

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Otimização da Metodologia de Projeto de Linhas
Aéreas de Alta-Tensão com Modelização do Traçado
Real em 3D**

RUI EMANUEL PÓVOAS DUARTE DE ALMEIDA

VERSÃO FINAL

**DISSERTAÇÃO REALIZADA NO ÂMBITO DO
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES
MAJOR ENERGIA**

**ORIENTADOR: PROF. DOUTOR HÉLDER FILIPE DUARTE LEITE
COORIENTADOR: ENG. RUI FILIPE DA SILVA MENDES DA CUNHA**

FEVEREIRO, 2016

Resumo

A energia elétrica tem protagonizado um dos papéis mais importantes para o crescimento e desenvolvimento das atuais sociedades. Ao longo desta evolução, os consumos da população mundial, especialmente os dos países em desenvolvimento, registaram um aumento significativo, incrementando assim a procura por esta forma de energia, sendo necessário dar uma resposta a esta demanda. Assim, a construção, a reestruturação e a reformulação das infraestruturas existentes para o transporte e distribuição da energia elétrica desde as grandes centrais até aos centros de consumo assumiu um papel essencial, servindo as populações cada vez mais dependentes deste recurso e com uma maior necessidade de qualidade e fiabilidade da entrega do mesmo.

Dado este crescimento na rede de transporte de energia, existe agora uma maior preocupação na otimização de todos os processos relacionados com o mesmo, assim os projetos de linhas aéreas assumem um papel cada vez mais preponderante na minimização de custos e no incremento do desempenho técnico de uma linha ao longo do seu tempo de vida útil.

Neste contexto, esta dissertação teve como desígnio a Otimização da Metodologia de Projeto de Linhas Aéreas de Alta-Tensão com Modelização do Traçado Real em 3D, com recurso ao *software* PLS-CADD™.

O desenvolvimento de *softwares* cada vez mais capazes e poderosos aplicados à componente de projeto, otimiza os seus processos, devido à sua capacidade de reunir uma série de funcionalidades. No caso do PLS-CADD™, sublinha-se a possibilidade de modelização do terreno, da distribuição de apoios e desenho, ou ainda da sua capacidade tridimensional, num único ambiente de trabalho [1].

Quando comparado com métodos tradicionais, cujas tomadas de decisão podem influenciar quer positiva quer negativamente o desempenho de uma linha e cuja projeção da mesma, em Portugal, deve ser estabelecida de acordo com o nível 3 de fiabilidade de linhas aéreas, segundo a cláusula 3.2.2/PT.1 da EN 50341-3-17, é necessário reunir uma série de ferramentas que permitam atuar de forma a minimizar as margens de erro, a conquistar

comportamentos preventivos e a garantir a eficiência dos projetos, como cumpre o PLS-CADD™ [2].

O programa além de garantir a segurança e eficiência das linhas, assegura a celeridade em todos os processos, condição *sine qua non* para alcançar a otimização desejada.

A realização do projeto teve por base a norma europeia EN 50341 - 1 intitulada “*Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - General requirements - Common specifications*” e a sua adaptação ao contexto nacional, cumprindo com os aspetos normativos para Portugal vigentes na EN 50341-3-17 intitulada “*Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - Set of National Normative Aspects*” [3] [2].

A linha aérea usada como caso de estudo, foi uma linha dupla de 60 kV que efetua a ligação entre duas subestações pertencentes ao concelho de Fafe.

Para a avaliação da eficiência do projeto foi incluída uma análise técnica e económica, de forma a apurar a viabilidade do mesmo em diferentes cenários, nomeadamente, uma solução com apoios reticulados, uma outra com apoios tubulares e, com base nestes resultados, é ainda sugerida uma terceira solução que visa a minimização dos custos. Esta, combina os diferentes apoios com a devida adaptação às especificidades do presente projeto.

Palavras-chave: Otimização, Linhas Aéreas, Norma Europeia, PLS-CADD™, Apoios Reticulados, Apoios Tubulares, Análise Técnica e Económica.

Abstract

Electric energy has been playing one of the most important roles to the growth and development of nowadays societies. Throughout this evolution, world's population consumes, especially in developing countries, have registered a significant rise, increasing the search for this source of energy, being necessary to give a proper answer to this demand. Thus, the construction, the restructuring and the reformulation of the existing infrastructures to electric energy distribution from the power plants to the consume centers assumed an essential role, serving populations even more dependent on this resource and with a greater need for quality and reliability of delivery.

Given this growth on the power transmission network, there is now a greater concern in the optimization of all its related processes. So, the overhead lines projects play an increasingly important role in reducing costs and increasing the technical performance of a line over its lifetime.

Then, this dissertation had as its intention the Optimization of Projects' Methodology for High-Voltage Overhead Power Lines with Real Path in 3D Modelling, using the PLS-CADD™ software.

The development of software even more capable and powerful, applied to the project's component optimizes its processes due to its ability of gathering several functionalities. In the case of PLS-CADD™ we emphasize the possibility of modelling on the ground, the distribution of support and design, or yet its three-dimensional capacity in a single work environment.

When compared to other traditional methods, which decisions can influence either positive or negatively the performance of a line, or its projection, in Portugal it should be established according to the level 3 of overhead lines reliability. According to the clause 3.2.2/PT by EN 50341-3-17, it's necessary to gather several tools which allow acting in a way of minimizing the margins of error, achieving preventive behaviours and assuring the projects efficiency, as carried out by PLS-CADD™.

The program, more than assuring the security and efficiency of the lines, assures the quickness of all processes, which is an essential condition to achieve the desired optimization.

The accomplishment of the project was based on the European standard EN 50341-1 entitled “Overhead electrical lines exceeding AC 45kV - General requirements - common specifications” and its adaptation to the national context, fulfilling the portuguese normative aspects in the EN 50341-3-17 entitled “Overhead electrical lines exceeding AC 45kV - set of National Normative Aspects”.

The overhead line used as the study object was a 60kV double line which makes the connection between the two substations belonging to Fafe municipal area. To assess the efficiency of the project an economical technical analysis was included in order to determine the feasibility of the project in different scenarios, namely a solution with reticulated supports, another with tubular supports and, based on this results, a third option was suggested aimed at minimizing costs. This combines the different supports correctly adapted to the specifications of this project.

Keywords: Optimization, Overhead, European standard, PLS-CADD™, Lattice Towers, Steel poles, Technical economic analysis.

Agradecimentos

Ao Prof. Doutor Hélder Leite, direciono um forte apreço pela confiança depositada e pela oportunidade gerada que possibilitou a realização do presente projeto numa empresa conceituada como a Irmãos Silva, S.A. - Metalgalva.

Ao meu coorientador Eng.º Rui Cunha, agradeço vivamente por todo o apoio e orientação prestada que contribuíram para a elaboração do projeto.

A toda a equipa do Departamento Técnico da Irmãos Silva, S.A. - Metalgalva, presto a minha gratidão pelo acolhimento na empresa e por todos os contributos dados ao longo da realização do projeto, em especial ao Eng.º Sérgio Gonçalves e ao Eng.º José Magalhães, por toda a amizade e apoio durante esta jornada.

Aos meus pais, manifesto o meu reconhecimento pelo modelo de coragem e dedicação e sou-lhes grato por me proporcionarem as melhores condições para a concretização dos meus objetivos.

Às minhas irmãs, agradeço todo o apoio e carinho.

À Eva, agradeço todas as palavras de incentivo e motivação, assim como toda a disponibilidade demonstrada durante o percurso académico, em especial nesta reta final, tornando-se, juntamente com a minha família, num pilar essencial ao sucesso.

*“Não sabendo que era impossível,
foi lá e fez...”*

Jean Cocteau

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Glossário	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Âmbito e Objetivos da Dissertação	1
1.2 - Organização do Documento	2
1.3 - Enquadramento Legal - EN 50341-1	3
Capítulo 2	5
Linhas Aéreas de Alta Tensão.....	5
2.1 - Fundamentos do Projeto de Linhas Aéreas.....	5
2.2 - Elementos Constituintes das Linhas	7
2.2.1. Condutores	7
2.2.2. Cabo de Guarda	9
2.2.3. Disposição dos condutores	10
2.2.4. Cadeias de isoladores	11
2.2.5. Apoios	16
Capítulo 3	21
Metodologia do Cálculo Mecânico.....	21
Contextualização	21
3.1 - Tensão Mecânica Máxima.....	22
3.2 - Ações dos agentes externos sobre as Linhas	22

3.3 - Ação do Vento	23
3.4 - Velocidade e Pressão Dinâmica do Vento	23
3.5 - Forças do Vento sobre os Elementos da Linha.....	26
3.6 - Forças do Vento sobre os Condutores	27
3.7 - Forças do Vento sobre os Isoladores.....	27
3.8 - Ação do Gelo	28
3.9 - Ação da Variação da Temperatura.....	28
3.10 - Temperatura Mínima e Máxima de Projeto	28
3.11 - Estados Atmosféricos	29
3.12 - Coeficientes de Sobrecarga	29
3.13 - Equação dos Estados	31
3.14 - Cantão e Vão Equivalente Fictício	32
3.15 - EDS (every-day-stress).....	33
3.16 - Geometria das Linhas.....	34
3.16.1. Curva Caraterística dos Condutores Suspensos.....	34
3.16.2. Aproximação Parabólica.....	36
3.16.3. Vãos em Desnível	37
3.16.4. Vãos em Patamar	39
3.16.5. Vão de Peso/Gravítico.....	41
3.16.6. Apoio Enforcado	43
3.17 - Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores.....	44
3.18 - Distâncias Mínimas Regulamentares	45
3.19 - Casos de carga normalizados.....	48
3.20 - Apoios de Alinhamento (T)	49
3.21 - Apoios de Ângulo (A).....	49
3.22 - Apoios Fim de Linha (DE)	50
3.23 - Apoios de Reforço em Alinhamento (RT).....	51
3.24 - Apoios de Reforço de Ângulo (RA).....	51
Capítulo 4	55
Caso de Estudo	55

4.1 - Objetivo	55
4.2 - Regulamentação	56
4.3 - Características da linha	56
4.4 - Cálculo Mecânico	56
4.4.1. Características do Condutor e Cabo de Guarda.....	56
4.4.2. Tensões Mecânicas Máximas	57
4.4.3. Coeficientes de Sobrecarga	58
4.4.4. Parâmetro da Catenária e Flecha Máxima.....	61
4.4.5. Apoios	65
4.4.6. Verificação da Estabilidade dos Apoios	65
4.5 - Introdução ao Software PLS-CADD™	85
4.6 - Comparação de Resultados.....	87
Capítulo 5	89
Análise Técnica e Económica	89
5.1 - Contextualização	89
5.2 - Análise de Custos	91
Capítulo 6	99
Conclusões e Desafios	99
6.1 - Conclusões Gerais.....	99
6.2 - Desafios.....	101
Referências	103
Anexos	105

Lista de figuras

Figura 1 - Condutor A.C.S.R (<i>Aluminium Cable Steel Reinforced</i>) [8]	8
Figura 2 - Geometria do cabo de guarda - ângulo de proteção externa [5]	9
Figura 3 - Cabo OPGW (<i>Optical Power Ground Wire</i>) [8]	10
Figura 4 - Esteira horizontal	11
Figura 5 - Esteira vertical, circuito simples	11
Figura 6 - Esteira vertical, circuito duplo	11
Figura 7 - Galhardete	11
Figura 8 - Tipos de isoladores [9]	12
Figura 9 - Cadeia de isoladores em suspensão	13
Figura 10 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em suspensão	13
Figura 11 - Cadeia de isoladores em amarração.....	13
Figura 12 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em amarração.....	13
Figura 13 - Apoio B enforcado	14
Figura 14 - Tipos de apoios, vista de topo [9]	18
Figura 15 - Forças aplicadas a um apoio, vista de topo [9]	19
Figura 16 - Esquema de forças aplicadas num condutor	30
Figura 17 - Exemplo de um cantão	32
Figura 18 - Catenária, flecha e vão formado entre os apoios A e B, adaptado de [12]	35
Figura 19 - Posições relativas das curvas catenária e parábola [14].....	36
Figura 20 - Posições relativas das curvas catenária e parábola [10].....	37
Figura 21 - Representação de um vão em desnível [12]	38

Figura 22 - Representação de um vão em patamar [12]	40
Figura 23 - Representação de dois vãos desnivelados [16]	41
Figura 24 - Representação do apoio B enforcado [4]	44
Figura 25 - Desvio transversal da cadeia de isoladores [10]	45
Figura 26 - Troço da linha, exportado do PLS-CADD.....	87
Figura 27 - Esquema de um poste reticulado e de um tubular equivalente.....	90
Figura 28 - Custo dos apoios	92
Figura 29 - Custo mão-de-obra	93
Figura 30 - Custo dos meios/gruas.....	94
Figura 31 - Custo final por apoio.....	96
Figura 32 - Comparação do custo do projeto	97

Lista de tabelas

Tabela 1 - Linha de fuga específica mínima em função do nível de poluição da região de implementação da linha	15
Tabela 2 - Velocidade do vento em Zona A e Zona B.....	24
Tabela 3 - Pressão dinâmica do vento	25
Tabela 4 - Valores do coeficiente EDS, em percentagem da carga de rotura do cabo	33
Tabela 5 - Valores do coeficiente EDS, em percentagem da carga de rotura do cabo	34
Tabela 6 - Distâncias externas admissíveis.....	47
Tabela 7 - Casos de carga normalizados	48
Tabela 8 Características técnicas do condutor e cabo de guarda	56
Tabela 9 - Comparação de resultados entre o Excel e o PLS-CADD, para um apoio de alinhamento	88
Tabela 10 - Análise Técnica dos Apoios	91

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AT	Alta Tensão
CSA	Coeficiente de Sobre-Amostragem
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Electrotechnique</i>
CN	<i>National Committee</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
NNA's	<i>National Normatives Aspects</i>
PLS-CADD™	<i>Power Load System Computer Aided Design</i>

Lista de símbolos

ω	Frequência angular [rad/s]
α	Ângulo [graus]
α	Coeficiente de forma [adimensional]
α_d	Coeficiente de dilatação térmica do cabo [°C]
β	Ângulo que a direção do vento faz com a linha [graus]
B	Valor total da susceptância por fase da linha [S]

c	Coeficiente de forma [adimensional]
E	Módulo de Young [daN/mm ²]
f	Valor da flecha do cabos [m]
G	Valor total da condutância por fase da linha [S]
Γ	Vão equivalente fictício [m]
L	Valor do vão [m]
L_{cr}	Vão crítico [m]
d	Diâmetro do cabo [m]
e	Espessura da manga de gelo [m]
F_v^{CG}	Força do vento no cabo de guarda [N]
F_v^C	Força do vento no condutor [N]
F_v^{ISOL}	Força do vento nos isoladores [N]
T_r	Tração de rotura do cabo [N]
t_{seg}	Tração de segurança do cabo [N/mm ²]

Glossário

Amarração: Fixação direta dos condutores ao apoio por intermédio de uma cadeia de isoladores;

Cantão: Designação atribuída ao conjunto de vãos compreendidos entre dois apoios de amarração;

EDS: Razão entre a tensão mecânica mais frequente do cabo (15°C sem vento) e a sua tensão de rotura;

Flecha: Valor da máxima distância vertical entre a reta que une os pontos de suspensão do cabo e este;

Módulo de Young (E) ou módulo de elasticidade: parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. Obtém-se da razão entre a tensão (ou pressão) exercida e a deformação unitária sofrida pelo material;

Perfil: Conjunto de uma planta e corte vertical do traçado da linha elétrica, impresso em papel;

Slip Joint: fixação dos postes por encaixe, considerando 1,5 vezes o diâmetro da secção superior;

Suspensão: Fixação direta dos condutores ao apoio por intermédio de uma cadeia de isoladores em suspensão, disposta na vertical;

Tensão de rotura: Valor da carga mecânica a partir do qual o cabo perde as propriedades físicas que lhe permitem desempenhar a sua função;

Vão gravítico: Comprimento horizontal medido entre os pontos mais baixos das catenárias adjacentes de um determinado apoio;

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo delinea os objetivos estipulados para o projeto, onde sintetiza os principais eixos do mesmo e a consequente organização do documento. É também elaborado o enquadramento legal do projeto, introduzindo a norma europeia EN 50341- 1 e a sua adaptação a nível nacional.

1.1 - Âmbito e Objetivos da Dissertação

Para o projeto foi usado como caso de estudo uma linha aérea dupla de 60 kV que faz a ligação entre duas subestações pertencentes ao concelho de Fafe.

O projeto apresenta-se em conformidade com a norma europeia EN 50341- 1 intitulada “*Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - General requirements - Common specifications*” e a sua adaptação ao contexto nacional, cumprindo com os aspetos normativos para Portugal, a qual se apresentou como um outro desígnio a cumprir. [3]

Este ponto revela um dos desafios encontrados ao longo do projeto, tendo em conta que a nível académico os projetos são ainda regidos pelo RSLEAT¹.

A elaboração do projeto foi faseada em três importantes partes, sendo que na primeira, foi realizado o estudo do projeto da linha de forma tradicional. Seguidamente, estes resultados

¹ Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão.

foram confrontados com os valores obtidos através do *software* PLS-CADD™, previamente parametrizado, e onde foi desenvolvido o caso de estudo.

Na terceira e última fase, procedeu-se à substituição dos apoios reticulados por tubulares, resultando numa análise técnica e económica.

Com a realização do trabalho, pretendeu-se consolidar os conhecimentos obtidos durante a fase académica na realização de projetos de linhas aéreas e solidificar as competências adquiridas com o estudo da norma e do *software* disponibilizado pela Metalgalva.

Este caminho de aprendizagem e capacitação culmina na sua aplicação para o projeto proposto.

1.2 - Organização do Documento

A presente dissertação contempla seis capítulos. O capítulo introdutório inclui o âmbito e objetivos da dissertação e a organização do documento. Aqui é também apresentada a norma europeia EN 50341-1 e a sua contextualização, imprimindo a sua pertinência quer numa dimensão nacional, quer internacional, mostrando ter caráter basilar para a realização do presente projeto.

O segundo capítulo descreve os fundamentos inerentes a projetos de linhas aéreas de alta tensão e elementos constituintes das mesmas.

No capítulo seguinte é detalhado o cálculo mecânico, fazendo a ponte com o quarto capítulo, onde está discriminado o caso de estudo, assim como uma comparação de resultados entre o cálculo analítico manual e os resultados obtidos pelo *software* PLS-CADD™.

No capítulo cinco é construída uma análise técnica e económica entre os apoios tradicionais (reticulados) e os apoios tubulares.

Por fim, no capítulo seis, são apresentadas as principais conclusões referentes ao trabalho efetuado e apresentados desafios futuros.

1.3 - Enquadramento Legal - EN 50341-1

A norma europeia utilizada durante a execução do projeto foi preparada pelo comité técnico CENELEC² TC 11 e aprovada pelo CENELEC como EN 50341-1 em 1 de janeiro de 2001 [3].

Foi estabelecida a data de 1 de maio de 2002 para implementação a nível nacional através de publicação da norma nacional idêntica ou através de adoção. A data de 1 de janeiro de 2004 determina o prazo para a anulação de documentos normativos nacionais divergentes com a norma europeia.

O CENELEC é constituído pelos organismos nacionais de normalização dos seguintes países: Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Irlanda, Islândia, Itália, Luxemburgo, Malta, Noruega, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia e Suíça [3].

O documento está organizado em três grandes partes, sendo que a primeira se designa *General Requirements - Common Specifications*, que inclui as cláusulas comuns a todos os países. A segunda parte denomina-se por *Index of National Normative Aspects*, que disponibiliza a lista de todos os aspetos normativos nacionais. Por último, é apresentada a parte três que se intitula por *National Normative Aspects*, que lista os aspetos normativos nacionais.

A versão portuguesa - EN 50341-3-17:2001 - foi preparada pelo Comité Nacional Português (CN), que listou os aspetos normativos nacionais de Portugal, e submeteu-a aos procedimentos necessários através do CENELEC e do CLC/TC³ 11 [2].

O documento reúne todos os aspetos relevantes nas linhas aéreas, contendo vários anexos de carácter informativo com metodologias de cálculo e dimensionamento, tornando-se assim um documento muito completo e indispensável à realização da presente dissertação.

Sumário:

Para o projeto foi usado como caso de estudo uma linha aérea dupla de 60 kV que faz a ligação entre duas subestações pertencentes ao concelho de Fafe.

² Comité Européen de Normalisation Electrotechnique.

³ CENELEC with the Technical Committee

Para o cumprimento dos objetivos propostos, os principais eixos devem incidir no enquadramento legal a partir da norma europeia EN 50341-1 e sua adaptação no âmbito nacional, na construção de uma folha de cálculo analítica e no confronto de resultados obtidos entre estes e os extraídos do *software* PLS-CADD™ e, finalmente, na análise técnica e económica resultante dos dados recolhidos para o projeto.

Capítulo 2

Linhas Aéreas de Alta Tensão

Neste capítulo introdutório ao tema de Linhas Aéreas de Alta Tensão, são detalhadas as diferentes etapas respeitantes à implementação de uma linha e são referidos os elementos constituintes das mesmas, evocando alguns aspetos fundamentais e distintivos naqueles que são considerados mais pertinentes para o estudo.

2.1 - Fundamentos do Projeto de Linhas Aéreas

Para cada transmissão de energia elétrica entre dois pontos existem numerosas soluções tecnicamente viáveis, porém apenas um número relativamente pequeno é capaz de assegurar um serviço padrão ótimo e, ao mesmo tempo, propiciar o transporte de energia a um custo mínimo [4].

Para que seja possível atingir esta otimização, é necessário fazer uma correta análise a diversas condicionantes, desta forma, existe um conjunto de etapas que devem ser respeitadas no que concerne a projetos de linhas aéreas. Estas são:

Pré-Estudo:

- › Antes de se iniciar qualquer projeto, deve ser claro qual o ponto inicial e final da linha a projetar.

Estudo do Traçado:

Para efetuar o desenho do traçado da linha aérea é necessário ter em conta os obstáculos presentes no terreno, tais como:

- › Zonas militares, zonas protegidas e zonas urbanas;
- › Linhas de transporte de energia e comunicação;
- › Depósitos de combustível;
- › Zonas de tráfego aéreo;
- › Zonas de arvoredo;
- › Outros.

Traçado da linha:

Após a identificação de possíveis obstáculos, é efetuado um primeiro traçado da linha aérea pretendida, onde será determinante identificar desde logo os pontos principais, tais como, início e fim de linha e ângulos existentes.

Levantamento Topográfico:

Tendo em conta o traçado da linha pretendida é efetuado o levantamento topográfico, com o objetivo de obter a máxima informação sobre o terreno onde queremos implantar a linha, como por exemplo, cotas do terreno para toda a linha. Esta análise proporciona uma melhor perceção das elevações do terreno potencialmente críticas, obtendo um gráfico de perfil.

Elaboração do Projeto:

A fase de elaboração do projeto é composta pelo cálculo elétrico dos cabos condutores e cabos de guarda, distribuição dos restantes apoios e cálculo mecânico dos mesmos. Por fim, é efetuada uma memória descritiva e justificativa do projeto em causa.

Licenciamento

Após a elaboração do projeto, é necessário proceder ao licenciamento das infraestruturas junto do Ministério da Economia. O Ministério da Economia é responsável por reencaminhar as informações relativas ao projeto para as seguintes entidades, câmara

municipal, instituto de infraestruturas e desenvolvimento regional, comissão de coordenação e desenvolvimento regional, força aérea da região hidrográfica e instituto Português do património arquitetónico.

Assim que todas as entidades referidas derem um parecer positivo, o Ministério da Economia emite uma licença relativa à construção da linha.

2.2 - Elementos Constituintes das Linhas

Os principais elementos que estão presentes nas linhas aéreas de alta tensão são:

- › Condutores e cabos de guarda;
- › Cadeias de isoladores;
- › Apoios, metálicos ou em betão armado, suas armações e fundações;
- › Sistema de ligação à terra, por varetas revestidas de cobre e cabos de cobre;
- › Acessórios de fixação (pinças de amarração e de suspensão, mangas de reparação);
- › Amortecedores de vibração;
- › Conjuntos sinaléticos;
- › Balizagem aeronáutica dos cabos e dos apoios, diurna e noturna, nos casos em que é obrigatório;
- › Dispositivos de proteção à avifauna, nos casos em que se justifiquem.

2.2.1. Condutores

Os condutores são os elementos responsáveis pela condução da energia elétrica. Nas linhas aéreas de alta tensão utilizam-se condutores nus, ou seja, sem isolamento, pois a experiência tem demonstrado que para tensões iguais ou superiores a 60 kV, os condutores isolados podem sofrer alterações irreversíveis das suas características, acrescentando o facto de serem mais caros, concluiu-se que a sua utilização não se justifica, exceto em circunstâncias em que seja efetivamente aconselhado o seu uso, como em zonas muito urbanizadas [5].

Nas linhas aéreas de alta tensão são utilizados condutores multifilares (conjunto de fios devidamente distribuídos e não isolados entre si) homogéneos ou heterogéneos, dependendo se são constituídos por um ou mais metais. A preferência pelos condutores multifilares advém do facto de que, apesar de apresentarem um diâmetro superior aos unifilares, permitem uma secção inferior e uma melhor resistência mecânica, pois são mais flexíveis que os unifilares.

Os metais geralmente utilizados são o cobre, ligas de cobre, alumínio, ligas de alumínio e o aço.

Atualmente os condutores de cobre estão a entrar em desuso, devido ao seu preço elevado e vandalismo.

