$$F_T = 3. (0.6 * 1 * 750 * 29.59). \left[ \frac{160 + 140}{2} \right]$$

$$F_T = 599.20 \text{ daN}$$

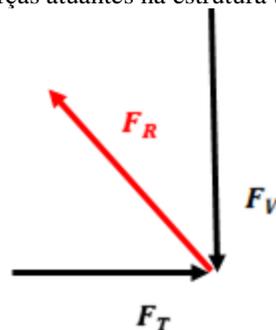
O esforço vertical é oriundo do peso do condutor, das cadeias de isolação, da fibra óptica, do cabo guarda e cruzetas calculado conforme a equação.

$$F_V = 706.40 + 19.72 + +88 + 15.89 + 166.77$$

$$F_V = 996.78 \text{ daN}$$

Portanto a força resultante na estrutura, representada na Figura 38 é determinada de acordo com o desenvolvimento abaixo:

Figura 38. Forças atuantes na estrutura tipo suspensão.



Fonte: autoria própria.

$$F_R = \sqrt{599.20^2 + 996.78^2}$$

$$F_R = 1163.02 \text{ daN}$$

Para determinar o esforço no qual será necessário para especificar a estrutura tipo ancoragem foi a resultante entre os esforços atuantes na estrutura os quais são o esforço

transversal, esforço vertical e longitudinal. Considerando para isso uma tração de serviço  $T_0 = 1500$  daN a qual gira e torno de 14% da tração ruptura do condutor, além disso foram considerados as duas hipóteses descritas no estudo de caso calculadas a seguir. O esforço transversal surge pela ação do vento, portanto é calculado considerando o ângulo  $\beta = 0^\circ$  segundo a equação 10.

$$F_T = 3 \left[ 0.78 * \cos^2(0) * \left[ \frac{120 + 120}{2} \right] + 2 * 1500 * \sin(0) \right]$$

$$F_T = 282.24 \text{ daN}$$

O esforço vertical pelo peso do condutor é calculado em conformidade com a equação 11.

$$F_V = 3 * 1.57 * \left[ \frac{120 + 120}{2} \right]$$

$$F_V = 565.13 \text{ daN}$$

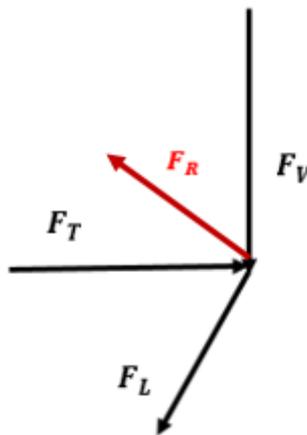
O esforço longitudinal é calculado em conformidade com a equação 11.

$$F_L = 3.150. \cos(0)$$

$$F_L = 4500 \text{ daN}$$

Por fim calcula-se o esforço resultante entre os três esforços, representados na Figura 39.

Figura 39. Forças atuantes na estrutura tipo ancoragem.



Fonte: autoria própria.

$$F_R = \sqrt{282.24^2 + 565.13^2 + 4500^2}$$

$$F_R = 4544.12 \text{ daN}$$

O esforço transversal surge pela ação do vento, portanto é calculado considerando o ângulo  $\beta = 90^\circ$  segundo a equação 10.

$$F_T = 3 \left[ 0.78 * \cos^2(90) * \left[ \frac{120 + 120}{2} \right] + 2 * 1500 * \sin(90) \right]$$

$$F_T = 9000 \text{ daN}$$

O esforço vertical pelo peso do condutor é calculado em conformidade com a equação 11.

$$F_V = 3 * 1.57 * \left[ \frac{120 + 120}{2} \right]$$

$$F_V = 565.13 \text{ daN}$$

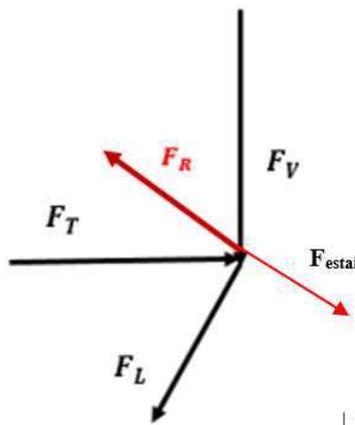
O esforço longitudinal é calculado em conformidade com a equação 11.

$$F_L = 3.1500. \cos(90)$$

$$F_L = 0 \text{ daN}$$

Por fim calcula-se o esforço resultante entre os três esforços, representados na Figura 40.

Figura 40. Forças atuantes na estrutura tipo ancoragem.