O tipo de condutor mais utilizado é o alumínio-aço, também designado por A.C.S.R (*Aluminium Cable Steel Reinforced*), figura 1, onde a condutividade elétrica é assegurada pelas camadas de alumínio, enquanto a alma de aço zincado contribui para uma maior resistência mecânica do condutor. Comummente, os fios de alumínio têm o mesmo diâmetro que o de aço, exceto se for necessário reforçar a alma de aço para aumentar a resistência mecânica do condutor [6].

Os condutores podem ser descritos de diferentes formas tal como é exposto de seguida [7]:

- › **Condutor isolado** - alma condutora revestida de uma ou mais camadas de material isolante, que asseguram o seu isolamento elétrico;
- › **Condutor nu** - condutor que não possui qualquer isolamento elétrico exterior;
- › **Condutor multifilar** - conjunto de fios devidamente reunidos e não isolados entre si;
- › **Condutor unifilar** - condutor constituído por um só fio;
- › **Condutor homogéneo** - condutor constituído por um único tipo de metal;
- › **Condutor heterogéneo ou não homogéneo** - condutor constituído por mais do que um tipo de metal.

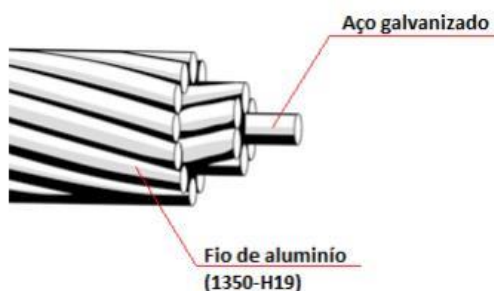


Figura 1 - Condutor A.C.S.R (*Aluminium Cable Steel Reinforced*) [8]

2.2.2. Cabo de Guarda

Os elementos constituintes de uma linha aérea estão expostos às diversas condições climáticas, podendo assim ser atingidos por descargas atmosféricas que, na falta de um correto isolamento, poderá resultar no contornamento dos isoladores agregados aos cabos condutores e, subsequentemente, curto-circuitos que provocarão a atuação dos disjuntores. Isto resulta na interrupção do fornecimento de energia elétrica [4].

Por forma a minimizar estes acontecimentos, são utilizados cabos de guarda ligados diretamente ao apoio, e a sua colocação é na parte superior dos mesmos. Estes cabos na ocorrência de descargas atmosféricas sobre a linha têm a capacidade de escoar a onda de intensidade de corrente elevada através dos elétrodos de terra presentes nos sistemas de terra de cada apoio.

Agregado a esta função, têm a capacidade de comunicação (voz, dados) com as subestações ou outra estação automatizada. Nestes casos, o cabo de guarda utilizado necessitará de um cabo de fibra ótica no seu interior.

Segundo a cláusula 5.2.2/PT.3 da EN 50341-3-17 a temperatura final máxima admissível no curto-circuito para cabos de guarda em alumínio-aço é de 200 °C e para cabos em aço é de 400 °C [2].

Segundo a cláusula 5.3.3.5/PT.1 da EN 50341-3-17, na existência de apenas um cabo de guarda, este terá de ser colocado por forma a que os pontos de fixação de todos os condutores se encontrem dentro de um ângulo de 20° com o vértice no ponto de fixação do cabo de guarda e a bissetriz vertical, como mostra a figura 2. Se a linha for composta por dois cabos de guarda, estes são estabelecidos de forma a que cada um dos condutores fique relativamente a um dos cabos de guarda, nas condições supramencionadas [2].

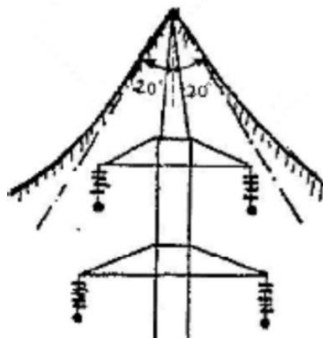


Figura 2 - Geometria do cabo de guarda - ângulo de proteção externa [5]

O cabo de guarda normalmente implementado é o A.C.S.R. (*Aluminium Cable Steel Reinforced*). Quando é pretendido adicionar a capacidade de comunicação teremos de optar por um cabo do tipo OPGW (*Optical Power Ground Wire*), este tipo de cabo contém uma estrutura tubular com uma ou mais fibras óticas no seu interior, sendo rodeado por camadas de aço e fios de alumínio, conforme ilustrado na figura 3.



Figura 3 - Cabo OPGW (*Optical Power Ground Wire*) [8]

2.2.3. Disposição dos condutores

A disposição dos condutores é um fator a ter em conta no que diz respeito ao dimensionamento das estruturas.

Os condutores podem ser dispostos em diversas posições, as mais usuais são [4]:

- › Esteira horizontal - Carateriza-se pela disposição dos condutores de fase num único plano horizontal. Utiliza-se preferencialmente em linhas de circuito simples e proporcionam estruturas de menor altura, figura 4.
- › Esteira vertical - Carateriza-se pela disposição dos condutores num plano vertical. A sua utilização destaca-se em situações de largura de vias públicas limitadas e são utilizadas em linhas de circuito simples. A nível estrutural, é necessário reforçar o apoio devido ao desequilíbrio de esforços, figura 5.
- › Esteira vertical dupla - Carateriza-se pela disposição dos condutores num plano vertical. Utiliza-se preferencialmente em linhas de circuito duplo, reduzindo assim a área ocupacional dos caminhos de servidão, figura 6.

- Galhardete - Esta disposição é caracterizada por os condutores estarem dispostos segundo os vértices de um triângulo, garantindo assim um maior afastamento entre fases. A sua utilização é empregue em todos os níveis de tensão e resulta em estruturas com alturas intermédias entre a disposição horizontal e vertical, figura 7.

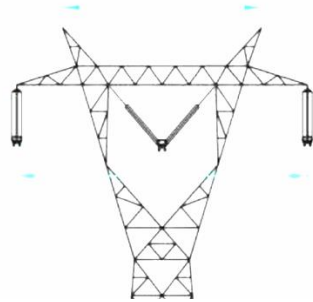


Figura 4 - Esteira horizontal

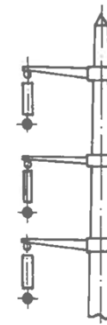


Figura 5 - Esteira vertical, circuito simples

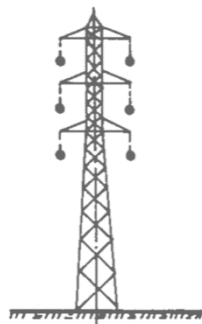


Figura 6 - Esteira vertical, circuito duplo

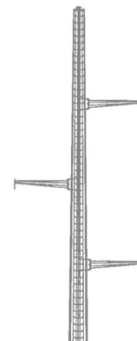


Figura 7 - Galhardete

2.2.4. Cadeias de isoladores

Os isoladores têm como função evitar a passagem de corrente elétrica dos condutores para os apoios e suportar mecanicamente os condutores. A escolha dos isoladores é condicionada pelo nível de poluição da zona onde a linha será implantada, uma vez que este é um parâmetro que agrava o perigo de contornamento, obrigando a um dimensionamento mais cuidado.

Quanto ao tipo de isolador, este poderá ser um isolador rígido ou uma cadeia de isoladores. A figura 8 representa de forma esquemática estes dois tipos de isoladores.

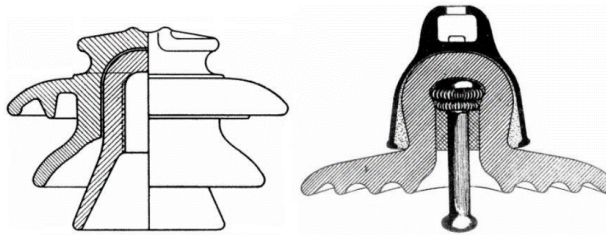


Figura 8 - Tipos de isoladores [9]

Embora mais baratos, os isoladores rígidos têm caído em desuso uma vez que em caso de defeito no isolamento, é necessário substituir o isolador completo. Já nas cadeias de isoladores, apenas é necessário substituir a campânula que apresenta defeito.

As cadeias são constituídas por vários isoladores de material cerâmico, como porcelana, vidro ou resinas artificiais, por componentes metálicos e pelo material ligante que as une. Além destes componentes, podem também possuir anéis de guarda (também designados por anéis de Nicholson) ou hastes de descarga, colocadas num ou noutro extremo da cadeia, ou em ambos, de modo a assegurar uma proteção contra possíveis arcos elétricos e uma melhor repartição da potência pelos elementos da cadeia. As hastes de descarga são também utilizadas para proteger as cadeias de isoladores em situações de descarga atmosférica, uma vez que a corrente de descarga ao encaminhar-se pela superfície da cadeia pode originar a sua destruição e um curto-circuito à terra.

Independentemente da sua constituição ou configuração, os isoladores devem estar dimensionados de modo a resistirem aos esforços mecânicos atuantes, nomeadamente, a ação do vento sobre os próprios isoladores e os esforços transmitidos pelos condutores (peso próprio, resultante da ação do vento e tensão mecânica de tração).

Em linhas aéreas de alta tensão, aplicam-se dois tipos de cadeias de isoladores: cadeias de suspensão e cadeias de amarração.

As cadeias de suspensão são ligadas ao braço do apoio e dispõem-se na vertical, paralelas ao apoio, sendo o condutor suspenso na extremidade inferior, normalmente a sua utilização está associada a apoios de alinhamento que não contenham vãos adjacentes bastante desequilibrados, economicamente são mais favoráveis, pois apenas necessitam de instalar uma cadeia por condutor.

As cadeias de amarração fazem a ligação entre o condutor e o apoio praticamente na horizontal, sendo normalmente utilizadas em apoios sujeitos a esforços elevados,

nomeadamente, em apoios de ângulo, reforço, derivação e fim de linha. Os deslocamentos deste tipo de cadeia são praticamente inexistentes. Do ponto de vista económico, deve ser ponderada a sua utilização, pois necessita do dobro das cadeias quando comparado com as de suspensão.

As figuras 9,10,11 e 12 ilustram os dois tipos de cadeias de isoladores, as cadeias de suspensão e de amarração, com e sem hastes de descarga.

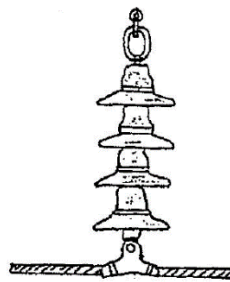


Figura 9 - Cadeia de isoladores em suspensão

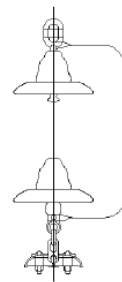


Figura 10 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em suspensão

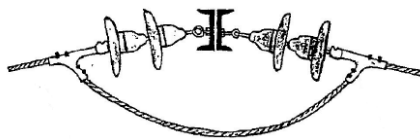


Figura 11 - Cadeia de isoladores em amarração

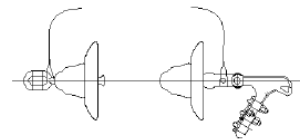


Figura 12 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em amarração

A utilização dos diferentes tipos de cadeias de isoladores está condicionada pelas condições de operação e implantação de uma linha, por vezes torna-se necessário utilizar cadeias de amarração em apoios de alinhamento que inicialmente se pensaria utilizar cadeias em suspensão. Uma situação que exemplifica esta condicionante é quando se está na presença de locais com declive bastante acentuados em que um dos postes da linha se encontra numa posição inferior comparando com o apoio a montante e a jusante, este caso pode levar a que as cadeias de suspensão fiquem enforcadas, ou seja, a cadeia de isoladores fica sujeita a uma força resultante ascendente em vez de descendente, como seria de esperar. A figura 13 ilustra um exemplo de um apoio enforcado.

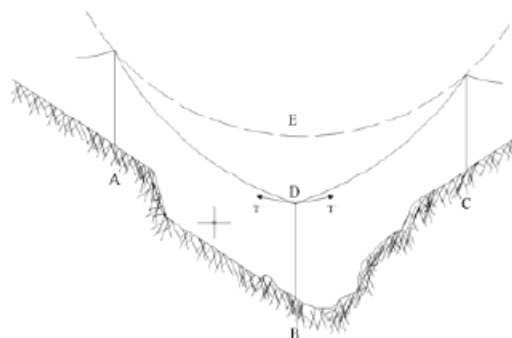


Figura 13 - Apoio B enforcado

A cláusula 10.7/PT.1 da EN 50341-3-17, impõe como requisito mecânico que as cadeias de isoladores devem ter uma carga mínima de rotura mecânica pelo menos igual à tração de rotura dos condutores [2].

O nível de isolamento adotado é definido pela tensão suportada por um isolador sob chuva, durante um minuto e à frequência de 50 Hz. A tensão de contornamento sob chuva dos isoladores, deverá ser superior em pelo menos 10% à respetiva tensão de ensaio e deve ser pelo menos 4 vezes maior que a tensão simples da linha aérea, pois as máximas sobretensões de manobra numa rede não ultrapassarão cerca de 3 a 3,5 vezes a respetiva tensão simples.

Em redes trifásicas a tensão de contornamento sob chuva U_{ch} não deverá ser inferior a:

$$U_{ch} \geq 3 * \left(\frac{\sqrt{2} * U_m}{\sqrt{3}} \right) = 2,45 * U_m [kV] \quad (2.1)$$

em que U_m é a tensão mais elevada em [kV].

O peso da cadeia de isoladores depende do número de elementos que a constituem. O número de elementos é calculado tendo em conta o isolador escolhido, consultando-se a folha de características do isolador e retirando-se a informação relativa à linha de fuga.

Para uma correta escolha do tipo de isolador a usar, é necessário classificar a zona onde a linha será implantada quanto à poluição.

Na Tabela 1 são apresentados os valores da linha de fuga em função do nível de poluição.

Tabela 1 - Linha de fuga específica mínima em função do nível de poluição da região de implementação da linha

Classe	Nível de poluição	Linha de fuga específica mínima [cm/kV]
1	Fraca	1,6
2	Média	2
3	Forte	2,5
4	Muito Forte	3,1

a) Linha de fuga necessária

O comprimento da linha de fuga é obtido a partir da expressão seguinte:

$$I_{fuga} = 20 * U [mm] \quad (2.2)$$

Onde:

U - Tensão Nominal da Linha [kV].

b) Escolha dos isoladores em função da linha de fuga

No caso dos isoladores rígidos a seleção deverá observar o comprimento da linha de fuga do isolador em comparação com o valor da linha de fuga necessária em função da tensão nominal e do nível de poluição local.

No caso dos isoladores de cadeia acoplados em série, sabendo qual a linha de fuga necessária podemos determinar quantos isoladores de cadeia serão necessários:

$$N_{isol}^{o} = \frac{I_{fuga}}{linha\ de\ fuga} \quad (2.3)$$

De seguida, são apresentados alguns incidentes que poderão decorrer de um mau dimensionamento ou de deficiente manutenção [10]:

- › **Condutividade através da massa do isolador** - a corrente elétrica circula pela massa do isolador até ao apoio. Este incidente não é grave uma vez que o valor da corrente é desprezável;
- › **Perfuração da massa do isolador** - este incidente é bastante grave, pois a corrente que circula já não é desprezável. Resulta da presença de impurezas na massa do isolador. Com o aumento do nível de tensão, este incidente tem maior probabilidade de acontecer;
- › **Condutividade superficial** - está associada à acumulação de humidade, poeira e depósitos salinos (no caso de estar próximo do mar) à superfície dos isoladores. É possível atenuar este fenómeno, conferindo aos isoladores formas e dimensões adequadas de modo a aumentar o comprimento da linha de fuga;
- › **Descarga disruptiva e contornamento** - este incidente ocorre quando se forma um arco elétrico entre o condutor e o apoio, através do ar que os separa, cuja rigidez dielétrica, em determinadas situações não é suficiente para o evitar. Um conveniente afastamento entre condutores e apoios é um modo de evitar este fenómeno.

2.2.5. Apoios

Os apoios das linhas aéreas são fabricados em vários materiais, aço, betão armado, compósitos, alumínio e madeira.

A conceção e escolha do material a aplicar em determinado apoio está interligada com vários fatores, nível de tensão da instalação, quantidade de circuitos que terão de suportar e local onde serão aplicados.

Quanto maior for o nível de tensão das instalações, maiores serão as distâncias de isolamento e, conseqüentemente, as dimensões da estrutura. As cargas a que o apoio estará sujeito também serão superiores, dado que as tensões mais elevadas correspondem em geral a cabos de dimensões transversais mais elevadas e vãos mais longos [11].

A conceção e geometria dos apoios são definidos pela coordenação do isolamento do escalão de tensão a que se destinam e pela função a desempenhar: alinhamento, derivação,

ângulo, reforço ou fim de linha, que determina as ações de dimensionamento de acordo com a regulamentação ou normativos adotados.

Para além dos aspetos elétricos e mecânicos deve ter-se em consideração outros valores, nomeadamente de natureza ambiental que passaram a ser de avaliação obrigatória e objetiva em termos dos impactos paisagísticos e da avifauna.

Geralmente em projetos de linhas aéreas de alta tensão são utilizados três tipos de apoios, reticulados, tubulares e de betão. Estes tipos de apoios são definidos pelas seguintes características:

- › Apoios reticulados: Apoios caracterizados pela sua base de grande dimensão, o seu transporte é efetuado peça a peça, facilitando assim o mesmo. A sua montagem é efetuada no local de implantação e necessitam de um elevado número de horas, tornando-se um apoio dispendioso.
- › Apoios tubulares: Apoios caracterizados pela sua elevada robustez e silhuetas delgadas, necessitando assim de uma reduzida área de implantação, proporcionando uma melhor receptividade por parte da população. O seu transporte é efetuado em módulos, facilitando o seu transporte e são montados no local de implantação, têm uma montagem rápida e é necessário o uso de grua. Do ponto de vista económico têm preços elevados.
- › Apoios de betão: Apoios caracterizados pelo reduzido espaço de implantação e baixo custo. O facto de serem uma peça única, em terrenos sinuosos e de difícil acesso, trazem inúmeras dificuldades ao seu transporte, podendo ser mesmo impossível.

A altura dos apoios alterna em conformidade com a topografia do terreno e os obstáculos que a linha tem que atravessar.

A figura 14 ilustra as diferentes funções que caracterizam os apoios existentes nas linhas aéreas [12]:

- › Apoio de alinhamento (a) - apoio normalmente utilizado em patamar e com vãos adjacentes equiparados;
- › Apoio de ângulo (b) - apoio situado num ângulo da linha;
- › Apoio de reforço (c) - apoio capaz de suportar esforços agravados, consequentes de rotura do cabo de guarda ou condutor;

- › Apoio de fim de linha (d) - apoio capaz de suportar a totalidade dos esforços transmitidos pelos condutores, cabos de guarda e restantes acessórios de um só lado da linha;
- › Apoio de derivação (e) - apoio onde se estabelece uma ou mais derivações da linha;
- › Apoio de derivação em ângulo - como o próprio nome indica, é um apoio situado num ângulo e onde se estabelece uma derivação.

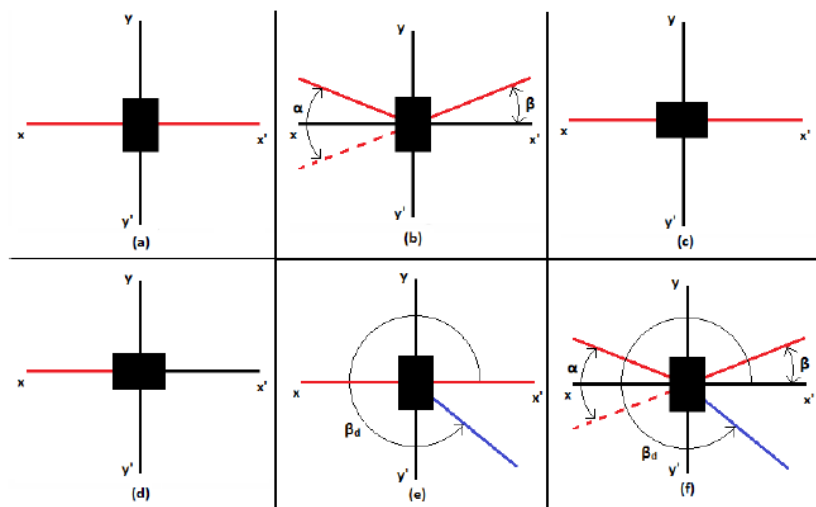


Figura 14 - Tipos de apoios, vista de topo [9]

No que diz respeito às forças a que os apoios estão sujeitos, estas são decompostas num sistema de eixos ortogonais (x , y e z) consequentemente, esforço longitudinais (F_x), transversais (F_y) e verticais (F_z).

Os esforços longitudinais correspondem às tensões exercidas pelos condutores e cabos de guarda, na existência de vãos adjacentes desequilibrados ou em situações de apoio fim de linha.

Já os esforços transversais estão relacionados com a ação do vento sobre os condutores, isoladores e cabos de guarda, na situação mais agravante, quando o vento é normal à linha.

Por último, os esforços verticais advêm do peso da cadeia de isoladores e do peso próprio dos condutores, se se encontrar numa zona propícia a gelo têm de suportar o peso relativo à manga de gelo que se forma em volta do condutor.

A figura 15 representa as três forças a que os apoios estão sujeitos.

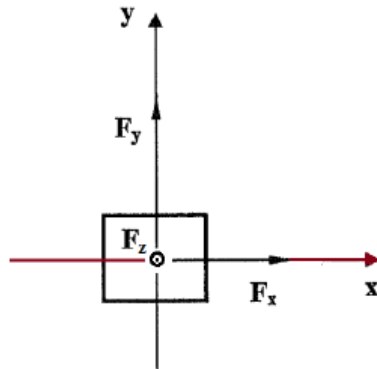


Figura 15 - Forças aplicadas a um apoio, vista de topo [9]

Sumário:

Terminado este capítulo, percebem-se os diferentes elementos que intervêm na implementação das linhas. A sua escolha mostra-se determinante para o sucesso deste processo, pois estas têm que estar em consonância com as diferentes condicionantes externas estudadas para o projeto.

O leque de possíveis respostas é vasto, contudo, cada opção tomada deve ser justificada e ter como enfoque a otimização. No final, o seu conjunto desenhará o “fato à medida” para o projeto.

Capítulo 3

Metodologia do Cálculo Mecânico

O capítulo corrente, destaca a componente do cálculo mecânico e o seu papel no desenvolvimento do projeto, precisando os parâmetros mais relevantes para a intervenção deste tipo de cálculo, listando assim os diferentes casos de carga impostos pelos aspetos normativos para Portugal - EN 50341-3-17 - para as diversas funções a que se destina determinado apoio.

Contextualização

Os apoios presentes nas linhas aéreas de transmissão de energia elétrica estão sujeitos a esforços mecânicos imputados pelos condutores. Nesta matéria, o cálculo mecânico ganha relevância no que diz respeito à determinação das tensões de montagem a aplicar aos condutores, assegurando que a rotura dos condutores não aconteça.

O cálculo mecânico também incide no dimensionamento dos apoios, de modo a verificar a estabilidade dos mesmos quando sujeitos aos esforços transmitidos pelos condutores dependendo do caso de carga em análise, segundo a Norma Europeia EN 50341-3-17, bem como a verificação da estabilidade dos maciços de fundação [12] [2].

A altura dos postes deve assegurar que os condutores garantam as distâncias mínimas regulamentares, evitando uma aproximação exagerada dos condutores a objetos próximos da linha. O afastamento entre condutores deve cumprir igualmente a distância regulamentar em

vigor, de acordo com o disposto na EN 50341-3-17, de modo a prevenir eventuais arcos que possam formar-se devido a uma descarga atmosférica, para assim garantir o adequado isolamento entre condutores [2].

3.1 - Tensão Mecânica Máxima

Segundo a cláusula 9.2.4/PT.1 da EN 50341-3-17 o projeto da linha deve garantir que a tração máxima admissível nos condutores não exceda 40% da tração de rotura dos mesmos. [2]

A expressão que garante essa condição é:

$$t_{seg} = \frac{0,4 \cdot T_R}{\sigma} [N/mm^2] \quad (3.1)$$

- › T_R - Tensão de rotura dos condutores [N];
- › σ - Secção do cabo [mm²];
- › t_{seg} - Tensão de segurança [N/mm²].

A escolha da tensão máxima a aplicar nos condutores e cabos de guarda, não se deve reger única e exclusivamente pelo valor da tensão de segurança.

Deve ser tido em conta que quanto maior for a tensão aplicada, menores são as flechas e assim, mais facilmente se garante as distâncias regulamentares, no entanto, trazem esforços mecânicos excessivos aos apoios, podendo ser necessário reforçar os mesmos e torná-los mais dispendiosos. Por outro lado, se for considerada uma tensão inferior, os esforços mecânicos diminuem, as flechas aumentam, tornando mais difícil cumprir com as distâncias regulamentares.

Desta feita, é necessário ter em conta estas duas condicionantes, procurando encontrar um ponto de equilíbrio. Em regra, os valores considerados para as trações máximas estão compreendidos entre os 70 e os 90 [N/mm²].

3.2 - Ações dos agentes externos sobre as Linhas

A EN 50341-1 classifica as ações segundo a variação no tempo da seguinte forma [3]:

- › Ações permanentes - Ações horizontais devidas às componentes horizontais das trações máximas a que os condutores estão sujeitos, e às ações verticais devidas ao seu peso próprio.
- › Ações variáveis - Ações do vento e do gelo, assim como as variações de temperatura que ocorrem ao longo do dia e de estação para estação.

3.3 - Ação do Vento

De acordo com a cláusula 4.2.2 da EN 50341-3-17, para quantificar as ações do vento para as linhas aéreas, considera-se que o território Português está dividido em duas zonas [2].

- › Zona A - A totalidade do território, com a exceção das regiões pertencentes à zona B;
- › Zona B - As regiões autónomas dos Açores e da Madeira e as regiões continentais situadas no interior de uma faixa de 5 km de largura ao longo da costa ou em altitudes acima dos 600m.

A ação do vento sobre os condutores e restantes elementos constituintes da linha, manifesta-se sobre a forma de pressão, resultante da resistência encontrada aquando do impacto com os elementos da linha [4].

Para efeitos de dimensionamento considera-se que o vento atua na direção normal à linha (situação mais agravante).

3.4 - Velocidade e Pressão Dinâmica do Vento

Segundo a EN 50341-1, são consideradas diferentes velocidades do vento, assim como a pressão dinâmica, conforme é descrito de seguida [3]:

Velocidade média do vento $V_{média}$ - é a velocidade média do vento em m/s, durante um período de 10 minutos a uma altura de 10 metros acima do solo em terreno relativamente aberto.

Velocidade de rajada V_g - é um valor máximo característico da turbulência momentânea do vento, baseado na velocidade média do vento ao longo de 2 segundos:

$$V_g = K_g \cdot V_{média} [m/s] \quad (3.2)$$

Onde,

K_g - é o fator do vento de rajada, com valor de 1,5 [adimensional]

Velocidade do vento de referência V_r - velocidade do vento a ter em conta a 10 metros acima do solo, no local em questão, medido no local de medição mais próximo.

Velocidade do vento a uma altura arbitrária h acima do solo V_h - é dada pela seguinte lei exponencial:

$$\text{Se } h < 20 \text{ m, } V_h = 1,1484 \cdot V_r [m/s] \quad (3.3)$$

$$\text{Se } h \geq 20 \text{ m, } V_h = V_r \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0,2} [m/s] \quad (3.4)$$

Segundo a EN 50341-3-17, para Portugal consideram-se duas zonas, conforme demonstrado na tabela 2.

Tabela 2 - Velocidade do vento em Zona A e Zona B

	Zona A	Zona B
$V_{média} \text{ (m/s)}$	20	22
$V_g \text{ (m/s)}$	30	33
$V_r \text{ (m/s)}$	30	33

Pressão dinâmica do vento q_h - é dada pela expressão:

$$q_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_h^2 \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (3.5)$$

Onde:

ρ - é a densidade do ar de valor 1,225 [kg/m³] à temperatura de 15 °C e pressão atmosférica de 1013 hPa;

V_h - é a velocidade do vento a uma altura h acima do solo [m/s].

A tabela 3 apresenta alguns valores da pressão dinâmica do vento em função da altura acima do solo e zona de vento.

Tabela 3 - Pressão dinâmica do vento

h [m]	qh [Pa]	
	Zona A	Zona B
0	727	880
10	727	880
20	727	880
30	855	1035
40	960	1161
50	1049	1270
60	1129	1366
70	1201	1453
80	1266	1532
90	1328	1606

3.5 - Forças do Vento sobre os Elementos da Linha

A força do vento aplicada aos elementos da linha, numa direção normal à mesma é dada pela seguinte equação:

$$Q_W = q_h \cdot G_q \cdot G_x \cdot C_x \cdot A \text{ [N]} \quad (3.6)$$

Onde:

G_x - é o fator de ressonância estrutural do elemento da linha considerado [adimensional];

G_q - é o fator de rajada [adimensional];

C_x - é o coeficiente de forma do elemento da linha em consideração [adimensional];

q_h - é a pressão dinâmica do vento [N/m²];

A - é a área do elemento da linha considerado, projetada num plano perpendicular à direção do vento [m²].

Para o projeto em causa, considera-se:

$G_x = 0,6$ para condutores e cabos de guarda (1,0/1,2 para apoios e isoladores);

$G_q = 1$;

C_x , varia consoante o diâmetro dos condutores, sendo:

1,2 para $d < 12,5$ [mm]

1,1 para $12,5 \leq d \leq 15,8$ [mm]

1,0 para $d > 15,8$ [mm]

No caso dos condutores, $A = d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2}$, onde L_1 e L_2 são os comprimentos dos vãos adjacentes.

3.6 - Forças do Vento sobre os Condutores

$$Q_{wc} = q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot \cos^2 \phi \text{ [N]} \quad (3.7)$$

Onde:

G_c - é o fator de ressonância do condutor ou cabo de guarda;

G_q - é o fator de rajada;

C_c - é o coeficiente de forma dos condutores ou cabos de guarda e depende do seu diâmetro;

q_h - é a pressão dinâmica do vento [N/m^2];

d - é o diâmetro do condutor ou cabo de guarda [mm];

L_1 e L_2 - são os comprimentos dos vãos adjacentes em [m];

$\cos^2 \phi$ - é o ângulo de incidência do vento na linha em [grados].

3.7 - Forças do Vento sobre os Isoladores

$$Q_{wins} = q_h \cdot G_q \cdot G_x \cdot C_x \cdot A \text{ [N]} \quad (3.8)$$

Onde:

G_x - é o fator de ressonância estrutural nos isoladores;

G_q - é o fator de rajada;

C_x - é o coeficiente de forma dos isoladores e tem o valor de 1,2;

q_h - é a pressão dinâmica do vento [N/m^2];

A - é a área dos isoladores, projetada horizontalmente num plano vertical paralelo ao eixo em [m^2].

3.8 - Ação do Gelo

A formação de uma manga de gelo que envolve os condutores e cabos de guarda contribui para o aumento do peso, diâmetro aparente e, conseqüentemente, da superfície batida pelo vento.

A consideração de cargas de gelo no dimensionamento de linhas aéreas tem em conta a temperatura, humidade do ar e a altitude dos locais atravessados pela linha. Segundo a cláusula 3.2.3/PT.1 da EN 50341-3-17, no território português devem ser consideradas zonas de gelo, as regiões que se encontrem em altitudes superiores a 600 metros nos seguintes distritos: Viana do Castelo, Braga, Vila Real, Bragança, Porto, Viseu, Guarda, Castelo Branco, Coimbra e Portalegre. [2]

A manga de gelo a considerar no cálculo mecânico dos condutores e cabos de guarda das linhas aéreas deve ter uma espessura uniforme de, pelo menos, 10 mm e uma densidade de 900 kg/m^3 , para o projeto não se considera cargas de gelo nas estruturas ou isoladores [2].

3.9 - Ação da Variação da Temperatura

Os condutores das linhas aéreas estão sujeitos a variações acentuadas da temperatura ambiente. A temperatura dos condutores tem em consideração a relação entre o calor ganho e o calor cedido ao meio ambiente. O primeiro deve-se principalmente ao efeito Joule, assim como, ao aquecimento devido à temperatura ambiente. Já as perdas de calor para o meio ambiente dão-se por irradiação e convecção.

Uma vez que os condutores são constituídos por elementos metálicos, cujo coeficiente de dilatação térmica linear é positivo, o conhecimento da influência da temperatura para o cálculo mecânico é essencial. A variação desta grandeza traduz-se na variação do comprimento do condutor e conseqüentemente na variação da tração a que os condutores estão sujeitos.

3.10 - Temperatura Mínima e Máxima de Projeto

Segundo a cláusula 4.2.5/PT.1 da EN 50341-3-17, as temperaturas a ter em consideração para o cálculo de flechas mínimas são, $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para zonas em que não se considera gelo e $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para as que se considera.

Referente ao cálculo de flechas máximas deve ser tido em conta as seguintes temperaturas máximas:

Cabos de guarda:	50 °C
Condutores:	75 °C

Salienta-se que estas são as temperaturas a serem consideradas, exceto se indicado nas especificações do projeto.

3.11 - Estados Atmosféricos

O estado atmosférico conhecido como Primavera, considera a condição de carga de vento máximo ($\gamma_W \cdot Q_W$), a temperatura a ter em conta deve ser de 15 °C. Esta deve também ser considerada a **temperatura de referência** para o EDS (*every-day-stress*).

Para o conhecido estado atmosférico de Inverno, considera a condição de carga de vento reduzido ($\psi_W \cdot Q_W$), a temperatura associada a este estado é de -5 °C para zonas sem gelo e -10°C para as restantes.

O estado atmosférico de Verão, também conhecido como estado para o cálculo das flechas máximas, considera-se ausência de vento e temperatura máxima, que varia consoante os condutores.

Cabos de guarda:	50 °C
Condutores:	75 °C

3.12 - Coeficientes de Sobrecarga

O coeficiente de sobrecarga não é mais do que a resultante das diferentes ações que se exercem sobre um condutor, sejam elas, ação do vento, do gelo e o peso próprio do condutor. As ações exercidas sobre um condutor são apresentadas na figura 16.

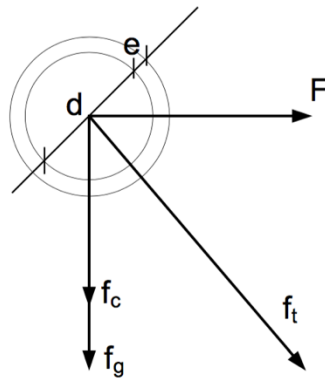


Figura 16 - Esquema de forças aplicadas num condutor

Onde:

F - Força exercida pelo vento [N];

f_c - Peso próprio do condutor [N];

f_g - Peso da manga de gelo [N];

f_t - Força resultante - soma vetorial das forças aplicadas no condutor [N];

d - Diâmetro do condutor [mm];

e - Espessura da manga de gelo [mm];

ω - Peso do condutor [N/m];

Os agentes atmosféricos que definem os estados atmosféricos são introduzidos no cálculo mecânico por meio de um coeficiente de sobrecarga - m . O coeficiente de sobrecarga é definido como o coeficiente entre a força resultante exercida no condutor e o peso próprio do mesmo.

$$f_t = \sqrt{[(f_c) + (f_g)]^2 + F^2} \quad (3.9)$$

$$m = \frac{f_t}{f_c} \quad (3.10)$$

↔

$$m = \frac{\sqrt{\{\omega + \rho_{\text{gelo}} \cdot \frac{\pi}{4} [(d + 2 \cdot e)^2 - d^2]\}^2 + F^2}}{\omega} \quad (3.11)$$

3.13 - Equação dos Estados

A equação de estados é uma equação de equilíbrio mecânico que relaciona a tensão mecânica dos condutores de uma linha aérea, num determinado estado atmosférico, a partir da tensão existente nos condutores num estado atmosférico conhecido, sabendo-se à partida o comprimento do vão e as características mecânicas dos condutores [5].

Sucintamente, a equação de estados traduz a variação da tensão mecânica, em função da temperatura.

Resolvendo a equação 3.12 é possível determinar a tensão mecânica t_{θ_i} , à temperatura θ_i , conhecendo para o estado mais desfavorável com temperatura θ_k e tensão mecânica t_{θ_k} .

Esta equação encontra-se representada na expressão seguinte.

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_{\theta_i}^2 \cdot w^2 \cdot L_{\text{medio}}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_{\text{máx}}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot w^2 \cdot L_{\text{medio}}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\text{máx}}^2} \quad (3.12)$$

Onde:

θ_i e θ_k - Temperatura [$^{\circ}\text{C}$];

t_{θ_i} e t_{θ_k} - Tensão mecânica do condutor às temperaturas θ_i e θ_k [N/mm^2];

α_d - Coeficiente de dilatação linear do condutor [$^{\circ}\text{C}^{-1}$];

E - Módulo de Young [N/mm^2];

α - Secção do condutor [mm^2];

w - Peso do condutor [N/m];

m_k - Coeficiente de sobrecarga do estado mais desfavorável.

3.14 - Cantão e Vão Equivalente Fictício

Segundo o RSLEAT, o vão equivalente representa um vão fictício no qual as variações da tensão mecânica, devidas às variações da carga e da temperatura, são sensivelmente iguais às dos vãos reais do cantão.

Caso se esteja na presença de um cantão, conjunto de vãos compreendidos entre dois apoios, nos quais os condutores são fixados por cadeias de amarração, surge a necessidade de encontrar o vão equivalente dessa porção de linha.



Figura 17 - Exemplo de um cantão

O cálculo do vão equivalente/médio é obtido a partir da equação 3.13:

$$L_{medio} = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} [m] \quad (3.13)$$

Onde:

L_i - comprimento dos vãos [m].

Agregado ao supramencionado, o vão equivalente fictício representa o vão que na presença dos diversos estados atmosféricos, deixaria as cadeias de suspensão sempre verticais.

Este, também chamado de vão ideal de regulação [10], é importante na regulação mecânica da linha, ou seja, na escolha adequada da tensão de montagem dos condutores, de modo a que no estado mais desfavorável essa tensão não ultrapasse a tensão de rotura dos condutores.

Duas regras de boas práticas que um projetista deve respeitar são:

- › Sempre que possível utilizar apoios com cadeias de suspensão. No entanto, não se deve projetar cantões com mais de quinze vãos, ou seja, deve ser instalado no mínimo um apoio em amarração e reforço a cada quinze vãos;
- › Verificar se o vão mais pequeno do cantão, apresenta um comprimento igual ou superior a 75% do vão equivalente, e se o maior vão do cantão apresenta um comprimento igual ou inferior a 125% do vão equivalente.

3.15 - EDS (*every-day-stress*)

Quanto maior for a tensão mecânica aplicada a um cabo, maiores serão as probabilidades de aparecer o fenómeno das vibrações. O que tornou necessário determinar os limites para as tensões a aplicar de forma a evitar que o fenómeno aparecesse e provoca-se roturas no cabo, chegando-se assim a um conceito intitulado “tensão de cada dia” [10].

A tensão de cada dia habitualmente expressa-se em tantos por cento da carga de rotura do cabo e os seus valores são os que constam na tabela 4 [10]:

Tabela 4 - Valores do coeficiente EDS, em percentagem da carga de rotura do cabo

Classe do condutor	Linhas sem proteção	Linhas com proteção		
		Com varas de proteção	Com antivibradores	Com varas de proteção e antivibradores
Cobre	26	-	-	-
Alumínio	17	-	-	-
Aldrey	18	-	26	-
Alumínio-aço	18	22	24	24
Cabos de aço com grampos rígidos	11	-	-	-
Cabos de aço com grampos oscilantes	13	-	-	-

Existe a opinião de que ainda que as linhas tenham antivibradores, não se deve ultrapassar os valores referidos na tabela 5 [10]:

Tabela 5 - Valores do coeficiente EDS, em percentagem da carga de rotura do cabo

Tipo de Cabos	EDS
Alumínio-aço	18
Aço com grampos rígidos	11
Aço com grampos oscilantes	13

Segundo se pensa, em linhas com fases, de condutores, dupla, tripla, quádrupla, etc., o uso dos separadores contribui para que as vibrações se autoamortizem. [10]

3.16 - Geometria das Linhas

3.16.1. Curva Caraterística dos Condutores Suspensos

Um fio suficientemente flexível e não elástico, estendido entre dois pontos elevados o suficiente para que o fio nunca toque no solo, em qualquer ponto intermédio, adquire uma forma caraterística denominada por catenária [4].

A expressão matemática que traduz a curva catenária é apresentada a seguir.

$$y = p \cdot \left(\cosh \frac{x}{p} \right) - p \text{ [m]} \quad (3.14)$$

Onde:

p - Parâmetro da catenária [m];

x - Distância medida em projeção horizontal entre o ponto em que a tangente à curva é horizontal e um ponto qualquer da catenária [m];

y - Distância medida em projeção vertical entre o ponto em que a tangente à curva é horizontal e um ponto qualquer da catenária [m].

O parâmetro da catenária é calculado a partir da seguinte expressão:

$$p = \frac{t_{\theta i} \cdot \sigma}{\omega} [m] \quad (3.15)$$

Onde:

$t_{\theta i}$ - Tensão de montagem do condutor [N/mm²];

σ - Secção do condutor [mm²];

ω - Peso próprio do condutor [N/m].

Geometricamente, o parâmetro p da catenária representa o raio de curvatura no ponto x onde a tangente à curva é horizontal. Apesar desta hipótese de cálculo nos conduzir a resultados considerados satisfatórios, deve-se, no entanto, ter em consideração que estes resultados se afastam um pouco da realidade, uma vez que os materiais condutores utilizados habitualmente em linhas aéreas - cobre, alumínio, alumínio-aço, entre outros - além de serem elasticamente deformáveis, não apresentam a flexibilidade desejada. Agregado a isso, a atuação do vento é geralmente em forma de rajadas irregulares, impondo curvatura dupla e movimento a uma curva que se supõe plana e em equilíbrio [13] [6].

A opção da catenária como curva de equilíbrio resulta, então, numa aproximação por excesso e embora o erro associado não seja exageradamente grande, não é de esperar um elevado grau de rigor no cálculo mecânico de linhas aéreas [5] [14].

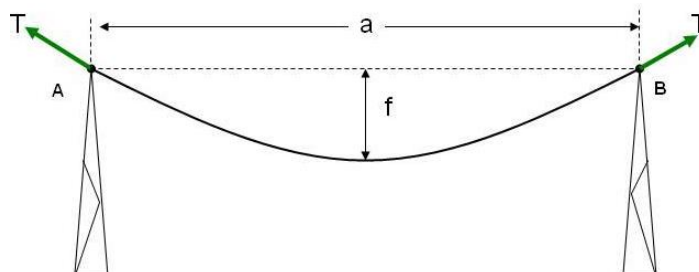


Figura 18 - Catenária, flecha e vão formado entre os apoios A e B, adaptado de [12]

3.16.2. Aproximação Parabólica

Embora a aproximação feita no ponto anterior seja bastante aceitável, o grande entrave para o seu uso é o facto de ser necessário calcular a função cosseno hiperbólico. Deste modo, e com o objetivo de facilitar e tornar mais rápido o cálculo mecânico de linhas aéreas, é usual considerar-se uma outra aproximação, a substituição da catenária pela parábola oscultriz. A expressão da parábola oscultriz é apresentada de seguida.

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot p} \quad (3.16)$$

Registe-se que esta aproximação é válida para linhas elétricas com vãos inferiores a 500 metros, uma vez que para vãos com comprimentos superiores a representação do cabo pela parábola introduz erros consideráveis [15].

A figura 19, demonstra que se coincidirmos os pontos mais baixos das curvas, a curva da catenária é interior relativamente à parábola.

Já a figura 20, mostra que numa representação mais aproximada da realidade, considerando os pontos de fixação do condutor (I e S), a curva catenária apresenta uma flecha superior.

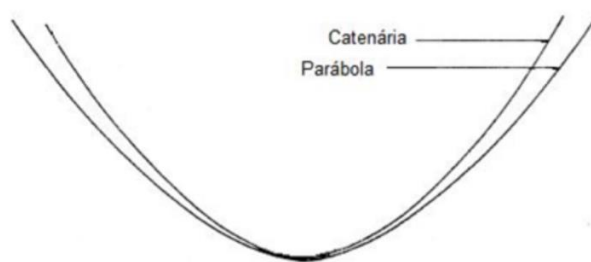


Figura 19 - Posições relativas das curvas catenária e parábola [14]

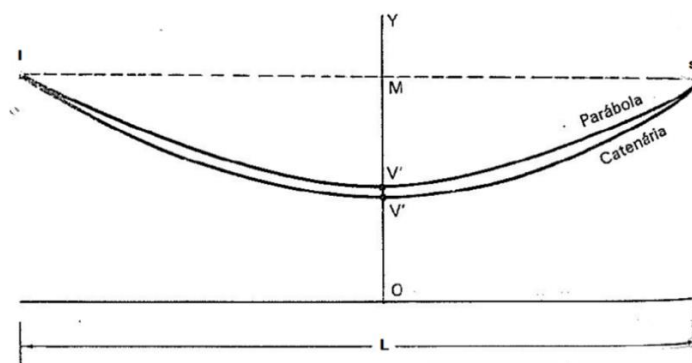


Figura 20 - Posições relativas das curvas catenária e parábola [10]

De acordo com a topologia do terreno são classificados dois tipos de vãos, vãos em desnível ou em patamar.

3.16.3. Vãos em Desnível

A fixação de condutores entre dois apoios que se encontram implantados em cotas diferentes, caracteriza-se por vão em declive ou desnivelado.

As equações que traduzem a aproximação parabólica são:

$$y_a = \frac{x_a^2}{2 \cdot P}$$

$$x_a = \frac{P \cdot h}{L} + \frac{L}{2}$$

$$x_b = \frac{P \cdot h}{L} - \frac{L}{2}$$

Onde:

x_a - Distância horizontal ao apoio mais elevado [m];

x_b - Distância horizontal ao apoio mais baixo [m];

y_a - Distância vertical da cota zero ao topo do apoio [m];

P - Parâmetro da catenária [m];

L - Distância horizontal entre apoios [m].

A figura 21, exemplifica um caso dessa natureza.

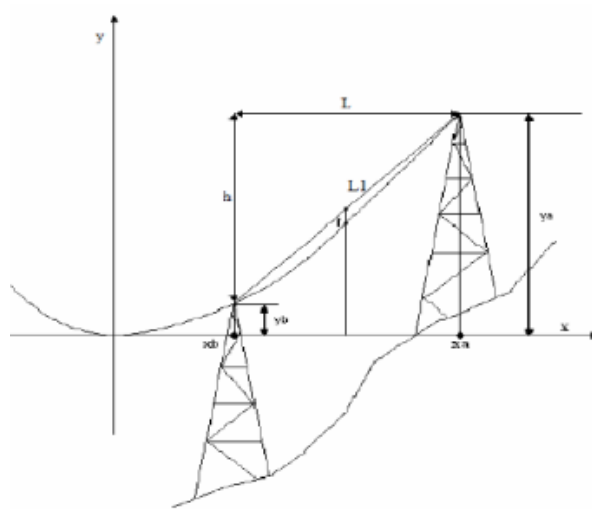


Figura 21 - Representação de um vão em desnível [12]

Em vãos desnivelados, a flecha pode ser calculada recorrendo à seguinte expressão matemática:

$$f = \frac{m \cdot \omega \cdot L \cdot L_1}{8 \cdot \sigma \cdot t_{\theta i}} [m] \quad (3.17)$$

Onde:

m - Coeficiente de sobrecarga de valor 1 (pois na regulação dos condutores pressupõe-se que não há vento nem gelo) [adimensional];

L - Comprimento do vão na horizontal [m];

L_1 - Comprimento do vão [m];

σ - Secção do condutor [mm²];

ω - Peso próprio do condutor [N/m];

$t_{\theta i}$ - Tensão de montagem do condutor à temperatura θi [N/ mm²].

Nota:

Segundo a cláusula 4.2.5/PT.1 - EN 50341-3-17, o cálculo da flecha máxima deve considerar uma temperatura não inferior a 75 °C para cabos condutores e de 50 °C para cabos de guarda, com ausência de vento [2].

A importância do seu cálculo surge da necessidade de garantir as distâncias mínimas de segurança regulamentares entre condutores, ao solo e obstáculos.

3.16.4. Vãos em Patamar

A fixação de condutores entre dois apoios que se encontram à mesma altura, caracteriza-se como vão em patamar.

As equações que traduzem a aproximação parabólica são:

$$y_a = \frac{x_a^2}{2 \cdot P}$$

$$x_a = \frac{L}{2}$$

Onde:

x_a - Distância horizontal do ponto onde a tangente à curva é horizontal e o apoio [m];

y_a - Distância vertical do ponto mais baixo da catenária ao topo do apoio [m];

P - Parâmetro da catenária [m];

L - Distância horizontal entre apoios [m].

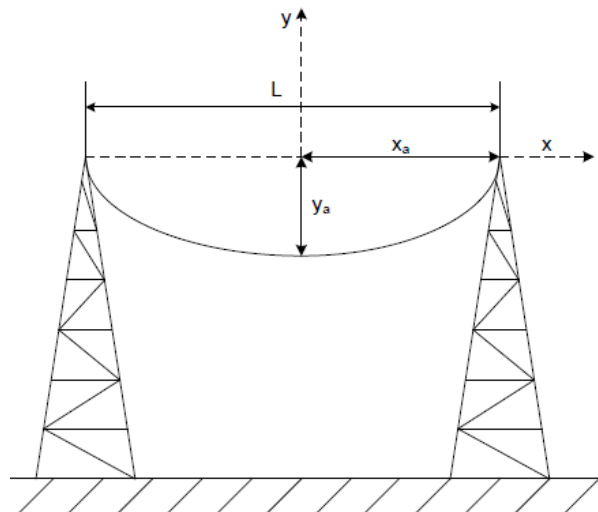


Figura 22 - Representação de um vão em patamar [12]

Em vãos de nível, a flecha pode ser calculada recorrendo à seguinte expressão matemática:

$$f = \frac{m \cdot \omega \cdot L^2}{8 \cdot \sigma \cdot t_{\theta i}} [m] \quad (3.18)$$

Onde:

m - Coeficiente de sobrecarga de valor 1 (pois na regulação dos condutores pressupõe-se que não há vento nem gelo) [adimensional];

L - Comprimento do vão [m];

σ - Secção do condutor [mm²];

ω - Peso próprio do condutor [N/m];

$t_{\theta i}$ - Tensão de montagem do condutor à temperatura θi [N/mm²].

Nota:

Segundo a cláusula 4.2.5/PT.1 - EN 50341-3-17, o cálculo da flecha máxima deve considerar uma temperatura não inferior a 75 °C para cabos condutores e de 50 °C para cabos de guarda, com ausência de vento.