Fonte: autoria própria.

$$F_R = \sqrt{9000^2 + 565.13^2 + 0}$$

$$F_R = 9017.73 \text{ daN}$$

Neste caso é necessário aplicar estais a fim de garantir que a estrutura não venha a tombar quando os condutores forem inseridos, pois o esforço resultante calculado é maior que o esforço da estrutura que é de 5000 daN. Portanto pode-se aplicar um cabo de estai tipo 3/8 6 x 19 – 6 x 36, com tensão de ruptura de 5723 daN no sentido oposto a resultante com até 80% da tensão de ruptura. Para este caso que é o mais crítico é prudente utilizar dois estais para garantir a segurança ou então diminuir a tração do condutor no procedimento de lançamento.

Para o cálculo das fundações é necessário estimar o momento de capotamento da estrutura devido ao esforço aplicado, para tanto foi usada a equação 16.

$$M_{v1} = 2500 * \left( 18 + 0.20 - 0.66 - \frac{1}{3} * 2.5 \right) = 41766.67 \text{ daNm}$$

Para calcular o momento de capotamento devido as ações do vento sobre a estrutura é necessário calcular a força do vento que na estrutura, dada pelo desenvolvimento abaixo.

$$F_v = 50 * 29.61 * 10^{-3} * 200 = 296.10 \text{ daN}$$

$$M_{v2} = 296.10 * \left( \frac{18}{2} + \frac{2 * 2.5}{3} \right) = 3158.4 \text{ daN m}$$

Portanto o momento de capotamento é calculado pela soma entre  $M_{v1}$  e  $M_{v2}$ , logo tem-se

$$M_v = 41766.67 + 3158.40 = 44925.07 \text{ daN m}$$

A próxima etapa consiste em calcular momento o estabilizador devido a reação lateral do terreno empregando a equação 18, porém antes é necessário calcular o coeficiente de compressibilidade do terreno a 2m de profundidade. Conforme observado no anexo I, tem-se que o  $C_2$  igual a  $10 \text{ kg/m}^3$

$$C_h = 2.5 * \frac{8}{2} = 10 \text{ kg/m}^3$$

$$M_1 = \frac{1.36 * 2.5^3}{36} * 10 * 10^6 * 0.01 = 59027.77 \text{ daN m}$$

Por fim calcula-se o momento estabilizador devido a reações verticais do terreno, porém antes é necessário estimar o peso da fundação dada pela soma ente o peso do anel de concreto e pelo peso do material compactador que será a areia. Para tanto foi realizado o desenvolvimento abaixo, em que foi considerado que a densidade da areia no projeto é  $1500 \text{ kg/m}^3$ .

$$P_{fund} = P_{areia} + P_{anel}$$

O peso da areia, bem como do anel de concreto armado é calculado pelo produto entre o volume e a respectiva densidade

$$P_{areia} = V_{areia} * \delta_{areia}$$

$$V_{areia} = \pi * r^2 * h - \frac{1}{3} * h * S_{fund}$$

$$V_{areia} = \pi * 0.6^2 * 2.5 - \frac{1}{3} * 2.5 * (0.59 * 0.812) = 2.427$$

$$P_{areia} = 2.427 * 1500 = 3640.15 \text{ kg}$$

$$P_{areia} = 3570.99 \text{ daN}$$

De forma análoga ao peso da areia, tem-se para o anel de concreto

$$P_{anel} = V_{anel} * \delta_{concreto}$$

$$V_{anel} = \pi * r_{max}^2 * h - \pi * r_{min}^2 * h$$

$$V_{anel} = \pi * 0.68^2 * 2.5 - \pi * 0.6^2 * 2.5 = 0.803$$

$$P_{anel} = 0.803 * 2200 = 1768.5 \text{ kg}$$

$$P_{anel} = 1734.905 \text{ daN}$$

Por fim calcula-se o momento  $M_2$

$$M_2 = (6500 + 1734.905 + 3570.99) * 1.36 * \left[ 0.5 - \frac{2}{3} * \sqrt{\frac{6500 + 1734.905 + 3570.99}{2 * 1.36^2 * 1.36 * 10 * 10^6 * 0.01}} \right]$$

$$M_2 = 6387.45 \text{ daN}$$

Para comprovar a condição de estabilidade conforme a equação 14

$$k = \frac{M_1 + M_2}{M_v} = \frac{59027.77 + 6387.45}{44925.07}$$

$$K = 1.46$$

Como  $k > 1.2$  pode-se afirmar que a fundação atende a condição necessário para terrenos em condições anormais, ou seja, para terrenos onde há eminência de tombamento, neste caso em particular para terreno arenoso.