A importância do seu cálculo surge da necessidade de garantir as distâncias mínimas de segurança regulamentares entre condutores, ao solo e obstáculos.

3.16.5. Vão de Peso/Gravítico

Em projetos de linhas aéreas, os apoios implantados em patamar são sujeitos a forças verticais, em que se considera que terão de suportar metade do peso dos vãos adjacentes, designado por vão de vento.

No que diz respeito a apoios em desnível, os esforços verticais a que o apoio mais elevado estará sujeito, não será igual a metade dos vãos adjacentes, mas sim, terá de suportar grande parte do peso relativo aos vãos a montante e a jusante, designado por vão de peso [16].

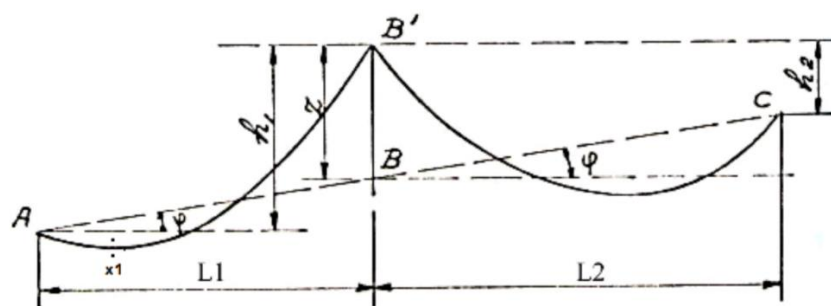


Figura 23 - Representação de dois vãos desnivelados [16]

O peso real P dos condutores de dois vãos adjacentes a suportar pelo apoio, corresponde à soma de P_1 e P_2 .

$$P = P_1 + P_2 \quad (3.19)$$

Onde,

P - é o peso real do vão de peso [N];

P_1 - é o peso aparente relativo ao vão L_1 [N];

P_2 - é o peso aparente relativo ao vão L_2 [N].

$$P_1 = \omega \cdot \frac{L_1}{2} + T_1 \cdot \frac{h_1}{L_1} \quad (3.20)$$

$$P_2 = \omega \cdot \frac{L_2}{2} + T_2 \cdot \frac{h_2}{L_2} \quad (3.21)$$

Onde,

ω - é o peso próprio dos condutores em [N];

T_1 e T_2 - são as trações aplicadas aos condutores do vão 1 e vão 2 [N];

h_1 e h_2 - são as distâncias medidas na vertical entre o ponto mais alto do próprio apoio e o apoio mais elevado [m].

Sendo,

$$\begin{cases} h_1 = L_1 \cdot \tan \phi + Z \\ h_2 = Z - L_2 \cdot \tan \phi \end{cases} \quad (3.22)$$

Relacionando as equações, o cálculo do peso real obtém-se conforme descrito na equação que se segue,

$$P = P_1 + P_2 = \omega \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} + T_1 \cdot \frac{h_1}{L_1} + T_2 \cdot \frac{h_2}{L_2} \quad (3.23)$$

Tendo em conta que os vãos são compreendidos num cantão, as trações T_1 e T_2 têm o mesmo valor.

Logo,

$$P = P_1 + P_2 = \omega \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} + T \cdot \left(\frac{Z}{L_1} + \frac{Z}{L_2} \right) \quad (3.24)$$

Se o ponto de fixação apoio B' exemplificado na figura 20, se encontrar numa posição inferior relativamente ao segmento de reta $\overline{AC}$, o termo $T \cdot \left(\frac{Z}{L_1} + \frac{Z}{L_2} \right)$, toma um sinal negativo, isto é,

$$P = P_1 + P_2 = \omega \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} - T \cdot \left(\frac{Z}{L_1} + \frac{Z}{L_2} \right) \quad (3.25)$$

O processo de cálculo do vão de peso, mostra-te moroso, pois necessita de informação detalhada do perfil da linha e da posição de implantação dos apoios, desta forma, pode adotar-se uma aproximação.

Considerando a falta de informação relativa aos dados do local de implantação de cada apoio, pode ser utilizada uma aproximação do cálculo do vão de peso, majorando o vão de vento em 1,5 vezes, de modo a permitir alguma flexibilidade.

A expressão para o cálculo do vão de peso é:

$$V\tilde{a}o_{peso} = 1,5 \cdot V\tilde{a}o_{vento} [m] \quad (3.26)$$

3.16.6. Apoio Enforcado

A figura 24 ilustra um caso em que a estrutura sofre solicitações de duas forças verticais, V_{BA} e V_{BC} , dirigidas no sentido ascendente, tendendo a suspendê-la:

$$V_B = -(V_{BA} + V_{BC}) \quad (3.27)$$

Esta situação é denominada na linguagem de engenharia como *uplift* (enforcado). Quando se depara com exemplos desta natureza é inapropriada a utilização de cadeias em suspensão, pois perderão a sua verticalidade.

Situações como esta devem ser evitadas sempre que possível em linhas reais, principalmente nas de alta tensão. O seu acontecimento, em geral, advém de falhas de escolha do traçado e falta de prática e orientação adequada dos topógrafos encarregues dos trabalhos de exploração, reconhecimento e levantamento, que fixam “pontos obrigatórios” da linha, como, vértices entre alinhamentos em locais inadequados. [4]

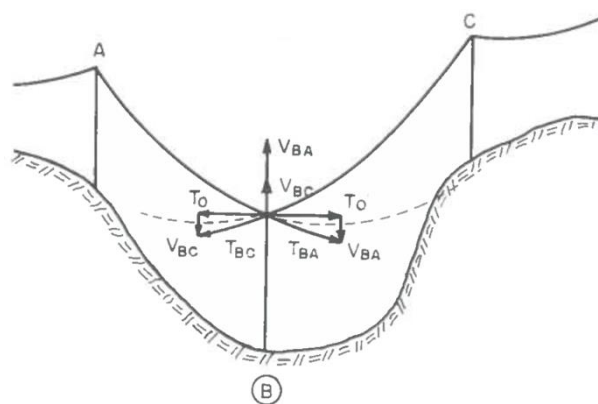


Figura 24 - Representação do apoio B enforcado [4]

3.17 - Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores

A atuação do vento numa direção normal aos elementos constituintes das linhas, tais como, os condutores e cadeias de isoladores, provoca oscilações dos mesmos.

No que toca a apoios constituídos por cadeias em suspensão, é necessário ter em consideração os desvios das mesmas relativamente à posição desejada, dispostas verticalmente. O desvio excessivo das cadeias de isoladores pode aproximar em demasia os condutores dos apoios.

A figura 25, detalha as forças aplicadas numa cadeia de isoladores em suspensão, de comprimento SL.

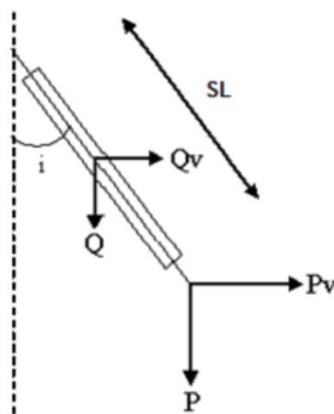


Figura 25 - Desvio transversal da cadeia de isoladores [10]

As forças aplicadas são:

- > P_v - Força do vento nos cabos condutores em [N];
- > Q_v - Força do vento na cadeia de isoladores em [N];
- > P - Peso dos condutores sobre o isolador [N];
- > Q - Peso da cadeia de isoladores [N];

O desvio transversal i é função da resultante do sistema de forças verticais e horizontais a que está submetida a cadeia e é dado por:

$$i = \tan^{-1} \left(\frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \right) [\text{grados}] \quad (3.28)$$

3.18 - Distâncias Mínimas Regulamentares

Segundo a cláusula 5.4.3/PT.2 da EN 50341-3-17, a distância de segurança entre condutores de fase de um circuito ou entre condutores de fase de diferentes circuitos no mesmo apoio, deve ser superior a D_{pp} . Agregado a esta condição, os condutores nus devem manter uma distância entre si não inferior a D [2].

A expressão para o cálculo da distância mínima é:

$$D = k \cdot (f + S_L)^{0,5} + D_{pp} \text{ [m]} \quad (3.29)$$

Onde:

D - é a distância mínima [m];

D_{pp} - é a distância mínima entre condutores de fase [m];

k - é o coeficiente de material com valor de 0,6 para o alumínio-aço [adimensional];

f - é a flecha do condutor à temperatura máxima de projeto (75 °C) e sem vento [m];

S_L - é o comprimento da cadeia de isoladores em [m].

Fora de zonas de gelo, a distância entre condutores pode ser reduzida a $\frac{2}{3} * D$, desde que a distância horizontal entre os planos verticais que passam através dos pontos de fixação seja superior a $\frac{2}{3} * D$ [2].

Deve ainda ter-se em conta as distâncias mínimas admissíveis em relação ao solo, estruturas e objetos diversos. A tabela 6 detalha algumas dessas distâncias, de acordo com a EN50341-3-17.

Tabela 6 - Distâncias externas admissíveis

Definição		Cláusula	Expressão	Mínimo
Distância dos condutores ao solo		5.4.4	$D = 5m + D_{el}$	6 m
Distância dos condutores às árvores		5.4.4/PT.1	$D = 2m + D_{el}$	2,5 m
Largura da faixa de proteção			-	25 m
Distância dos condutores aos edifícios	Linha sobre edifícios	5.4.5.2/PT.1	Ver requisitos especiais seguintes à tabela	4 m
	Linha adjacente a edifícios (horizontal)	5.4.5.2/PT.2	$D = 2m + D_{el}$	3 m
Distância dos condutores a antenas, candeeiros de iluminação, mastros de bandeira, sinalização publicitária, etc		5.4.5.2/PT.4	$D = 2m + D_{el}$	3 m
Distância dos condutores nos cruzamentos com estradas e caminhos de ferro não eletrificados		5.4.5.3/PT.1	$D = 7m + D_{el}$	$7m + D_{el}$
Distância dos condutores nos cruzamentos com caminhos de ferro eletrificados		5.4.5.3/PT.1	$D = 12m + D_{el}$	13,5 m
Distância entre duas linhas (energia e de telecomunicações)		5.4.5.4/PT.1 e PT.2	$D = 1m + D_{pp}$	2 m

Segundo a EN 50341-3-17, devem ainda ser tidos em conta os seguintes requisitos especiais [2]:

- › Nas distâncias a árvores define-se uma faixa de proteção centrada no eixo da linha, no interior da qual as árvores podem ser abatidas ou podadas por forma a assegurar em permanência a distância mínima destas aos condutores, estando incluídas árvores que, em caso de queda, não mantenham uma distância mínima aos condutores de 1,5 metros. Esta condição não se aplica a espécies protegidas pela Lei Portuguesa.
- › Nas distâncias a edifícios, para telhados com inclinação maior que 15° e resistentes ao fogo considera-se $D = 2m + D_{el}$, para telhados com inclinação menor ou igual a 15° e resistentes ao fogo $D = 4m + D_{el}$, e para telhados não resistentes ao fogo e instalações sensíveis ao fogo $D = 10m + D_{el}$;
- › Para autoestradas os apoios devem situar-se a uma distância horizontal não inferior a 5 m do limite da zona de autoestrada, para outras estradas essa distância é de 3m. Na

ocorrência de um colapso do apoio, se este poder cair sobre uma estrada, as suas fundações devem ser dimensionadas para 1,5 vezes os valores das cargas normalizadas;

- › É estabelecida uma distância horizontal mínima de 5 m para apoios na vizinhança de caminhos-de-ferro;
- › No cruzamento de linhas, deve ser tomado em consideração a posição relativa das linhas, isto é, no cruzamento de linhas de tensão diferente, a de maior tensão deverá cruzar superiormente;
- › No cruzamento de uma linha AT com uma linha de telecomunicação, a linha AT deverá cruzar superiormente. Além disso, é fortemente recomendado que o ângulo de cruzamento seja superior a 15°.

3.19 - Casos de carga normalizados

Com a inclusão da norma europeia nos projetos de linhas aéreas, foi necessário rever os tradicionais apoios da série F, licenciados em 1994 pela então Direção Geral de Energia. A sua utilização reservava-se ao uso em linhas simples de média tensão e linhas simples e duplas de alta tensão.

Devido às novas exigências compreendidas pela norma, foi necessário reajustar o dimensionamento dos apoios, surgindo assim, uma nova família de postes reticulados, designada como série FB.

Para o cálculo mecânico das estruturas parametrizadas em Portugal e de acordo com os requisitos considerados no caso de estudo, a tabela 7 detalha os casos de carga considerados.

Tabela 7 - Casos de carga normalizados

Hipótese Associada	Caso de carga	Condições
Hipótese 1	1a	Carga de vento extremo
	1b	Carga de vento à temperatura mínima
Hipótese 2	5a	Cargas de segurança, cargas de torção
Hipótese 3	5b	Cargas de segurança, cargas longitudinais

Segundo a cláusula 4.2.10.2/PT.1 da EN 50341-3-17, para cada tipo de apoio é realizado o cálculo tendo em conta as solicitações que lhes são impostas considerando que, em cada hipótese, todas as cargas são simultâneas. O conjunto de cargas para cada tipo de apoio deve ser entendido como os requisitos nominais mínimos *a priori* do mesmo [2].

3.20 - Apoios de Alinhamento (T)

Os apoios de alinhamento devem ser dimensionados para as seguintes hipóteses de cálculo (cláusula 4.2.10.2/PT.2 da EN 50341-3-17) [2]:

Hipótese 1 (casos de carga 1a e 1b)

- › Vento na direção perpendicular à linha sobre o apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda;
- › As componentes horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda, nos seus pontos de fixação;
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

- › 30% das forças resultantes da ação do vento perpendicular à linha sobre condutores e cabos de guarda aplicada no eixo do apoio, na direção da linha, à altura da resultante;
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

3.21 - Apoios de Ângulo (A)

Os apoios de ângulo devem ser dimensionados para as seguintes hipóteses de cálculo (cláusula 4.2.10.2/PT.3 da EN 50341-3-17) [2]:

Hipótese 1 (caso de carga 1a)

- › Vento na direção da bissetriz do ângulo da linha sobre o apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda;

- › Componentes horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda, nos seus pontos de fixação, resultantes da carga de vento à temperatura de referência (vento sempre na direção da bissetriz do ângulo da linha);
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

- › 30% da tensão horizontal resultante da ação do vento ao longo da bissetriz do ângulo da linha sobre condutores e cabos de guarda, aplicada sobre o eixo do apoio, na direção perpendicular à bissetriz do ângulo, à altura da força resultante;
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

3.22 - Apoios Fim de Linha (DE)

Os apoios terminais devem ser dimensionados para as seguintes hipóteses de cálculo (cláusula 4.2.10.2/PT.5 da EN 50341-3-17) [2]:

Hipótese 1 (caso de carga 1a)

- › Carga unilateral de vento atuando perpendicularmente à linha, sobre o apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda;
- › Componentes unilaterais horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda, nos seus pontos de fixação, correspondentes à carga de vento à temperatura de referência (vento atuando perpendicularmente à linha);
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2 (caso de carga 5a)

- › Força horizontal resultante da anulação da tensão de qualquer sub-condutor ou cabo de guarda, mantendo os restantes sub-condutores e cabos de guarda a uma tensão igual à tensão máxima residual horizontal, na ausência de cargas de vento ou gelo sobre os apoios, numa direção paralela ao eixo longitudinal do apoio;
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

3.23 - Apoios de Reforço em Alinhamento (RT)

Os apoios de reforço em alinhamento deverão ser dimensionados para as seguintes hipóteses de cálculo (cláusula 4.2.10.2/PT.6 da EN 50341-3-17) [2]:

Hipótese 1 (caso de carga 1a e 1b)

- › Vento atuando perpendicularmente à linha sobre o apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda;
- › Componentes horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda, nos seus pontos de fixação;
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

Considerando apoio com circuito simples:

- › 90% da tensão horizontal máxima de condutores e cabos de guarda (ver 4.2.7/PT.1) para um lado do apoio na direção longitudinal da linha, nos seus pontos de fixação.
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Considerando apoio com circuito duplo ou condutores em feixe:

- › 70% da tensão horizontal máxima de condutores e cabos de guarda (ver 4.2.7/PT.1) para um lado do apoio na direção longitudinal da linha, nos seus pontos de fixação.
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

3.24 - Apoios de Reforço de Ângulo (RA)

Os apoios de reforço de ângulo devem ser dimensionados para as seguintes hipóteses de cálculo (cláusula 4.2.10.2/PT.7 da EN 50341-3-17) [2]:

Hipótese 1 (Caso de carga 1a)

- › Vento na direção da bissetriz do ângulo da linha sobre o apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.
- › Componentes horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda, nos seus pontos de fixação, resultantes da carga de vento à temperatura de referência (vento sempre na direção da bissetriz do ângulo da linha).
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

Considerando apoio com circuito simples:

- › 90% da tensão horizontal máxima de condutores e cabos de guarda (ver 4.2.7/PT.1) para um lado do apoio na direção longitudinal da linha, nos seus pontos de fixação.
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Considerando apoio com circuito duplo ou condutores em feixe:

- › 70% da tensão horizontal máxima de condutores e cabos de guarda (ver 4.2.7/PT.1) para um lado do apoio na direção longitudinal da linha, nos seus pontos de fixação.
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 3 (caso de carga 5a)

- › Força horizontal resultante da anulação da tensão de qualquer sub-condutor ou cabo de guarda, mantendo os restantes sub-condutores e cabos de guarda uma tensão igual à tensão máxima residual horizontal, na ausência de cargas de vento ou gelo sobre os apoios, numa direção paralela ao eixo longitudinal do apoio.
- › Peso próprio de apoio, braços, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Sumário:

O cálculo mecânico sustenta decisões que determinam a viabilidade do projeto, medindo com rigor diferentes parâmetros.

Para estes cálculos e tendo em conta o caso de estudo em questão, é necessário ter em consideração as normas regulamentares para Portugal, como é o caso do cumprimento das diferentes distâncias, por exemplo, entre condutores e/ou obstáculos. Também de acordo com a norma é necessário garantir que os condutores não sejam sujeitos a 40% da sua tração de rotura. Estes e outros elementos devem ser conjugados no cálculo mecânico para a correta fundamentação nas decisões respeitantes ao projeto, de forma a garantir que os apoios suportem os esforços mecânicos a que são sujeitos.

Capítulo 4

Caso de Estudo

O capítulo quatro demonstra a aplicação do cálculo mecânico para o referente caso de estudo, recorrendo a um exemplo por etapa. Ainda neste capítulo, é feita a introdução do *software* PLS-CADD™, assim como, uma comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos de cálculo para um determinado apoio.

4.1 - *Objetivo*

Com o caso de estudo pretende-se interligar duas subestações no concelho de Fafe.

Para tal, foi projetada uma linha aérea dupla de transporte de energia a 60 kV, que interligará estas duas subestações com um comprimento total de aproximadamente 4306 metros.

Para este projeto serão elaborados cálculos mecânicos tradicionais (com recurso a folhas de cálculo do *software* Excel) que, mais tarde, serão confrontados com os resultados extraídos do *software* de linhas aéreas PLS-CADD™.

4.2 - Regulamentação

O projeto foi regido pela norma europeia EN 50341-1, com o complemento dos aspetos normativos nacionais referentes a Portugal, designado EN 50341-3-17. O Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas Aéreas de Alta Tensão, serve como auxílio quando a norma não define determinado aspeto.

4.3 - Características da linha

A linha projetada é regida pelo transporte de potência de 120 MVA, tensão alternada de 60 kV, frequência de 50 Hz e fator de potência de 0,9 (indutivo).

4.4 - Cálculo Mecânico

4.4.1. Características do Condutor e Cabo de Guarda

Tabela 8 - Características técnicas do condutor e cabo de guarda

Designação	Condutor AL-AÇO ACSR 325 (Bear 325)	C. Guarda (AL-AÇO) Guinea 130
Secção nominal do cabo (mm ²)	325	127,5
Diâmetro do fio de aço (mm)	3,35	2,92
Diâmetro do fio de alumínio (mm)	3,35	2,92
Secção total do cabo (mm ²)	326,10	127,2
Secção total de aço (mm ²)	61,7	46,9
Secção total de alumínio (mm ²)	264,42	80,4
Peso do cabo (kg/m)	1,21	0,59
Diâmetro exterior (mm)	23,45	14,6
Carga de rotura mínima (daN)	10938	6646
Módulo de Young final (N/mm ²)	80000	104000
Coefficiente de dilatação linear (1/°C)	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$
Resistência elétrica máxima em CC a 20°C (Ω/km)	0,11	0,36

4.4.2. *Tensões Mecânicas Máximas*

De acordo com a cláusula 9.2.4 da EN 50341-3-17 a tração máxima admissível nos condutores não deve exceder 40% da tração de rotura dos mesmos [2].

A expressão que garante essa condição é:

$$t_{seg} = \frac{0,4 \cdot T_R}{\sigma} \quad (4.1)$$

Onde,

- t_{seg} - é a tensão de segurança [N/mm²]
- σ - é a secção do condutor [mm²]
- T_R - é a tensão de rotura do condutor [N]

Cabo de Guarda:

$$t_{seg} = \frac{0,4 \cdot 66460}{127,2} = 208,99 \text{ N/mm}^2$$

Condutor:

$$t_{seg} = \frac{0,4 \cdot 109380}{326,1} = 134,17 \text{ N/mm}^2$$

4.4.3. Coeficientes de Sobrecarga

De acordo com a cláusula 4.2.3/PT.1 da EN 50341-3-17, os distritos mencionados na mesma e que tenham cotas superiores a 600 m, considera-se formação de gelo, visto que o caso de estudo tem cotas inferiores a 600 m, não se considera formação de gelo [2].

A expressão para o cálculo do coeficiente de sobrecarga é referida em 4.2:

$$m = \frac{\sqrt{\omega^2 + F_{vento}^2}}{\omega} \quad (4.2)$$

$$F_{vento} = q_h \cdot G_q \cdot G_C \cdot C_C \cdot d \text{ [N]} \quad (4.3)$$

Onde,

m - é o coeficiente de sobrecarga [adimensional]

ω - é o peso linear próprio do condutor [N/m]

F_{vento} - é a força do vento sobre o condutor [N/m]

q_h - é a pressão dinâmica do vento considerada a 30 m acima do solo [N/m²]

G_q - é o fator de rajada [adimensional]

G_C - é o fator de ressonância estrutural (fator de vão) [adimensional]

C_C - é o coeficiente de forma do condutor [adimensional]

d - é o diâmetro do condutor [m]

Seguidamente demonstra-se o cálculo para os diversos estados atmosféricos.

Cabo de Guarda:

Vento reduzido (Inverno)

$$Q_w = q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_c \cdot d = 0,4 \cdot 855 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 1,1 \cdot 0,0146 = 3,30 \text{ [N]}$$

$$m = \frac{\sqrt{5,77^2 + 3,30^2}}{5,77} = 1,15$$

Vento extremo (Primavera)

$$Q_w = 1,4 \cdot 855 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 1,1 \cdot 0,0146 = 11,53 \text{ [N]}$$

$$m = \frac{\sqrt{5,77^2 + 11,53^2}}{5,77} = 2,24$$

Sem vento (Verão)

$$Q_w = 0 \text{ [N]}$$

$$m = \frac{\sqrt{5,77^2}}{5,77} = 1$$

Condutor:

Vento reduzido (Inverno)

$$Q_w = q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_c \cdot d = 0,4 \cdot 855 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 0,0235 = 4,81 [N]$$

$$m = \frac{\sqrt{11,9^2 + 4,81^2}}{11,9} = 1,08$$

Vento extremo (Primavera)

$$Q_w = 1,4 \cdot 855 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 0,0235 = 16,84[N]$$

$$m = \frac{\sqrt{11,9^2 + 16,84^2}}{11,9} = 1,73$$

Sem vento (verão)

$$Q_w = 0 [N]$$

$$m = \frac{\sqrt{11,9^2}}{11,9} = 1$$

4.4.4. *Parâmetro da Catenária e Flecha Máxima*

De seguida apresenta-se o cálculo do parâmetro do cabo de guarda e do cabo condutor, assim como as suas flechas máximas para um vão médio de 300 metros.

$$P = \frac{t_{\theta^{\circ}\text{C}} \cdot \sigma}{\omega} \quad (4.4)$$

$$f = \frac{\omega \cdot L \cdot L_1}{8 \cdot \sigma \cdot t_{\theta^{\circ}\text{C}}} \quad (4.5)$$

Para que seja possível calcular o parâmetro dos cabos, é necessário saber qual o pior estado atmosférico ou tração máxima aplicável. Esse valor é obtido através da equação dos estados.

A equação dos estados compara todos os estados possíveis:

- › Inverno com EDS;
- › Primavera com EDS;
- › Verão com EDS.

Para o cálculo do parâmetro e flecha máxima, considera-se a comparação entre os seguintes estados atmosféricos:

- › Verão com EDS.

Cabo de Guarda:

$$\text{Verão} \begin{cases} m_f = 1 \\ \theta_f = 75 [^{\circ}\text{C}] \\ t_{\max} = ? \end{cases} ; \quad \text{EDS} \begin{cases} m_i = 1 \\ \theta_i = 15 [^{\circ}\text{C}] \\ t_{\theta_i} = 94,05 [\text{N/mm}^2] \end{cases}$$

Aplica-se a equação dos estados:

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_{\theta_i}^2 \cdot w^2 \cdot L_{medio}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_{máx}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot w^2 \cdot L_{medio}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{máx}^2} \quad (4.6)$$

$$75 + \frac{t_{máx}}{1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 104000} - \frac{1^2 \cdot 5,77^2 \cdot 300^2}{24 \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 127,2^2 \cdot t_{máx}^2}$$

$$= 15 + \frac{94,05}{1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 104000} - \frac{1^2 \cdot 5,77^2 \cdot 300^2}{24 \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 127,2^2 \cdot 94,05^2}$$

$$t_{máx} = 70 [N/mm^2]$$

Tração:

$$T = t_{máx} \cdot \sigma = 70 \cdot 127,2 = 8904 [N] \quad (4.7)$$

Parâmetro da catenária:

$$P = \frac{t_{\theta i^c} \cdot \sigma}{\omega} = \frac{8904}{5,77} = 1543,15 [m]$$

Flecha máxima:

$$f = \frac{5,77 \cdot 300^2}{8 \cdot 127,2 \cdot 70} = 7,29 [m]$$

Cabo de Condutor:

$$Ver\tilde{a}o \begin{cases} m_f = 1 \\ \theta_f = 75 [^{\circ}C] \\ t_{max} = ? \end{cases} ; \quad EDS \begin{cases} m_i = 1 \\ \theta_i = 15 [^{\circ}C] \\ t_{\theta_i} = 60,38 [N/mm^2] \end{cases}$$

Aplica-se a equação dos estados:

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_{\theta_i}^2 \cdot w^2 \cdot L_{medio}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_{m\acute{a}x}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot w^2 \cdot L_{medio}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{m\acute{a}x}^2}$$

$$= 75 + \frac{t_{m\acute{a}x}}{1,79 \cdot 10^{-5} \cdot 80000} - \frac{1^2 \cdot 11,9^2 \cdot 300^2}{24 \cdot 1,79 \cdot 10^{-5} \cdot 326,1^2 \cdot t_{m\acute{a}x}^2}$$

$$15 + \frac{60,38}{1,79 \cdot 10^{-5} \cdot 80000} - \frac{1^2 \cdot 11,9^2 \cdot 300^2}{24 \cdot 1,79 \cdot 10^{-5} \cdot 326,1^2 \cdot 60,38^2}$$

$$t_{m\acute{a}x} = 47 [N/mm^2]$$

Tração:

$$T = t_{m\acute{a}x} \cdot \sigma = 47 \cdot 326,1 = 15326,70 [N]$$

Parâmetro da catenária:

$$P = \frac{t_{\theta_i^{\circ}C} \cdot \sigma}{\omega} = \frac{15326,70}{11,90} = 1287,95 [m]$$

Flecha máxima:

$$f = \frac{11,9 \cdot 300^2}{8 \cdot 326,1 \cdot 47} = 8,73 \text{ [m]}$$

Com a localização final dos apoios escolhidos, assim como as suas alturas e definidos os cantões de acordo com o desenho em PLS-CADD™, foram recalculados os parâmetros das catenárias e flechas para cada cantão. Para tal é necessário calcular o vão fictício equivalente de cada cantão.

A expressão para o cálculo é:

$$L_{medio} = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i L_i}} \quad (4.8)$$

Onde,

L_{medio} - é o vão equivalente fictício [m]

L_i - é o comprimento dos vãos [m]

Exemplificando o cálculo para o cantão 5, que é composto por 2 vãos:

Vão AP13 - AP14: $L = 253,90$ [m]

Vão AP14 - AP15: $L = 129,01$ [m]

$$L_{medio} = \sqrt{\frac{253,90^3 + 129,01^3}{253,90 + 129,01}} = 219,89 \text{ [m]}$$

Os restantes parâmetros e flechas para os diferentes vãos equivalentes, relativos ao cabo de guarda e condutor, encontram-se nos Anexos A e B. O método de cálculo é igual ao demonstrado anteriormente.

4.4.5. *Apoios*

Os apoios a utilizar no projeto, são apoios reticulados da série FB da empresa Metalgalva licenciados pela DGEG e dimensionados de acordo com a norma EN 50341-1.

Numa segunda fase foram utilizados os apoios tubulares da série TFB, da empresa supramencionada.

De acordo com os esforços a que os apoios estão sujeitos, foram escolhidas as seguintes referências:

FB30ADN e TFB30ADN para apoios de alinhamento, com diferentes alturas totais;

FB165ADN e TFB165ADN para situação de ângulo e fim de linha, com diferentes alturas totais.

Nota:

No Anexo E, consta a tabela com os tipos de apoios utilizados e sua função.

4.4.6. *Verificação da Estabilidade dos Apoios*

a) Apoio Fim de Linha (DE)

Os cálculos demonstrados são relativos ao apoio nº 1.

Hipótese 1 (caso de carga 1a) - Vento Máximo

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]} \quad (4.9)$$

↔

$$F_v = \left(\frac{0+109,06}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 472 \text{ [N]}$$

Onde,

F_v - é a força vertical exercida no apoio [N]

$L1$ e $L2$ - são os vãos adjacentes [m]

k - é o fator vão de peso, com o valor de 1,5 [adimensional]

ω_{CG} - é o peso do cabo de guarda [N]

ω_{isol} - é o peso do isolador [N]

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]} \quad (4.10)$$

$\Leftrightarrow$

$$F_L = 15174,01 \cdot \cos(0) - 0 = 15174 \text{ [N]}$$

Onde,

F_L - é a força longitudinal exercida no apoio [N]

F_{LA} e F_{LB} - são as forças longitudinais dos vãos a montante e a jusante [N]

α_B - é o ângulo da linha [rad]

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]} \quad (4.11)$$

$\Leftrightarrow$

$$F_T = 15174,01 \cdot \sin(0) + 0 + 628,96 \cdot \cos(0)^2 + 0 + 0 = 629 \text{ [N]}$$

Onde,

F_T - é a força transversal exercida no apoio [N]

F_{TA} e F_{TB} - são as forças transversais dos vãos a montante e a jusante [N]

α_B - é o ângulo da linha [rad]

Q_{vCG} - é a carga de vento no cabo de guarda [N]

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L1+L2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_c + \omega_{isol} [N]$$

$\Leftrightarrow$

$$F_v = \left(\frac{0+109,06}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 25,12 \cdot 9,81 = 1219,8 [N]$$

Onde,

Q_{Wins} - é a carga de vento nos isoladores [N]

A - é a área de exposição [m²]

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) [N]$$

$\Leftrightarrow$

$$F_L = 24287,25 \cdot \cos(0) - 0 = 24287 [N]$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} [N]$$

$\Leftrightarrow$

$$F_T = 24287,25 \cdot \sin(0) + 0 + (655,99 \cdot \cos(0)^2 + 0 + 166,14) \cdot 1,4 = 1151 \text{ [N]}$$

Hipótese 1 (caso de carga 1b) - Vento Reduzido

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L1+L2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{0+109,06}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 472 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

⇔

$$F_L = 15665,53 \cdot \cos(0) - 0 = 15666 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_T = 15665,53 \cdot \sin(0) + 0 + 179,70 \cdot \cos(0)^2 + 0 + 0 = 180 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L1+L2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_c + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{0+109,06}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 25,12 \cdot 9,81 = 1219,8 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 27188,19 \cdot \cos(0) - 0 = 27188 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 27188,19 \cdot \sin(0) + 0 + (655,99 \cdot \cos(0)^2 + 0 + 166,14) \cdot 0,4 = 329 \text{ [N]}$$

Hipótese 2 (caso de carga 5a) - Rotura dos Cabos

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1+L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 0 - 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_C + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 0 - 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

b) Apoios de Alinhamento (T)

Os cálculos demonstrados são relativos ao apoio nº 11.

Hipótese 1 (caso de carga 1a) - Vento Máximo

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{248,22 + 250,54}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 2158 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

⇔

$$F_L = 19689,30 \cdot \cos(0) - 19689,30 \cdot \cos(0) = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_T = 19689,30 \cdot \sin(0) + 19689,30 \cdot \sin(0) + \frac{2876,42}{2} \cdot \cos(0)^2 + \frac{2876,42}{2} \cdot \cos(0)^2 + 0 = 2876 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_c + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{248,22 + 250,54}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 25,12 \cdot 9,81 = 4697,86 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

⇔

$$F_L = 29433,97 \cdot \cos(0) - 29433,97 \cdot \cos(0) = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_T = 29433,97 \cdot \sin(0) + 29433,97 \cdot \sin(0) + \left(\frac{3000}{2} \right) \cdot \cos(0)^2 + \frac{3000}{2} \cdot \cos(0)^2 + 166,14 \cdot 1,4 = 4433 \text{ [N]}$$

Hipótese 1 (caso de carga 1b) - Vento Reduzido

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{248,22 + 250,54}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 2158 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 14795,78 \cdot \cos(0) - 14795,78 \cdot \cos(0) = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 14795,78 \cdot \sin(0) + 14795,78 \cdot \sin(0) + \frac{821,83}{2} \cdot \cos(0)^2 + \frac{821,83}{2} \cdot \cos(0)^2 + 0 = 822 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_c + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{248,22 + 250,54}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 25,12 \cdot 9,81 = 4697,86 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 23615,61 \cdot \cos(0) - 23615,61 \cdot \cos(0) = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 23615,61 \cdot \sin(0) + 23615,61 \cdot \sin(0) + \left(\frac{3000}{2} \cdot \cos(0)^2 + \frac{3000}{2} \cdot \cos(0)^2 + 166,14 \right) \cdot 0,4 = 1266 \text{ [N]}$$

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{248,22 + 250,54}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 2158 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = (Q_{vCG}) \cdot 0,3 \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = (2876,42) \cdot 0,3 = 863 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = 0 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CC} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{248,22 + 250,54}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 25,12 \cdot 9,81 = 4682 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = (Q_{vCC} + Q_{vIsol}) \cdot 0,3 \text{ [N]}$$

⇔

$$F_L = (3000 + 166,14) \cdot 0,3 = 949,84 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = 0 \text{ [N]}$$

c) Apoio de Ângulo (A)

Os cálculos demonstrados são relativos ao apoio nº3.

Hipótese 1 (caso de carga 1a) - Vento Máximo

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{162,32+326,50}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 2115 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 16971,69 \cdot \cos(25) - 20828,10 \cdot \cos(25) = -3563 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 16971,69 \cdot \sin(25) + 20828,10 \cdot \sin(25) + \frac{2819,10}{2} \cdot \cos(25)^2 + \frac{2819,10}{2} \cdot \cos(25)^2 + 0 = 16872 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1+L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_C + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{162,32+326,50}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 2 \cdot 25,12 \cdot 9,81 = 4855,6 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 26531,40 \cdot \cos(25) - 30465,76 \cdot \cos(25) = -3635 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_T = 26531,40 \cdot \sin(25) + 30465,76 \cdot \sin(25) + \left(\frac{2940,22}{2}\right) \cdot \cos(25)^2 + \frac{2940,22}{2} \cdot \cos(25)^2 + 332,27 \cdot 1,4 = 25790,54 \text{ [N]}$$

Hipótese 1 (caso de carga 1b) - Vento Reduzido

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2}\right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{162,32 + 326,50}{2}\right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 2115 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

⇔

$$F_L = 15353,27 \cdot \cos(25) - 14568,15 \cdot \cos(25) = 725 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_T = 15353,27 \cdot \sin(25) + 14568,15 \cdot \sin(25) + \frac{805,46}{2} \cdot \cos(25)^2 + \frac{805,46}{2} \cdot \cos(25)^2 + 0 = 12138 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_c + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{162,32 + 326,50}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 2 \cdot 25,12 \cdot 9,81 = 4854 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 25708,24 \cdot \cos(25) - 22950,73 \cdot \cos(25) = 2548 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 25708,24 \cdot \sin(25) + 22950,73 \cdot \sin(25) + \left(\frac{2940,22}{2} \right) \cdot \cos(25)^2 + \frac{2940,22}{2} \cdot \cos(25)^2 + 332,27 \cdot 0,4 = 19757,74 \text{ [N]}$$

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{162,32 + 326,50}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 2115 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = (Q_{vCG}) \cdot 0,3 \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = (2819,10) \cdot 0,3 = 846 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = 0 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L1+L2}{2} \right) k \cdot \omega_C + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{162,32+326,50}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 2 \cdot 25,12 \cdot 9,81 = 4854 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = (Q_{vCC} + Q_{vIsol}) \cdot 0,3 \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = (2940,22 + 332,27) \cdot 1,4 \cdot 0,3 = 1374 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = 0 \text{ [N]}$$

d) Apoio de Reforço em Ângulo (RA)

Os cálculos demonstrados são relativos ao apoio nº4.

Hipótese 1 (caso de carga 1a) - Vento Máximo

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{261,11 + 162,32}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 1832 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

⇔

$$F_L = 19613,45 \cdot \cos(20) - 16971,69 \cdot \cos(20) = 2512 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_T = 19613,45 \cdot \sin(20) + 16971,69 \cdot \sin(20) + \frac{2441,98}{2} \cdot \cos(20)^2 + \frac{2441,98}{2} \cdot \cos(20)^2 + 0 = 13514 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_c + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{261,11 + 162,32}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 2 \cdot 25,12 \cdot 9,81 = 4272 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

⇔

$$F_L = 29361,32 \cdot \cos(20) - 26531,40 \cdot \cos(20) = 2691 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_T = 29361,32 \cdot \sin(20) + 26531,40 \cdot \sin(20) + \frac{2546,90}{2} \cdot \cos(20)^2 + \frac{2546,90}{2} \cdot \cos(20)^2 + 332,27 = 19907,76 \text{ [N]}$$

Hipótese 1 (caso de carga 1b) - Vento Reduzido

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

⇔

$$F_v = \left(\frac{261,11 + 162,32}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 1832 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 14811,43 \cdot \cos(20) - 15353,27 \cdot \cos(20) = -515 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 14811,43 \cdot \sin(20) + 15353,27 \cdot \sin(20) + \frac{697,71}{2} \cdot \cos(20)^2 + \frac{697,71}{2} \cdot \cos(20)^2 + 0 = 9952 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_C + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{261,11 + 162,32}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 2 \cdot 25,12 \cdot 9,81 = 4271 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 23664,98 \cdot \cos(20) - 25708,24 \cdot \cos(20) = -1943 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vC}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

↔

$$F_T = 23664,98 \cdot \sin(20) + 25708,24 \cdot \sin(20) + \frac{2546,90}{2} \cdot \cos(20)^2 + \frac{2546,90}{2} \cdot \cos(20)^2 + 332,27 = 17893,13 \text{ [N]}$$

Hipótese 2 (caso de carga 5a) - Rotura dos Cabos

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

↔

$$F_v = 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

↔

$$F_L = 0 - 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{VCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{VCG}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{vIsol} \text{ [N]}$$

↔

$$F_T = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_c + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) - F_{LB} \cdot \cos(\alpha_B) \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 0 - 0 = 0 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = F_{TA} \cdot \sin(\alpha_A) + F_{TB} \cdot \sin(\alpha_B) + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_A)^2 + \frac{Q_{vc}}{2} \cdot \cos(\alpha_B)^2 + Q_{visol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_T = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0 \text{ [N]}$$

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

Cabo de Guarda

› Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_{CG} + \omega_{isol} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_v = \left(\frac{261,11 + 162,32}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 5,77 + 0 = 1832 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) \cdot 0,7 \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 20898,80 \cdot \cos(20) \cdot 0,7 = 13913 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = 0 \text{ [N]}$$

Cabo Condutor

› Eixo vertical

$$F_V = \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right) \cdot k \cdot \omega_C + \omega_{\text{isol}} \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_V = \left(\frac{261,11 + 162,32}{2} \right) \cdot 1,5 \cdot 11,9 + 2 \cdot 25,12 \cdot 9,81 = 4271 \text{ [N]}$$

› Eixo longitudinal

$$F_L = F_{LA} \cdot \cos(\alpha_A) \cdot 0,7 \text{ [N]}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$F_L = 31176,54 \cdot \cos(20) \cdot 0,7 = 20755,5 \text{ [N]}$$

› Eixo transversal

$$F_T = 0 \text{ [N]}$$

4.5 - Introdução ao Software PLS-CADD™

O PLS-CADD™ (*Power Lines Systems - Computer Aided Design and Drafting*) é um *software* de desenho de linhas elétricas aéreas dotado de uma interface gráfica intuitiva que integra todos os aspetos relativos a desenhos de linhas elétricas num único programa. As suas funcionalidades traduzem-se num processo eficiente quando comparado com os métodos tradicionais, requerentes de muitas horas de trabalho. Esta solução já foi adotada por mais de 1600 organizações espalhadas por 125 países. Em Portugal este sistema já é parte integrante

de 16 empresas, ainda que não esteja parametrizado com os casos de carga para Portugal, sendo necessária a introdução manual destes valores [1].

A capacidade tridimensional é uma das principais funcionalidades, com possibilidade de inclusão de terrenos, estruturas e cabos, assim como a exportação de um ficheiro (.kmz) para o *Google Earth*, onde é possível visualizar a futura linha com maior rigor. É também possível analisar o projeto de diferentes perspetivas, nomeadamente, vista de perfil, aérea, aérea e de perfil e tridimensional.

Um outro recurso é a distribuição automática dos apoios (*automatic spotting*), recurso este que se caracteriza pela criação de uma biblioteca de apoios, na qual são atribuídos diferentes custos que permitem a melhor distribuição dos mesmos, considerando o custo mais reduzido, culminando numa análise económica do projeto.

A modelização do terreno em 3D assume-se igualmente como uma ferramenta de destaque, com possibilidade de importação de dados de terreno a partir de GPS e facilidade de deslocação dos apoios com perceção imediata.

A parametrização, sendo basilar para todos os projetos, apresenta-se aqui como um instrumento adaptável aos vários critérios do projeto, que tem em consideração os diferentes países.

Este programa permite ainda a interligação com dois outros programas essenciais em projetos de linhas, nomeadamente, o Tower, que se caracteriza pela análise, desenho e otimização de postes reticulados e o PLS-POLE, *software* equivalente ao Tower, mas dirigido a estruturas tubulares de diferentes materiais. Esta interligação permite dimensionar um apoio e testá-lo, aplicando casos de carga, viabilizando ou não, a estrutura.

O facto de o programa ter a capacidade de modelização total, de ser interativo, fazer a medição tridimensional, assim como também a deteção inteligente dos pontos perigosos, identificando a segurança das linhas de transporte de energia, permite ao utilizador estudar os diferentes cenários. Desta forma, garante a segurança e eficiência das linhas, minimizando os custos da mão-de-obra e materiais, aumentando a otimização e efeitos preventivos do projeto.

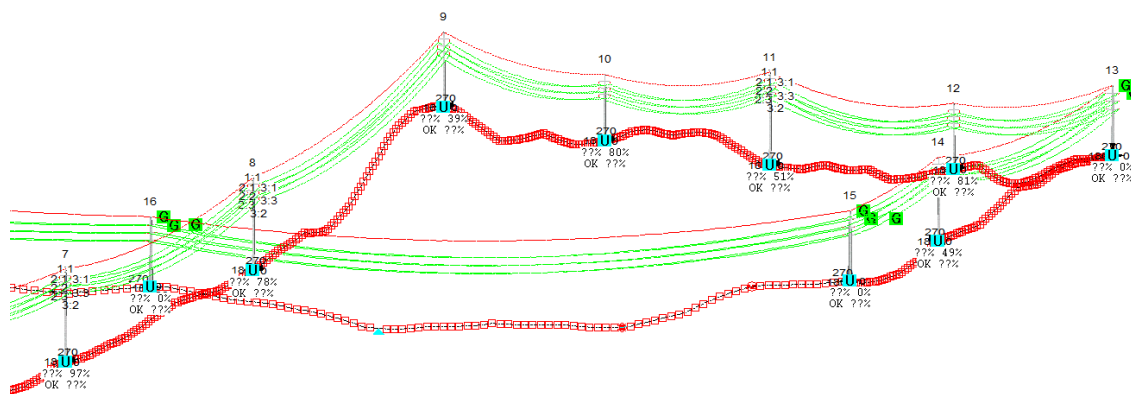


Figura 26 - Troço da linha, exportado do PLS-CADD

4.6 - Comparação de Resultados

A tabela 9 apresenta os resultados obtidos a partir da folha de cálculo em Excel realizada pelo mestrando, os valores extraídos do PLS-CADD e ainda, ilustra as diferenças entre os resultados obtidos para o apoio nº 9, em alinhamento.

As diferenças existentes advêm do facto do PLS-CADD realizar cálculos exaustivos e rigorosos, considerando todos os fatores internos e externos aos elementos constituintes das linhas elétricas.

Conforme já mencionado durante a realização desta dissertação, no cálculo mecânico realizado pelo projetista são consideradas algumas aproximações por excesso, que se propagam pelos restantes cálculos. Os resultados dessas aproximações resultam em desvios de valores, quando comparados com o *software* em causa.

Tendo em conta a grandeza de desvios de valores, pode considerar-se que não têm impacto na verificação das estruturas.

Tabela 9 - Comparação de resultados entre o Excel e o PLS-CADD, para um apoio de alinhamento

		Alinhamento								
		Excel			PLS-CADD			Diferenças		
	Pto Amarração	L [N]	T [N]	V [N]	L [N]	T [N]	V [N]	L [N]	T [N]	V [N]
Caso 1a V. Max	CG	0	2893	2171	0	2778	3032	0	115	-861
	C1	0	4458	4721	0	4000	5557	0	458	-836
	C2	0	4458	4721	0	3904	5557	0	554	-836
	C3	0	4458	4721	0	3819	5557	0	639	-836
	C4	0	4458	4721	0	4000	5557	0	458	-836
	C5	0	4458	4721	0	3903	5557	0	555	-836
	C6	0	4458	4721	0	3819	5557	0	639	-836
Caso 1b V. Red	CG	0	827	2171	0	793	3032	0	34	-861
	C1	0	1274	4721	0	1143	5557	0	131	-836
	C2	0	1274	4721	0	1115	5557	0	159	-836
	C3	0	1274	4721	0	1091	5557	0	183	-836
	C4	0	1274	4721	0	1143	5557	0	131	-836
	C5	0	1274	4721	0	1115	5557	0	159	-836
	C6	0	1274	4721	0	1091	5557	0	183	-836
Caso 5b 3	CG	868	0	2171	834	0	3032	34	0	-861
	C1	1337	0	4721	1152	0	5557	185	0	-836
	C2	1337	0	4721	1123	0	5557	214	0	-836
	C3	1337	0	4721	1097	0	5557	240	0	-836
	C4	1337	0	4721	1152	0	5557	185	0	-836
	C5	1337	0	4721	1123	0	5557	214	0	-836
	C6	1337	0	4721	1097	0	5557	240	0	-836

Sumário:

Neste capítulo concluí-se que após a correta parametrização do *software* PLS-CADD, obtiveram-se resultados aproximados aos calculados. Os desvios de valores, advêm das aproximações efetuadas e dos cálculos exaustivos por parte do *software*. Tendo em conta a grandeza de desvios de valores, pode considerar-se que não têm impacto na verificação das estruturas. Após a correta aprendizagem do programa, este, revelou-se facilitador no que diz respeito aos cálculos dos projetos de linhas aéreas.

Capítulo 5

Análise Técnica e Económica

No presente capítulo, é realizada uma comparação a nível técnico entre os apoios reticulados e os tubulares, onde são expostas e fundamentadas as vantagens e desvantagens de cada um deles. A mesma análise é aplicada a nível económico e, a partir dos dados orçamentais, são apresentadas diferentes soluções para o projeto, tendo em vista a sua eficiência.

5.1 - *Contextualização*

Quando se aborda o tema transporte de energia elétrica, surge automaticamente a imagem dos enormes apoios reticulados que encaminham e suportam os condutores que transportam a energia elétrica.

A instalação deste tipo de apoios é, por repetidas vezes, geradora de atrito entre as entidades detentoras da exploração das linhas e os proprietários dos terrenos alvo, devido às elevadas dimensões e largas silhuetas, características dos apoios reticulados que, consequentemente, obrigam à ocupação de uma grande área de implantação.

Outros fatores deslustram este tipo de apoio, à medida em que se erguem preocupações paisagísticas e ambientais, naturais do desenvolvimento das sociedades. Devem ser imputados ao projeto, cuidados na sua implementação, de forma a minimizar a poluição paisagística que daí pode advir. Este processo pode passar por minimizar o número de equipamentos instalados ou alterar a forma dos mesmos, por forma a preservar tanto quanto possível o caráter natural da zona onde é feita a instalação [13].

Tendo em conta estes pontos, o mercado e as empresas responsáveis pela construção das linhas que transportam este tipo de energia, depararam-se com a necessidade de encontrar uma solução que, do ponto de vista técnico, cumprisse com as elevadas solicitações mecânicas exercidas pelos cabos condutores, e que do ponto de vista paisagístico, reduzisse o impacto visual. Esta resposta levaria a uma melhor aceitação por parte da população e das entidades camarárias.

Na sequência destas necessidades, foram desenvolvidos os apoios tubulares, fabricados em aço mole, mais concretamente o S355. Estes apoios têm como principal característica, o impacto visual reduzido.

Com esta criação pretendeu-se reduzir os ruídos visuais e melhorar a integração ambiental, garantindo uma área mínima ocupacional no solo.

Considera-se assim, que a implantação dos apoios nos terrenos dos proprietários tenha maior aceitação, cumprindo com um dos fatores mais problemáticos neste tema.

A curto/médio prazo, prevêem-se fortes investimentos a nível Europeu, na renovação e/ou modernização das redes de transporte de energia. Estão previstos, portanto, fortes desenvolvimentos na redefinição dos requisitos estruturais, estéticos e ambientais para o fornecimento de soluções que sejam capazes de evoluir o setor da energia de forma sustentável.

Com a análise da figura 27, é possível verificar que a redução do diâmetro da base do apoio tubular é de 2,5 vezes, quando comparado com o reticulado, podendo em alguns casos esta redução chegar até 4 vezes [13].

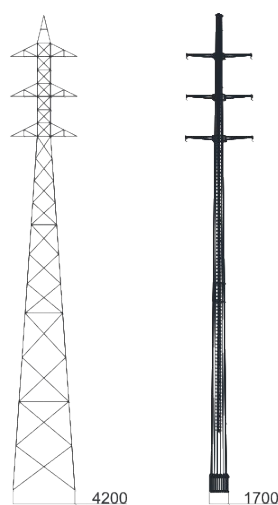


Figura 27 - Esquema de um poste reticulado e de um tubular equivalente

Contudo, se por um lado, os apoios tubulares apresentam-se vantajosos, em detrimento dos apoios reticulados, por outro, devem ser analisados outros fatores que não beneficiam a sua implementação, especialmente no que à sua instalação e subsequente logística diz respeito.

Na tabela 10 é elaborado um resumo constituído pelas principais vantagens, desvantagens e tipo de fixação entre os apoios reticulados e os tubulares.

Tabela 10 - Análise Técnica dos Apoios

	Apoios Tubulares	Apoios Reticulados
Vantagens	Secção reduzida; Área de implantação reduzida; Facilidade de implantação; Menor impacto paisagístico; Facilidade e rapidez na montagem; Vandalismo; Ausência de manutenção nas soluções de slip joint; Facilidade de aprovação junto da população e entidades camarárias.	Facilidade de transporte em locais de difícil acesso; Possibilidade de montar peça a peça; Custo reduzido; Facilidade de armazenagem.
Desvantagens	Dificuldade no transporte; Custos elevados para apoios de maior dimensão; Difícil armazenagem; Obrigatoriedade de uso de grua para a sua implantação.	Extensa área ocupacional; Elevado tempo de montagem; Impacto paisagístico; Elevado número de peças e perdas de material; Vandalismo; Impacto visual.
Tipo de fixação	Slip Joint; Flange.	Aparafusadas.

5.2 - Análise de Custos

O objetivo da realização da análise económica debruçou-se sobre a viabilidade económica quanto à inclusão dos apoios tubulares em projetos como aquele que aqui se apresenta.

Entende-se que, a nível técnico, ambos os apoios garantem a exequibilidade do projeto, contudo, mostra-se necessário perceber os custos imputados por cada um deles.

Dessa forma, foi elaborado um orçamento que compreendesse os vários critérios a analisar isoladamente, para de seguida, cruzar esta informação com a possibilidade de os relacionar e adaptar às especificidades do presente projeto.

Esta análise foi dividida em várias partes, nomeadamente, preço dos postes, custo da mão-de-obra, custo dos equipamentos de suporte à implantação (gruas) e o preço final que este projeto comporta, para a solução reticulados e tubulares. Desta forma, é possível perceber o impacto que cada uma destas rubricas causa.

Após o levantamento destes dados, é equacionada a conjugação entre os diferentes apoios, por forma a reduzir custos e tornar assim, o projeto eficiente.

Os valores apresentados na figura 28, são referentes ao custo de cada um dos apoios. Na análise à figura, é perceptível a diferença de valor entre o treliçado e o seu homólogo, sendo o tubular sempre mais dispendioso, evidenciando um agravamento quando se refere a apoios sujeitos a maiores esforços mecânicos, como é o caso dos apoios de reforço em ângulo e/ou fim de linha (165ADN).

Nesta leitura, é necessário ter em consideração que os valores aqui apresentados são para apoios de linhas de 60 kV.

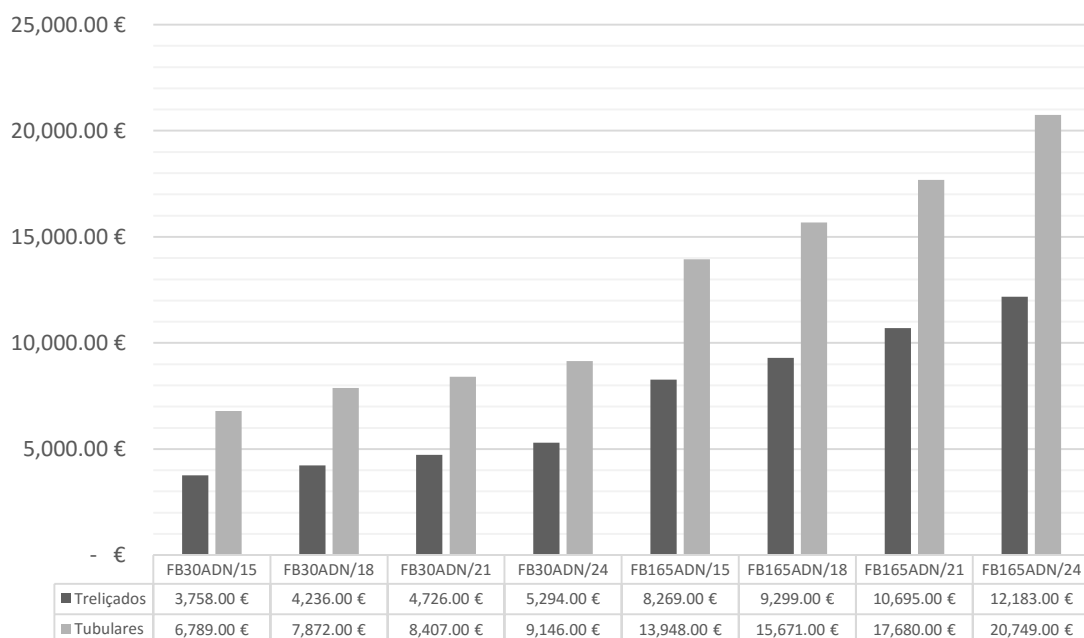


Figura 28 - Custo dos apoios

A figura 29, apresenta uma análise ao custo de mão-de-obra relativa a cada um dos apoios.

Observando a figura, imediatamente se percebe a disparidade de custos entre os dois tipos de apoios. O treliçado é penalizado face ao tubular, devido a um maior recurso de mão-de-obra, assim como, de horas para a sua implantação/montagem.

Para esta análise parte-se do pressuposto que para a montagem de um apoio treliçado FB30ADN/15, são necessários três dias de trabalho (8 horas/dia) e quatro homens. Estes indicadores para o caso dos tubulares, reduzem para um dia de trabalho (8 horas) e dois homens.

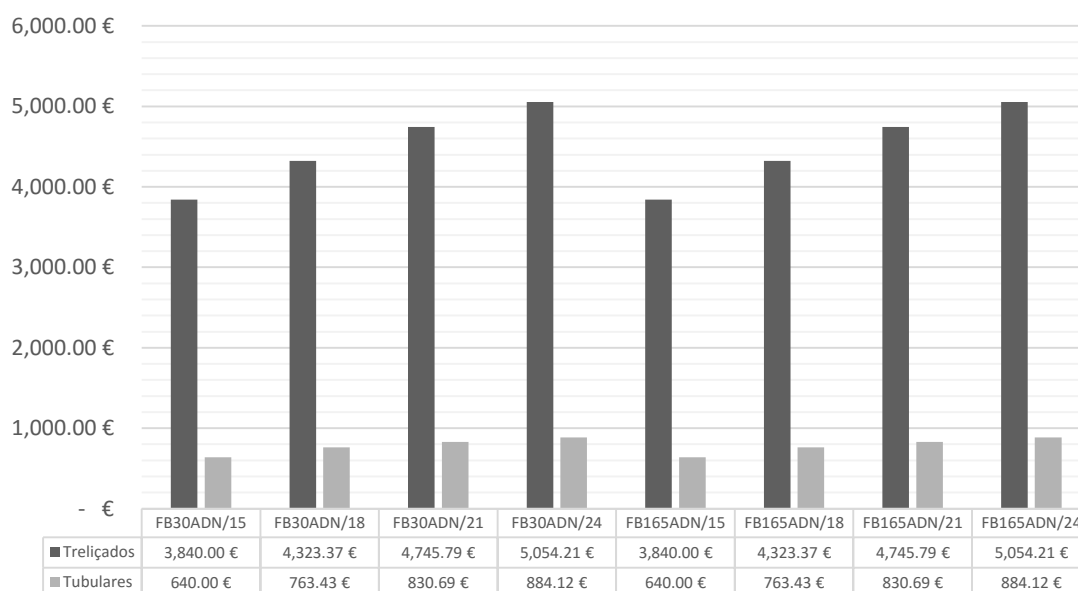


Figura 29 - Custo mão-de-obra

No que concerne ao custo dos meios necessários à implantação dos apoios, a figura 30, exibe um custo superior em 2,5 vezes para os postes treliçados, face aos tubulares.

Este agravamento está relacionado com os indicadores anteriores, na medida em que o tempo de aluguer dos meios necessários à implantação, está diretamente relacionado com o tempo de montagem dos apoios, pois o custo/dia dos meios para os apoios treliçados é mais económico, contudo, este resultado inverte-se devido ao supramencionado.

Para esta análise, não foram considerados os meios logísticos, restringindo-se apenas às gruas para implantação.

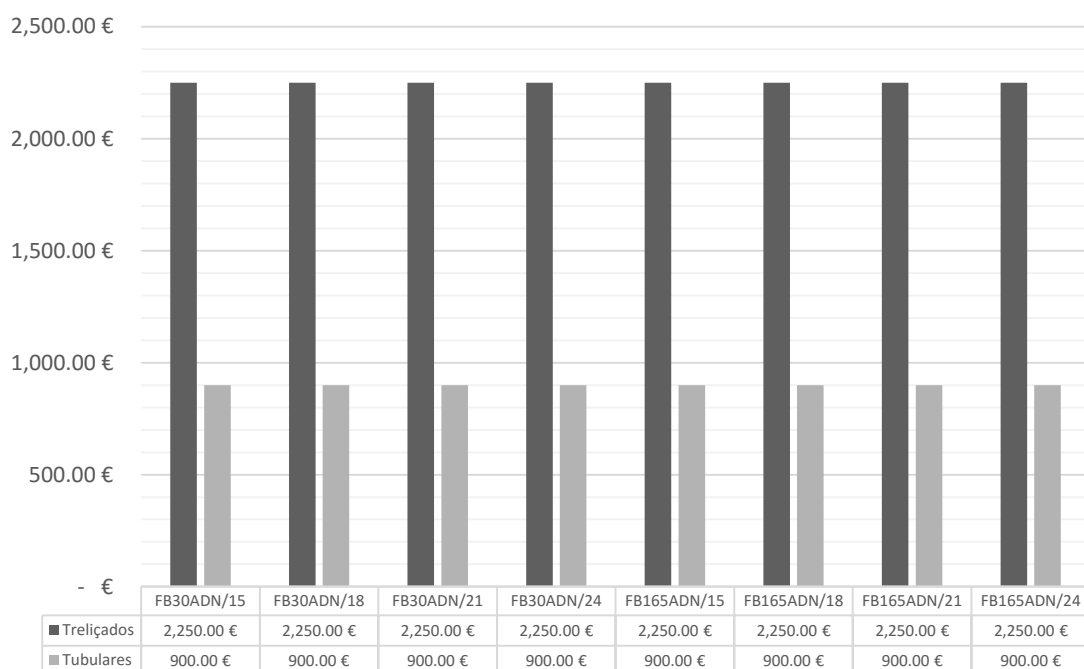


Figura 30 - Custo dos meios/gruas

A figura 31 descreve os custos associados a cada apoio, diferenciando a sua tipologia (treliçado e tubular), e calcula o preço final por instalação.

Da análise gráfica, conclui-se que para apoios sujeitos a esforços mecânicos inferiores, os apoios tubulares apresentam-se como a solução mais económica, no entanto, essa relação inverte-se à medida que os esforços mecânicos aumentam, como se verifica na gama de apoios 165ADN.

Quanto maior são os esforços mecânicos impostos aos apoios, maior a robustez dos mesmos e, consequentemente, a sua dimensão. Para cumprir com a sua característica principal, a silhueta delgada, sem descurar a garantia de suportar os esforços a que é sujeito, os apoios tubulares são reforçados noutros pontos, como o aumento da sua espessura e reforço da sua fundação. Este processo vai repercutir-se no incremento dos seus custos.

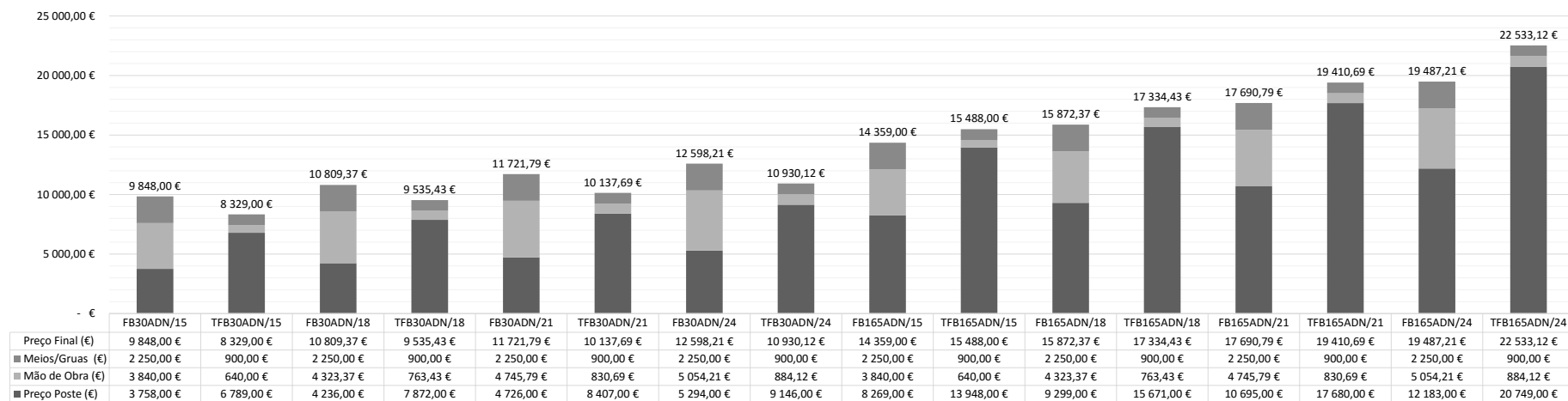


Figura 31 - Custo final por apoio

Como análise final ao caso de estudo, elaboraram-se três propostas de implantação, que agregam todos os indicadores já mencionados nas figuras anteriores (quantidade e custo dos apoios, custo de mão de obra e custos dos meios), que dão corpo à figura 32.

Fazendo uma leitura à figura da esquerda para a direita, verifica-se que a primeira solução, projeto composto somente com apoios reticulados é mais económica, comparado com a segunda solução, que se apresenta como sendo a mais dispendiosa, composta por apoios tubulares.

A esta diferença monetária de 0.24 %, correspondentes a 634,37 euros, é facilmente suprimida pois não está a ser tomado em conta alguns fatores que podem influenciar o resultado final, como se dá no caso de terminar a construção da linha mais cedo, implicando um menor tempo de deslocação dos funcionários, aluguer dos estaleiros, encerramento de estradas e transtorno para a população local.

Tendo em conta a figura 32 - custo final por apoio, ficou perceptível que os esforços mecânicos têm influência direta no custo final do apoio. Esta constatação despertou curiosidade numa possível combinação de apoios reticulados e tubulares tendo em vista a minimização do custo final do projeto. Nasce assim a terceira solução, composta por apoios reticulados para a referência 165ADN e pelos tubulares para a 30ADN. Esta apresenta-se como sendo a mais económica entre as três, reduzindo o valor final em 14087 euros face à primeira solução, correspondente a uma redução de 5,43 % e 14722 euros face à segunda, correspondente a 5,66 %.

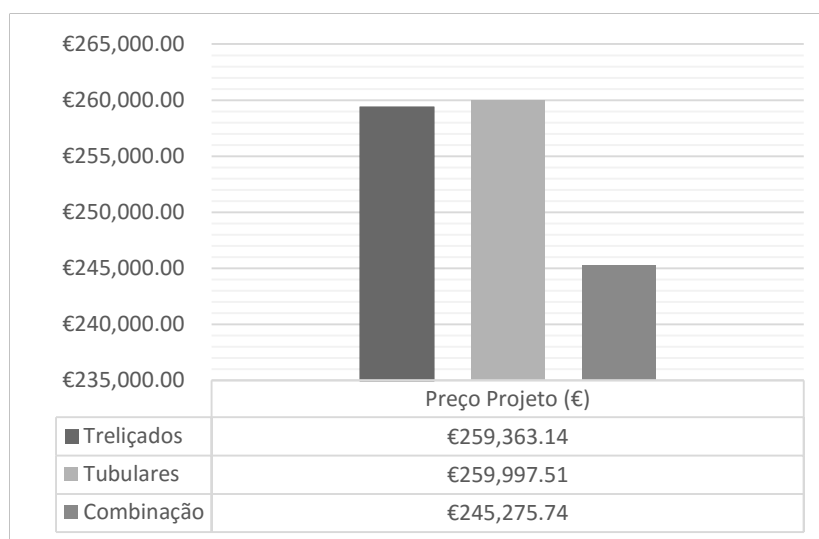


Figura 32 - Comparação do custo do projeto

Sumário:

No presente capítulo conclui-se que tecnicamente tanto os apoios reticulados como os tubulares são capazes de suportar os esforços mecânicos a que são expostos. Na análise económica, é possível observar que os apoios reticulados são mais económicos face aos tubulares, contudo, quando se consideram os custos de mão-de-obra e de meios necessários à sua implantação, estes mostram ter grande expressão, atenuando a diferença dos valores finais entre os dois. Com enfoque na minimização de custos, elaborou-se uma solução que conjuga os dois tipos de apoios para o projeto, atingindo assim este objetivo.

Capítulo 6

Conclusões e Desafios

6.1 - *Conclusões Gerais*

A realização do presente projeto atribuiu enorme sentido e substância a todo um percurso académico que culminou numa experiência em ambiente empresarial, totalmente enriquecida pela aprendizagem e capacitação que imprimiu neste percurso e que se materializa com o documento.

Além das demais qualidades técnicas adjacentes a todo o trabalho, sublinha-se a aplicação da Norma Europeia EN 50341-1 e os seus aspetos normativos nacionais. A introdução dos seus conceitos foi feita em substituição do Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão.

Realça-se também uma peleja determinante para a concretização do presente, nomeadamente, a criação e desenvolvimento de uma folha de cálculo originária do *software* Excel, com o propósito de efetuar todos os cálculos inerentes a um projeto de linhas aéreas, cálculo elétrico e mecânico.

O desafio aqui apresentado relacionou-se com a validação dos resultados obtidos no documento referido, quando confrontado com os valores finais do *software* PLS-CADD™.

Da realização do caso de estudo, pode concluir-se que a utilização do PLS-CADD™ em projetos de linhas aéreas é uma ferramenta vantajosa e aconselhável, principalmente no que diz respeito à modelação do traçado tridimensional, conseguindo-se assim verificar com clareza a posição e desvios das cadeias de isoladores de forma automatizada.

É de salientar que com a utilização deste recurso, foi possível verificar a inviabilidade de utilização de cadeia de suspensão no apoio 17, ficando o mesmo numa situação de *uplift*, situação não verificada no cálculo analítico.

A facilidade de interligação com o *software Google Earth* proporciona uma experiência bastante real, perspetivando a sua implantação no terreno.

O facto de o PLS-CADD™ não ter predefinido as parametrizações exigidas para Portugal, tornou o processo de validação de dados moroso e desafiante, sendo necessário um vasto conjunto de testes de parametrização até à obtenção dos devidos resultados.

As capacidades adquiridas ao longo do estudo de projetos de linhas aéreas, conjugado com a realização analítica do cálculo mecânico apuraram um sentido crítico que demonstrou ser fundamental na análise aos valores iniciais reportados pelo PLS-CADD™.

Nesta sequência, o principal desafio de parametrização, incidiu no caso de carga 5b - esforços longitudinais. Este é um caso particular, na medida em que se baseia num conceito teórico, que é, considerar 30% da carga de vento no condutor, e aplicá-la no sentido longitudinal, provocando assim um desequilíbrio no mesmo sentido.

Da realização da análise técnica e económica, pode concluir-se que, dos parâmetros avaliados, a nível técnico, ambos cumprem com os requisitos mecânicos e, a nível económico, constata-se que para os apoios sujeitos a menores esforços mecânicos, os tubulares mostram-se vantajosos, quando comparados com os apoios reticulados. A situação inversa surge quando se tratam de esforços mecânicos elevados. Assim sendo, entende-se que a solução mais económica para o projeto passa pela combinação entre os dois.

A análise compreende também que, na avaliação entre os dois tipos de apoios separadamente, a solução que ficaria economicamente mais vantajosa seria a dos apoios reticulados, contudo, é sempre necessário ter em conta que existem fatores que não foram incluídos na análise, fatores esses devidamente descritos no capítulo cinco, que poderão influenciar esta diferença entre orçamentos.

A título conclusivo, assume-se que os objetivos estipulados para a dissertação foram atingidos, obtendo-se um conjunto de soluções equiparadas, viabilizando o cálculo analítico, e introduzindo o *software*, como um meio facilitador à concretização do projeto.

6.2 - *Desafios*

Como desafio futuro, seria de grande utilidade a elaboração de um projeto de uma linha aérea segunda a norma EN 50341-3-17 com o cálculo de todos os casos de carga possíveis, e parametrização do PLS-CADD™ para os mesmos.

Considera-se também interessante e desafiante a possibilidade de realizar um projeto segundo a norma EN 50341-1, com os aspetos normativos de outro país e obter um entendimento maior acerca das diferenças na adaptabilidade contextual num outro território.

Desenvolver uma biblioteca de apoios para diferentes níveis de tensão, com atribuição de custos para que seja possível obter uma análise económica através do PLS-CADD™.

Construção de um guia detalhado sobre o *software* que permita às empresas de projeto realizar um projeto completo com maior rapidez e exatidão, garantindo a minimização dos erros e tempo dispensado.

Referências

- [1] “POWER LINE systems inc,” [Online]. Available: http://www.powline.com/products/pls_cadd.html. [Acedido em 2015].
- [2] CENELEC, “EN 50341-3-17 - Aspectos Normativos Nacionais para Portugal,” 2001.
- [3] CENELEC, “EN 50341-1 - Overhead electrical lines exceeding AC 45kV,” 2001.
- [4] P. R. Labegalini, J. A. Labegalini, R. D. Fuchs e M. T. d. Almeida, *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*, 1992.
- [5] F. Távora, *Linhas de Trasmissão de Energia Elétrica*.
- [6] G. Zoppetti, *Redes eléctricas da alta y baja tensión*, Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1978.
- [7] J. N. d. Santos, “Condutores e cabos de energia,” Novembro 2005.
- [8] N. Tavares, “Condutores aéreos de elevada capacidade - Avaliação de up-rating-Dimensionamento elétrico e mecânico,” *Dissertação de Mestrado*, 2013.
- [9] P. Galvão, “Redes elétricas de média e baixa tensão - Aspectos de projeto, licenciamento e exploração em contexto operracional,” *Dissertação de Mestrado*, 2010.
- [10] L. M. Checa, *Linhas de Transporte de Energia*, Barcelona, 1979.
- [11] EGSP, “EGSP, Energia e Sistemas de Potência, Lda,” [Online]. Available: www.egsp.pt. [Acedido em 10 janeiro 2016].
- [12] H. Leite, “Apontamento de RTDI - Elaboração de Projetos de Linhas Aéreas de Energia,” Porto, 2008/09.

- [13] R. C. Barros, Very High Strength Steel Poles, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [14] A. A. Vale, Linhas Aéreas de Transmissão de Energia, FEUP.
- [15] A. M. e. Moura, “Cálculo elétrico e mecânico - Apontamento Teóricos”.
- [16] C. Avril, Construction des lignes aériennes a haute tension, 1974.
- [17] S. -. M. Irmãos Silva, “Metalogalva,” [Online]. Available: <http://www.metalogalva.pt/pt/>. [Acedido em 2016].
- [18] F. Kiessling, P. Nefzger, U. Kaintzyk e J. F. Nolasco, Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction, Springer, 2003.
- [19] S. -. S. Condutores Elétricos, Guia Técnico.
- [20] R. J. F. V. Fernandes, “Guia Técnico do Projetista de Linhas Aéreas de Transporte de Energia”.
- [21] J. R. Ferreira, “Linhas de Transmissão - Apontamentos de Sistemas Elétricos de Energia”.

Anexos

Anexo A - Parâmetro da catenária e flecha do cabo de guarda

Apoios	Vão [m]	Cantão	Leq [m]	θ_i [°C]	T_EDS [N]	T_EDS [%]	T θ_i [N]	T θ_i [%]	P [m]	f [m]
A1_A2	109.06	1	109.06	75	11962.80	18%	5501.57	8%	953.76	1.56
A2_A3	326.50	2	326.50	75	11962.80	18%	9209.33	14%	1596.55	8.35
A3_A4	162.32	3	162.32	75	11962.80	18%	6822.78	10%	1182.81	2.78
A4_A5	261.11	4	263.55	75	11962.80	18%	8509.50	13%	1475.22	5.78
A5_A6	271.47									
A6_A7	312.43									
A7_A8	268.34									
A8_A9	272.22									
A9_A10	229.50									
A10_A11	248.22									
A11_A12	250.54	5	219.89	75	11962.80	18%	7885.10	12%	1366.98	5.89
A12_A13	226.84									
A13_A14	253.90									
A14_A15	129.01	6	361.86	75	11962.80	18%	9522.37	14%	1650.82	9.91
A15_A16	361.86	7	275.62	75	11962.80	18%	8257.12	12%	1431.47	6.63
A16_A17	275.62	8	192.03	75	11962.80	18%	7846.27	12%	1360.24	3.39
A17_A18	192.03	9	155.45	75	11962.80	18%	6673.41	10%	1156.92	2.61
A18_A19	155.45									

Anexo B - Parâmetro da catenária e flecha do cabo condutor

Apoios	Vão [m]	Cantão	Leq [m]	θ_i [°C]	T_EDS [N]	T_EDS [%]	T θ_i [N]	T θ_i [%]	P [m]	f [m]
A1_A2	109.06	1	109.06	75	19688.40	18%	9090.28	8%	764.17	1.95
A2_A3	326.50	2	326.50	75	19688.40	18%	15720.28	14%	1321.52	10.08
A3_A4	162.32	3	162.32	75	19688.40	18%	11557.11	11%	971.54	3.39
A4_A5	261.11	4	263.55	75	19688.40	18%	14553.10	13%	1223.40	6.97
A5_A6	271.47									
A6_A7	312.43									
A7_A8	268.34									
A8_A9	272.22									
A9_A10	229.50									
A10_A11	248.22									
A11_A12	250.54									
A12_A13	226.84									
A13_A14	253.90	5	219.89	75	19688.40	18%	13470.60	12%	1132.40	7.12
A14_A15	129.01									
A15_A16	361.86	6	361.86	75	19688.40	18%	16224.52	15%	1363.91	12.00
A16_A17	275.62	7	275.62	75	19688.40	18%	14119.87	13%	1186.98	8.00
A17_A18	192.03	8	192.03	75	19688.40	18%	13402.15	12%	1126.65	4.09
A18_A19	155.45	9	155.45	75	19688.40	18%	11282.17	10%	948.43	3.18

Anexo C - Comparação dos resultados do apoio nº 4, reforço em ângulo entre o cálculo analítico e o PLS-CADD™

		Reforço em Ângulo								
		Excel			PLS-CADD			Diferenças		
	Pto Amarração	L [N]	T [N]	V [N]	L [N]	T [N]	V [N]	L [N]	T [N]	V [N]
Caso 1a V. Max	CG	2517	13516	1832	2370	12113	1923	147	1403	-91
	C1	2710	20070	4268	2079	17445	3008	631	2625	1260
	C2	2710	20070	4268	2072	17445	3102	638	2625	1166
	C3	2710	20070	4268	2058	17445	3196	652	2625	1072
	C4	2710	20070	4268	2043	17445	3008	667	2625	1260
	C5	2710	20070	4268	2036	17445	3102	674	2625	1166
	C6	2710	20070	4268	2020	17445	3196	690	2625	1072
Caso 1b V. Red	CG	516	9952	1832	715	8037	1923	-199	1915	-91
	C1	1957	15500	4268	2428	13110	3008	-471	2390	1260
	C2	1957	15500	4268	2429	13146	3102	-472	2354	1166
	C3	1957	15500	4268	2432	13176	3196	-475	2324	1072
	C4	1957	15500	4268	2376	13074	3008	-419	2426	1260
	C5	1957	15500	4268	2378	13113	3102	-421	2387	1166
	C6	1957	15500	4268	2382	13147	3196	-425	2353	1072
Caso 5b 3a	CG	13057	0	1832	13305	0	1923	-248	0	-91
	C1	19547	0	4271	18653	0	3008	894	0	1263
	C2	19547	0	4271	18653	0	3102	894	0	1169
	C3	19547	0	4271	18654	0	3196	893	0	1075
	C4	19547	0	4271	18649	0	3008	898	0	1263
	C5	19547	0	4271	18648	0	3102	899	0	1169
	C6	19547	0	4271	18647	0	3196	900	0	1075
C a s o 5 a - R o t u r a s	CG	16141	5245	702	18071	5533	962	-1930	-288	-259
	C1	2691	17272	4271	1819	15290	3008	872	1982	1263
	C2	2691	17272	4271	1819	15288	3102	872	1984	1169
	C3	2691	17272	4271	1819	15286	3196	872	1986	1075
	C4	2691	17272	4271	1784	15295	3008	907	1977	1263
	C5	2691	17272	4271	1782	15297	3102	909	1975	1169
	C6	2691	17272	4271	1782	15299	3196	909	1973	1075
	CG	2512	11305	1832	2184	10398	1923	328	907	-91
	C1	25233	8199	1695	25867	7917	1479	-634	282	216
	C2	2691	17272	4271	1819	15288	3102	872	1984	1169
	C3	2691	17272	4271	1819	15286	3196	872	1986	1075
	C4	2691	17272	4271	1784	15295	3008	907	1977	1263
	C5	2691	17272	4271	1782	15297	3102	909	1975	1169
	C6	2691	17272	4271	1782	15299	3196	909	1973	1075
	CG	2512	11305	1832	2184	10398	1923	328	907	-91
	C1	2691	17272	4271	1819	15290	1504	872	1982	2767
	C2	2691	17272	4271	1819	15288	1551	872	1984	2720
	C3	25233	8199	1695	25867	7917	1479	-634	282	216
	C4	2691	17272	4271	1784	15295	3008	907	1977	1263
	C5	2691	17272	4271	1782	15297	3102	909	1975	1169
	C6	2691	17272	4271	1782	15299	3196	909	1973	1075
	CG	2512	11305	1832	2184	10398	1923	328	907	-91
	C1	2691	17272	4271	1819	15290	1504	872	1982	2767
	C2	2691	17272	4271	1819	15288	1551	872	1984	2720
	C3	2691	17272	4271	1819	15286	1598	872	1986	2673
	C4	2691	17272	4271	1784	15295	1456	907	1977	2815
	C5	25233	8199	1695	25867	7917	1479	-634	282	216
	C6	2691	17272	4271	1782	15299	3196	909	1973	1075
	CG	2512	11305	1832	2184	10398	1923	328	907	-91
	C1	2691	17272	4271	1819	15290	1504	872	1982	2767
	C2	2691	17272	4271	1819	15288	1551	872	1984	2720
	C3	2691	17272	4271	1819	15286	1598	872	1986	2673
	C4	2691	17272	4271	1784	15295	1456	907	1977	2815
	C5	2691	17272	4271	1782	15297	1501	909	1975	2770
	C6	25233	8199	1695	25867	7917	1479	-634	282	216

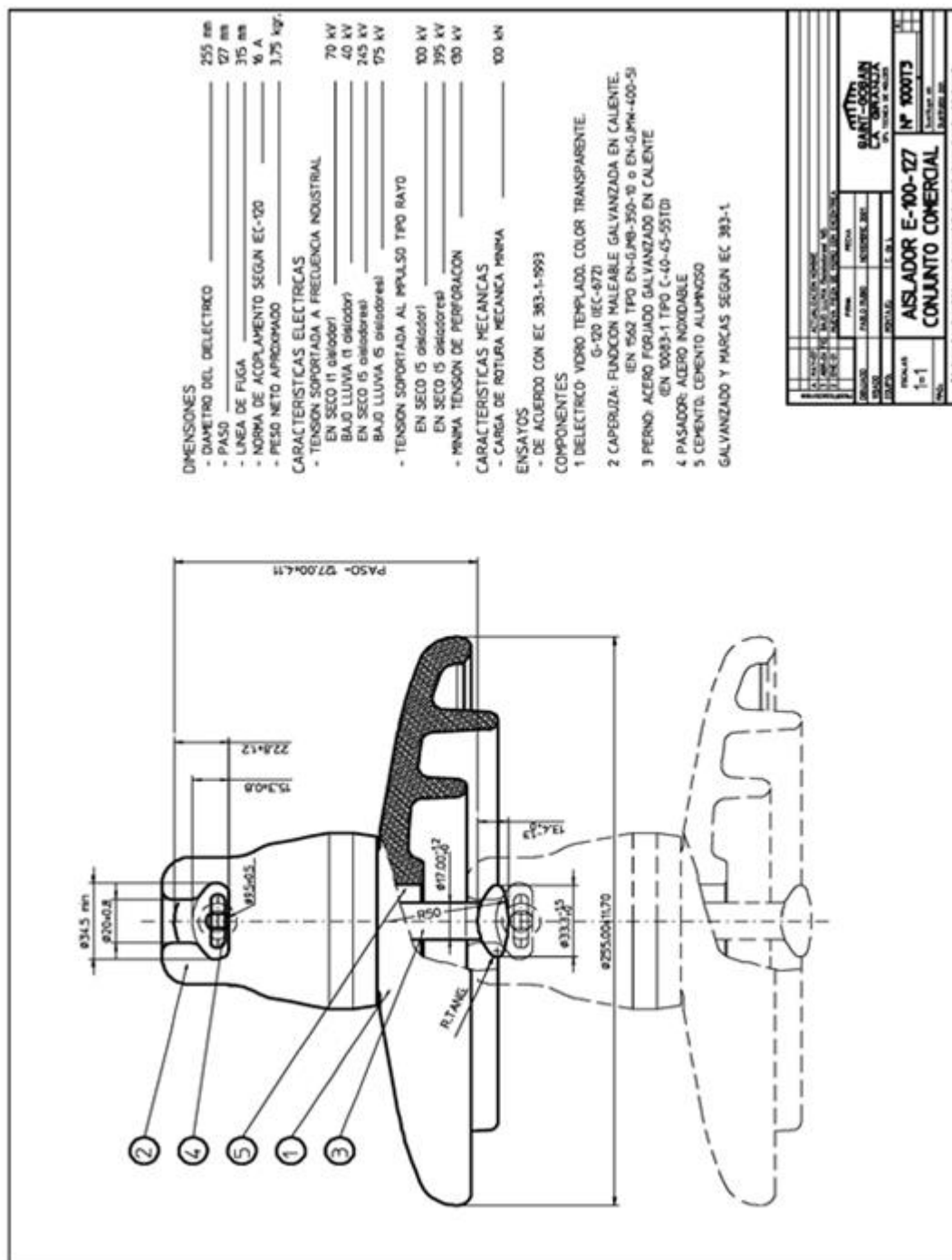
Anexo D - Comparação dos resultados do apoio nº 1, tipo fim de linha entre o cálculo analítico e o PLS-CADD™

		Fim de Linha								
		Excel			PLS-CADD			Diferenças		
	Pto Amarração	L [N]	T [N]	V [N]	L [N]	T [N]	V [N]	L [N]	T [N]	V [N]
Caso 1a V. Max	CG	15174	629	472	14948	618	812	226	11	-340
	C1	24287	1151	1218	23378	1030	1472	909	121	-254
	C2	24287	1151	1218	23380	992	1472	907	159	-254
	C3	24287	1151	1218	23382	952	1472	905	199	-254
	C4	24287	1151	1218	23378	1031	1472	909	120	-254
	C5	24287	1151	1218	23380	993	1472	907	158	-254
	C6	24287	1151	1218	23382	952	1472	905	199	-254
Caso 1b V. Red	CG	15666	180	472	15559	177	812	107	3	-340
	C1	27188	329	1219	26954	294	1472	234	35	-253
	C2	27188	329	1219	26955	283	1472	233	46	-253
	C3	27188	329	1219	26956	272	1472	232	57	-253
	C4	27188	329	1219	26954	294	1472	234	35	-253
	C5	27188	329	1219	26955	284	1472	233	45	-253
	C6	27188	329	1219	26956	272	1472	232	57	-253
C a s o 5 a - R o t u r a s	CG	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C1	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C2	24287	0	1219	23380	0	1472	907	0	-253
	C3	24287	0	1219	23382	0	1472	905	0	-253
	C4	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C5	24287	0	1219	23380	0	1472	907	0	-253
	C6	24287	0	1219	23382	0	1472	905	0	-253
	CG	15174	0	472	14948	0	812	226	0	-340
	C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C2	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C3	24287	0	1219	23380	0	1472	907	0	-253
	C4	24287	0	1219	23382	0	1472	905	0	-253
	C5	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C6	24287	0	1219	23380	0	1472	907	0	-253
	CG	15174	0	472	14948	0	812	226	0	-340
	C1	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C3	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C4	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C5	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C6	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	CG	15174	0	472	14948	0	812	226	0	-340
	C1	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C2	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C4	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C5	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C6	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	CG	15174	0	472	14948	0	812	226	0	-340
	C1	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C2	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C3	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C4	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C6	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	CG	15174	0	472	14948	0	812	226	0	-340
	C1	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C2	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C3	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C4	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C5	24287	0	1219	23378	0	1472	909	0	-253
	C6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

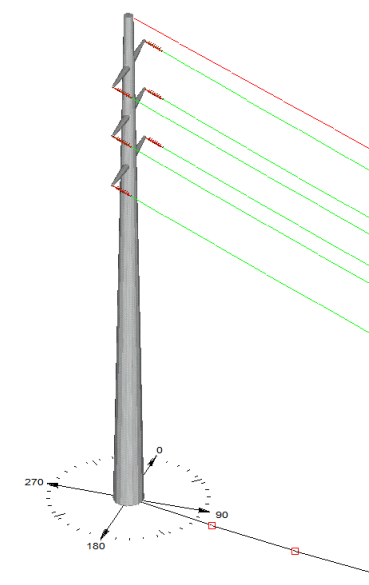
Anexo E - Apoios utilizados e sua função

Numeração	Ref ^a	Ref ^a	Função	Ângulo
	Apoio Reticulado	Apoio Tubular		$\alpha/2$ (grados)
1	FB165ADN/15	TTFB165ADN/15	Início de linha	0
2	FB165ADN/24	TFB165ADN/24	Amarração	0
3	FB165ADN/15	TFB165ADN/15	Ângulo	25
4	FB165ADN/21	TFB165ADN/21	Reforço em ângulo	20
5	FB30ADN/24	TFB30ADN/24	Alinhamento em suspensão	0
6	FB30ADN/15	TFB30ADN/15	Alinhamento em suspensão	0
7	FB30ADN/24	TFB30ADN/24	Alinhamento em suspensão	0
8	FB30ADN/24	TFB30ADN/24	Alinhamento em suspensão	0
9	FB30ADN/18	TFB30ADN/18	Alinhamento em suspensão	0
10	FB30ADN/15	TFB30ADN/15	Alinhamento em suspensão	0
11	FB30ADN/24	TFB30ADN/24	Alinhamento em suspensão	0
12	FB30ADN/15	TFB30ADN/15	Alinhamento em suspensão	0
13	FB165ADN/15	TFB165ADN/15	Reforço em ângulo	20
14	FB30ADN/21	TFB30ADN/21	Alinhamento em suspensão	0
15	FB165ADN/15	TFB165ADN/15	Ângulo	30
16	FB165ADN/15	TFB165ADN/15	Ângulo	20
17	FB165ADN/15	TFB165ADN/15	Amarração	0
18	FB165ADN/21	TFB165ADN/21	Amarração	0
19	FB165ADN/18	TFB165ADN/18	Fim de linha	0

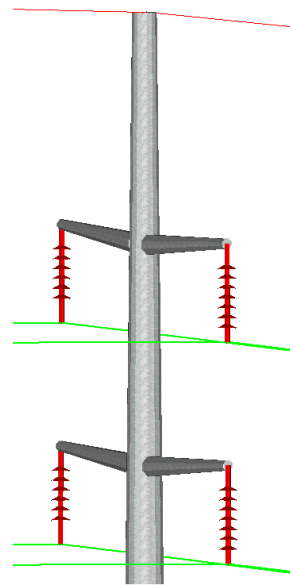
Anexo F - Isolador E100-127



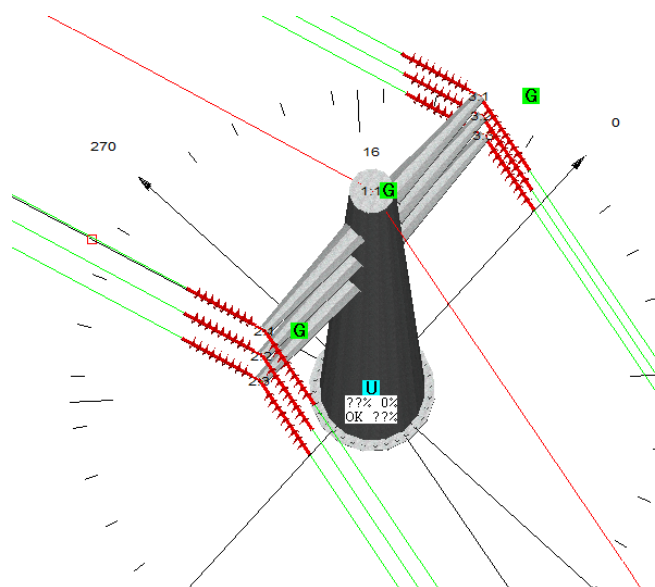
Anexo G - Ilustrações em 3D, retiradas do PLS-CADD™



Apoio fim de linha

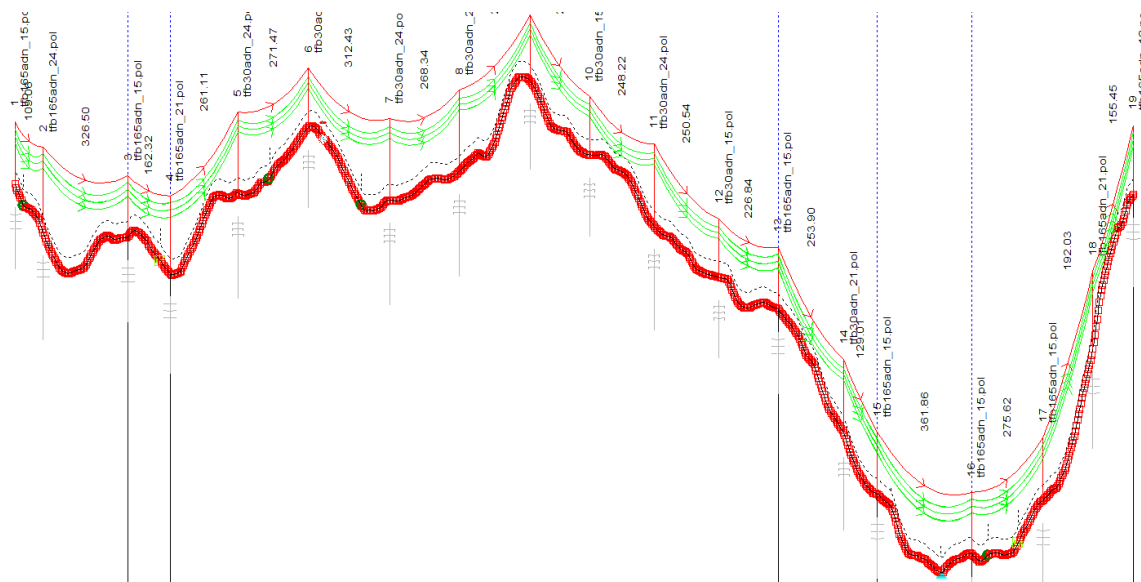


Apoio de alinhamento com cadeias de isoladores em suspensão

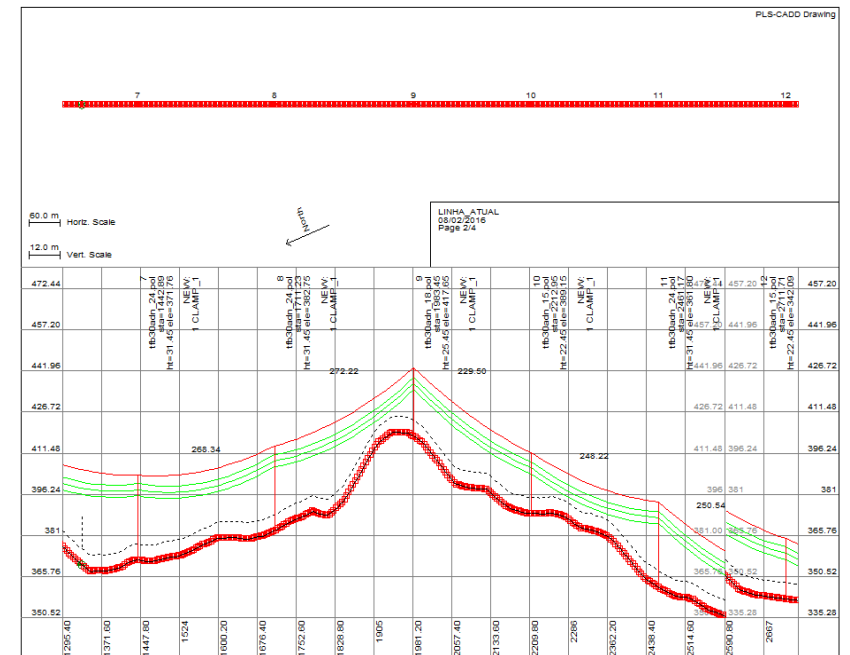
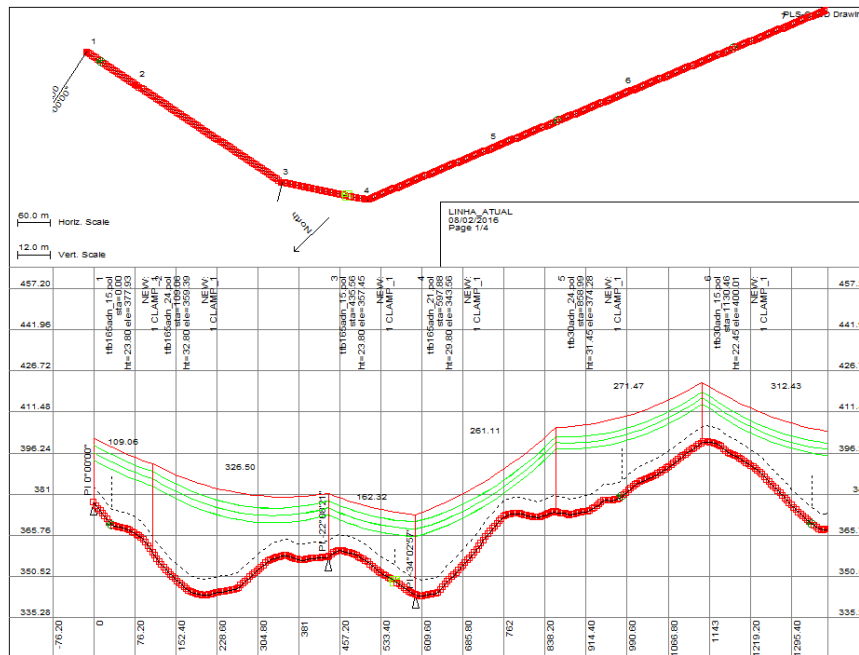


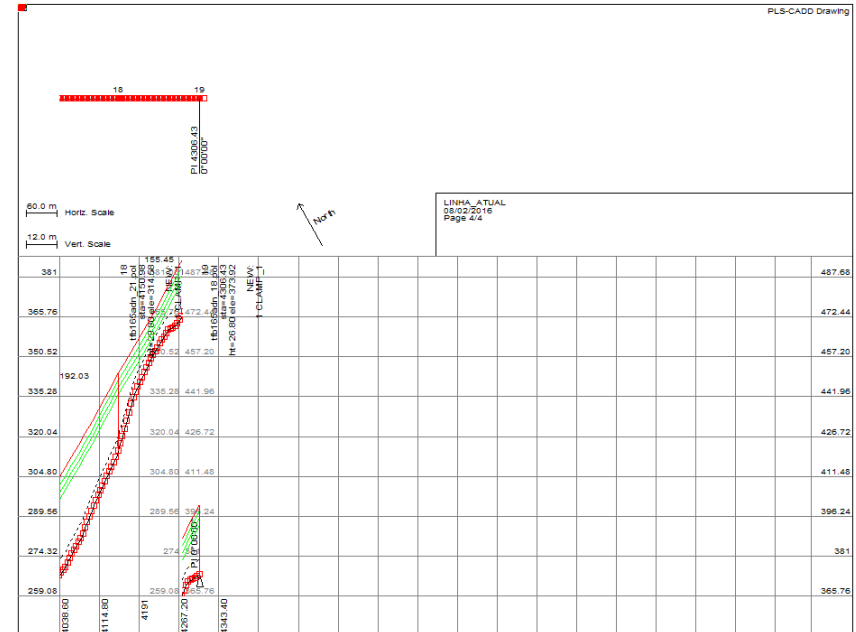
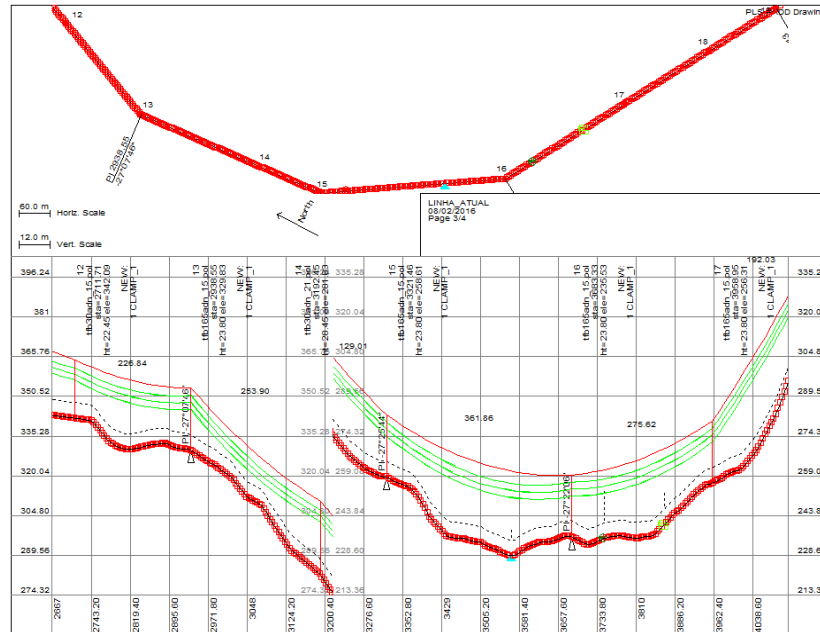
Apoio de ângulo com cadeias de isoladores em amarração

Anexo H - Perfil da linha, retirado do PLS-CADD™



Anexo I - Vista aérea e de perfil, retirado do PLS-CADD™





Anexo J - Parametrização dos casos de carga no PLS-CADD™

Structure Loads Criteria

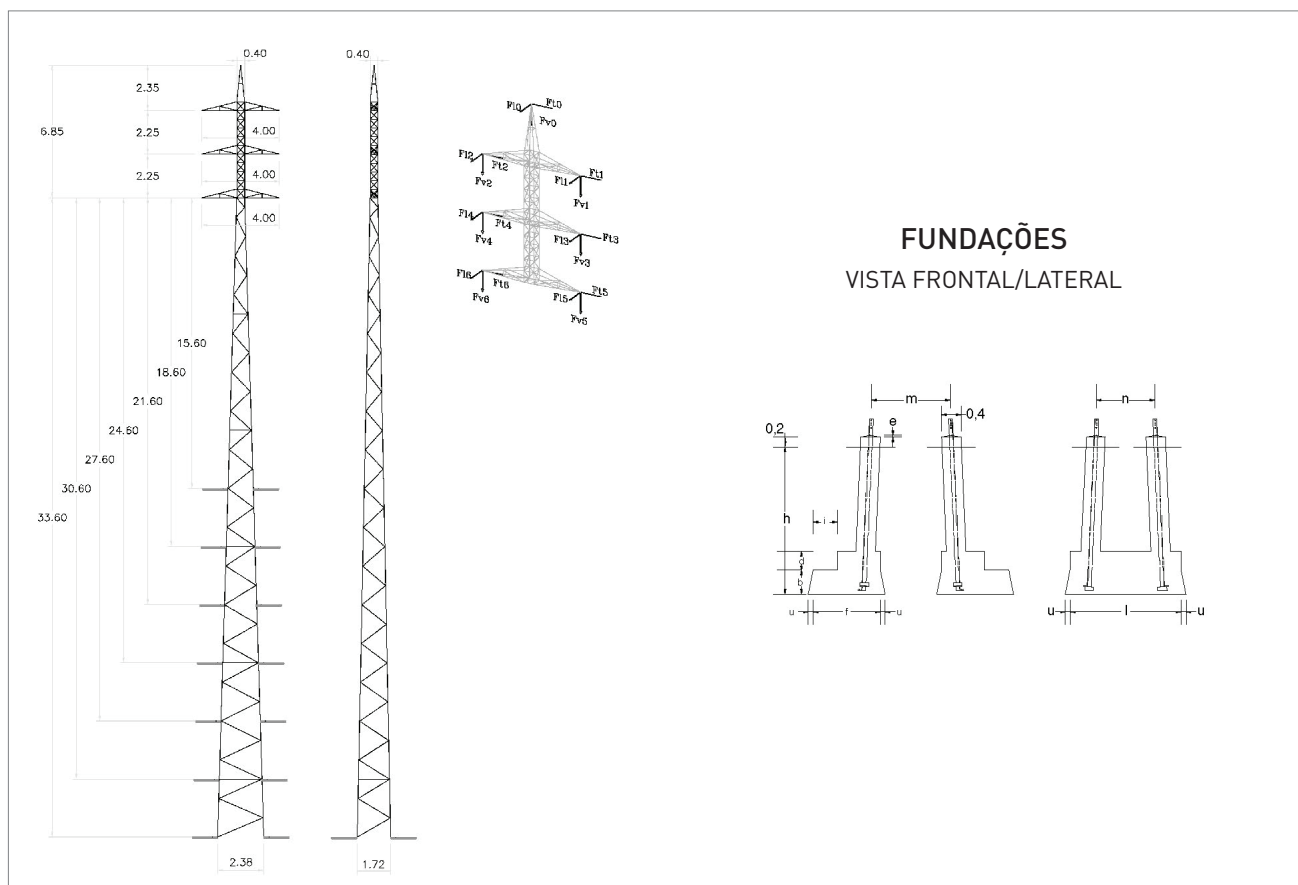
	Description	Weather cat.	Cable condition	Wind direction	Wind speed	Wire sag	Wire and structure Load Factor	Wire sag	Wire sag	Structure Wind Area Factor	Structure Wind Load Model
1	+ Hip 1a	Vento Ext	Initial RS	NA+	NA	1	1	1	1	1	EN50341-3-17
2	- Hip 1a	Vento Ext	Initial RS	NA-	NA	1	1	1	1	1	EN50341-3-17
3	+ Hip 1b	Vento Red	Initial RS	NA+	NA	1	1	1	1	1	EN50341-3-17
4	- Hip 1b	Vento Red	Initial RS	NA-	NA	1	1	1	1	1	EN50341-3-17
5	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
6	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
7	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
8	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
9	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
10	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
11	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
12	- Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
13	- Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
14	- Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
15	- Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
16	- Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
17	- Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
18	- Hip 5a	EDS	Initial RS	NA+	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17
19	+ Hip 5a	EDS	Initial RS	NA-	NA	1	1e-005	1	1	1e-005	EN50341-3-17

Structure Loads Criteria

	Structure Groups	Pole Tip reflection	Structure Groups	#1 Wire(s)	#1 Command	#1 Wire(s)	#2 Wire(s)
18	1 'Has DE'	No Limit	Yes	3:3:Back	# Broken Subconductors	1	
19	1 'Has DE'	No Limit	Yes	1:1:Ahead	# Broken Subconductors	1	
20	1 'Has DE'	No Limit	Yes	2:1:Ahead	# Broken Subconductors	1	
21	1 'Has DE'	No Limit	Yes	2:2:Ahead	# Broken Subconductors	1	
22	1 'Has DE'	No Limit	Yes	2:3:Ahead	# Broken Subconductors	1	
23	1 'Has DE'	No Limit	Yes	3:1:Ahead	# Broken Subconductors	1	
24	1 'Has DE'	No Limit	Yes	3:2:Ahead	# Broken Subconductors	1	
25	1 'Has DE'	No Limit	Yes	3:3:Ahead	# Broken Subconductors	1	
26	1 'Has DE'	No Limit	Yes	1:1:Back	# Broken Subconductors	1	
27	1 'Has DE'	No Limit	Yes	2:1:Back	# Broken Subconductors	1	
28	1 'Has DE'	No Limit	Yes	2:2:Back	# Broken Subconductors	1	
29	1 'Has DE'	No Limit	Yes	2:3:Back	# Broken Subconductors	1	
30	1 'Has DE'	No Limit	Yes	3:1:Back	# Broken Subconductors	1	
31	1 'Has DE'	No Limit	Yes	3:2:Back	# Broken Subconductors	1	
32	1 'Has DE'	No Limit	Yes	3:3:Back	# Broken Subconductors	1	
33	1 'Has DE'	No Limit	Yes	Ahead Spans	% Long. Load (wire coord. system)	30	
34	1 'Has DE'	No Limit	Yes	Back Spans	% Long. Load (wire coord. system)	30	
35	1 'No DE'	No Limit	Yes	Back+Ahead Spans	% Long. Load (wire coord. system)		Back+Ahead Spans
36	1 'No DE'	No Limit	Yes	Back+Ahead Spans	% Long. Load (wire coord. system)		Back+Ahead Spans

Apoios

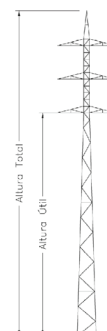
POSTE TIPO FB30ADN



CARACTERÍSTICAS

REF. ^a POSTE	ALTURA TOTAL [m]	ALTURA ÚTIL [m]	PESO APROXIMADO DO APOIO (NÃO INCLUI BASE) [kg] (*)	PESO APROXIMADO DA BASE [kg] (**)			
				TIPO DE SOLO (β)			
				30°	25°	20°	15°
FB30ADN15	17.8	15.6	2368	391	391	409	438
FB30ADN18	20.8	18.6	2709	407	407	425	454
FB30ADN21	23.8	21.6	3099	383	383	401	430
FB30ADN24	26.8	24.6	3463	442	442	460	490
FB30ADN27	29.8	27.6	3928	456	456	478	513
FB30ADN30	32.8	30.6	4349	455	455	476	511
FB30ADN33	35.8	33.6	4943	445	445	467	502

(*) Peso teórico. Inclui consolas, parafusos e galvanização.
(**) Peso teórico. Inclui parafusos.



UTILIZAÇÃO (ZONA A) - CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

ALTURA [m]	CABOS A UTILIZAR		VÃOS [m]		ÂNGULOS [grados]	FUNÇÃO DE APOIO
	C. DE GUARDA	CONDUTOR	VENTO	GRAVÍTICO		
33	ACSR 130	ACSR 325	280	600	-	Alinhamento
27			335			

POSTE TIPO FB30ADN

QUADRO DE ACÇÕES SEGUNDO A EN 50341-3-17 [N]

ALTURA [m]	CABOS	CASO DE CARGA	VENTO	Ft0	Fv0	Fl0	Ft1 Ft2	Fv1 Fv2	Fl1 Fl2	Ft3 Ft4	Fv3 Fv4	Fl3 Fl4	Ft5 Ft6	Fv5 Fv6	Fl5 Fl6
33	ACSR 130 + ACSR 325	1a	Trans.	3642	3464	0	5719	7840	0	5581	7840	0	5438	7840	0
							5719	7840	0	5581	7840	0	5438	7840	0
		5b	S/vento	0	3464	520	0	7840	817	0	7840	797	0	7840	777
							0	7840	817	0	7840	797	0	7840	777
		1a	Long.	0	3464	463	0	7840	1216	0	7840	1187	0	7840	1157
							0	7840	1216	0	7840	1187	0	7840	1157
27	ACSR 130 + ACSR 325	1a	Trans.	4086	3465	0	6292	7841	0	6112	7841	0	5923	7841	0
							6292	7841	0	6112	7841	0	5923	7841	0
		5b	S/vento	0	3465	584	0	7841	899	0	7841	873	0	7841	846
							0	7841	899	0	7841	873	0	7841	846
		1a	Long.	0	3465	619	0	7841	1201	0	7841	1166	0	7841	1130
							0	7841	1201	0	7841	1166	0	7841	1130

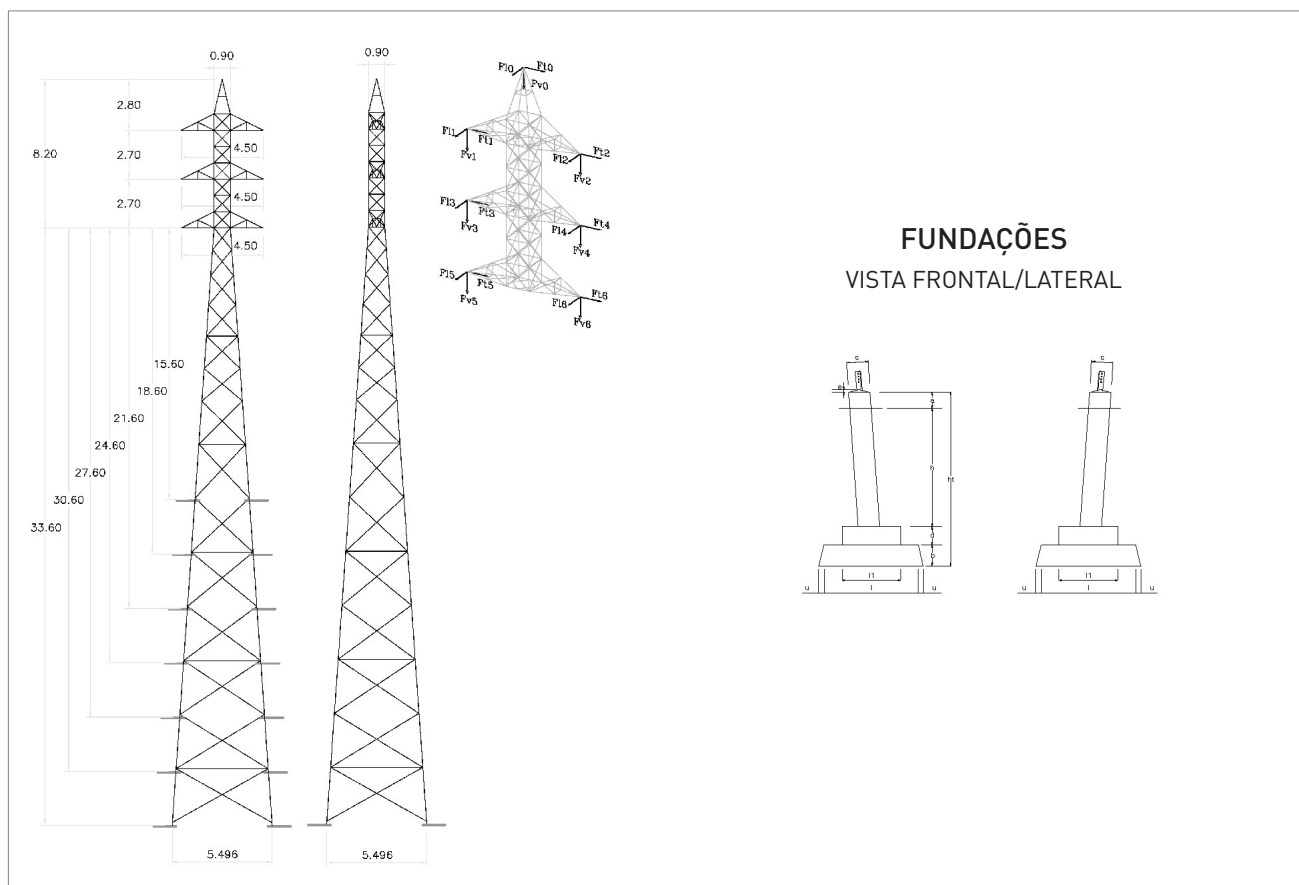
FUNDAÇÕES - VISTA FRONTAL/LATERAL

TERRENO		APOIO	b [m]	d [m]	e [m]	f [m]	h [m]	i [m]	l [m]	m [m]	n [m]	u [m]	VOLUMES POR APOIO		
PESO	ÂNGULO β [°]												ESCAV. [m3]	BETÃO SEM COFRAGEM. [**] [m3]	BETÃO COM COFRAGEM [**] [m3]
daN/m³	GRAUS														
1600	30	FB30ADN/15	0.60	0.45	0.05	1.50	3.30	0.50	2.20	1.25	0.95	0.10	22.24	4.42	3.55
		FB30ADN/18	0.60	0.45	0.05	1.50	3.30	0.50	2.20	1.43	1.07	0.10	22.24	4.42	3.55
		FB30ADN/21	0.60	0.45	0.05	1.60	3.30	0.50	2.30	1.61	1.19	0.10	24.77	4.90	3.85
		FB30ADN/24	0.60	0.45	0.05	1.60	3.30	0.50	2.30	1.79	1.31	0.10	24.77	4.90	3.85
		FB30ADN/27	0.60	0.45	0.05	1.60	3.30	0.50	2.40	1.97	1.43	0.10	25.84	5.10	3.94
		FB30ADN/30	0.60	0.45	0.05	1.60	3.30	0.50	2.60	2.15	1.55	0.10	27.98	5.51	4.14
		FB30ADN/33	0.60	0.45	0.05	1.70	3.30	0.55	2.60	2.33	1.67	0.10	29.70	5.84	4.26
1600	25	FB30ADN/15	0.60	0.45	0.05	1.50	3.30	0.50	2.20	1.25	0.95	0.10	22.24	4.42	3.55
		FB30ADN/18	0.60	0.45	0.05	1.50	3.30	0.50	2.20	1.43	1.07	0.10	22.24	4.42	3.55
		FB30ADN/21	0.60	0.45	0.05	1.60	3.30	0.50	2.30	1.61	1.19	0.10	24.77	4.90	3.85
		FB30ADN/24	0.60	0.45	0.05	1.60	3.30	0.50	2.30	1.79	1.31	0.10	24.77	4.90	3.85
		FB30ADN/27	0.60	0.45	0.05	1.80	3.30	0.50	2.40	1.97	1.43	0.10	29.03	5.70	4.38
		FB30ADN/30	0.60	0.45	0.05	1.80	3.30	0.50	2.60	2.15	1.55	0.10	31.43	6.16	4.61
		FB30ADN/33	0.60	0.45	0.05	1.80	3.30	0.55	2.60	2.33	1.67	0.10	31.43	6.16	4.49
1600	20	FB30ADN/15	0.60	0.45	0.05	1.50	3.55	0.50	2.20	1.25	0.95	0.10	23.89	4.42	3.71
		FB30ADN/18	0.60	0.45	0.05	1.50	3.55	0.50	2.20	1.43	1.07	0.10	23.89	4.42	3.71
		FB30ADN/21	0.60	0.45	0.05	1.80	3.55	0.50	2.30	1.61	1.19	0.10	29.90	5.48	4.42
		FB30ADN/24	0.60	0.45	0.05	1.80	3.55	0.50	2.50	1.79	1.31	0.10	32.48	5.93	4.65
		FB30ADN/27	0.60	0.45	0.05	1.90	3.55	0.50	2.50	1.97	1.43	0.10	34.27	6.24	4.88
		FB30ADN/30	0.60	0.45	0.05	1.90	3.55	0.50	2.70	2.15	1.55	0.10	36.99	6.72	5.13
		FB30ADN/33	0.60	0.45	0.05	1.90	3.55	0.55	2.70	2.33	1.67	0.10	36.99	6.72	5.01
1600	15	FB30ADN/15	0.60	0.45	0.05	1.70	3.95	0.50	2.10	1.25	0.95	0.10	28.68	4.76	4.25
		FB30ADN/18	0.60	0.45	0.05	1.80	3.95	0.50	2.30	1.43	1.07	0.10	33.21	5.48	4.68
		FB30ADN/21	0.60	0.45	0.05	1.90	3.95	0.50	2.40	1.61	1.19	0.10	36.56	6.00	5.01
		FB30ADN/24	0.60	0.45	0.05	1.90	3.95	0.50	2.60	1.79	1.31	0.10	39.58	6.48	5.26
		FB30ADN/27	0.60	0.45	0.05	1.90	3.95	0.50	2.80	1.97	1.43	0.10	42.61	6.96	5.51
		FB30ADN/30	0.60	0.45	0.05	1.90	3.95	0.50	2.80	2.15	1.55	0.10	42.61	6.96	5.51
		FB30ADN/33	0.60	0.45	0.05	2.00	3.95	0.55	2.90	2.33	1.67	0.10	46.42	7.56	5.77

[*] O ângulo β é o ângulo definido no quadro 5.1 do RSLEAT (artigo 74º).

[**] Betão do tipo C20/25.

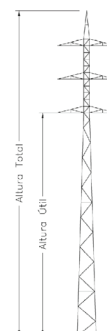
POSTE TIPO FB165ADN



CARACTERÍSTICAS

REF. ^a POSTE	ALTURA TOTAL [m]	ALTURA ÚTIL [m]	PESO APROXIMADO DO APOIO (NÃO INCLUI BASE) [kg] (*)	PESO APROXIMADO DA BASE [kg] (**)			
				TIPO DE SOLO (β)			
				30°	25°	20°	15°
FB165ADN15	17.8	15.6	5112	959	967	993	1063
FB165ADN18	20.8	18.6	5877	962	971	997	1067
FB165ADN21	23.8	21.6	6831	1039	1049	1078	1156
FB165ADN24	26.8	24.6	7927	1045	1055	1084	1171
FB165ADN27	29.8	27.6	9023	1035	1045	1074	1162
FB165ADN30	32.8	30.6	10374	1049	1059	1088	1176
FB165ADN33	35.8	33.6	11669	1049	1059	1088	1176

(*) Peso teórico. Inclui consolas, parafusos e galvanização.
(**) Peso teórico. Inclui parafusos.



UTILIZAÇÃO (ZONA A) - CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO

ALTURA [m]	CABOS A UTILIZAR		VÃOS [m]		ÂNGULOS [grados]	FUNÇÃO DE APOIO
	C. DE GUARDA	CONDUTOR	VENTO	GRAVÍTICO		
33	ACSR 130	ACSR 160	176	350	-	Fim de linha
27			210			
33	ACSR 130	ACSR 325	310	600	45	Reforço em ângulo
27			370			

QUADRO DE ACÇÕES SEGUNDO A EN 50341-3-17 [N]

ALTURA (m)	CABOS	CASO DE CARGA	VENTO	Ft0	Fv0	FI0	Ft1 Ft2	Fv1 Fv2	FI1 FI2	Ft3 Ft4	Fv3 Fv4	FI3 FI4	Ft5 Ft6	Fv5 Fv6	FI5 FI6
33	ACSR 130 + ACSR 160	1a	Transv.	2319	2020	21840	2558	2230	20160	2486	2230	20160	2410	2230	20160
							2558	2230	20160	2486	2230	20160	2410	2230	20160
		5a Rot. C. Gua.	S/vento	0	1019	0	0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		5a Rot. C. Sup.	S/vento	0	2020	21840	0	1290	0	0	2230	20160	0	2230	20160
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		5a Rot. C. Med.	S/vento	0	2020	21840	0	2230	20160	0	1290	0	0	2230	20160
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		5a Rot. C. Inf.	S/vento	0	2020	21840	0	2230	20160	0	2230	20160	0	1290	0
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		1a	Long.	0	2020	15870	0	2230	15083	0	2230	15333	0	2230	15593
							0	2230	15083	0	2230	15333	0	2230	15593
27	ACSR 130 + ACSR 160	1a	Transv.	2601	2021	21840	2807	2230	20160	2713	2230	20160	2713	2230	20160
							2807	2230	20160	2713	2230	20160	2713	2230	20160
		5a Rot. C. Gua.	S/vento	0	1010	0	0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		5a Rot. C. Sup.	S/vento	0	2021	21840	0	1290	0	0	2230	20160	0	2230	20160
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		5a Rot. C. Med.	S/vento	0	2021	21840	0	2230	20160	0	1290	0	0	2230	20160
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		5a Rot. C. Inf.	S/vento	0	2021	21840	0	2230	20160	0	2230	20160	0	1290	0
							0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		1a	Long.	0	2021	15400	0	2230	14777	0	2230	15069	0	2230	15378
							0	2230	14777	0	2230	15069	0	2230	15378

QUADRO DE ACÇÕES SEGUNDO A EN 50341-3-17 [N]

ALTURA (m)	CABOS	CASO DE CARGA	VENTO	Ft0	Fv0	Ft0	Ft1 Ft2	Fv1 Fv2	FL1 FL2	Ft3 Ft4	Fv3 Fv4	FL3 FL4	Ft5 Ft6	Fv5 Fv6	FL5 FL6
33	ACSR 130 + ACSR 325	1a	Transv.	1874	3464	0	33986	7839	0	33826	"7839	"0	"33659	"7839	"0
							33986	7839	0	33826	7839"	0"	33659"	7839"	0"
		5b	S/vento	2700	3464	7318	5062	7839	13721	5062	"7839	"13721	"5062	"7839	"13721
							5062	7839	13721"	5062	7839"	13721"	5062"	7839"	13721"
		5a Rot. C. Gua. Lado A	S/vento	5933	1732	14636	28347	7839	"0	28347	"7839	"0	"28347	"7839	"0
							28347	7839	0"	28347	7839"	0"	28347"	7839"	0"
		5a Rot. C. Sup. Lado A	S/vento	15118	3464	0	10124	6055	27442	28347	"7839	"0	"28347	"7839	"0
							28347	7839	0	28347"	7839"	0"	28347"	7839"	0"
		5a Rot. C. Med. Lado A	S/vento	15118	3464	0	28347	7839	0	"28347	"7839	"0	"28347	"7839	"0
							28347	7839	0	10124"	6055"	27442"	28347"	7839"	0"
		5a Rot. C. Inf. Lado A	S/vento	15118	3464	0	28347	7839	0	"28347	"7839	"0	"28347	"7839	"0
							28347	7839	0	28347"	7839"	0"	10124"	6055"	27442"
		5a Rot. C. Gua. Lado B	S/vento	5399	1732	-14636	28347	7839	0	"28347	"7839	"0	"28347	"7839	"0
							28347	7839	0	28347"	7839"	0"	28347"	7839"	0"
		5a Rot. C. Sup. Lado B	S/vento	15118	3464	0	28347	7839	0	"28347	"7839	"0	"28347	"7839	"0
							10124	6055"	27442	28347"	7839"	0"	28347"	7839"	0"
		5a Rot. C. Med. Lado B	S/vento	15118	3464	0	28347	"7839	0	10124	6055	27442	28347	"7839	"0
							28347	7839"	0	28347	7839	0	28347	7839"	0"
		5a Rot. C. Inf. Lado B	S/vento	15118	3464	0	28347	"7839	0	28347	7839	0	"10124	"6055	"27442
							28347	7839"	0	28347	7839	0	28347"	7839"	0"
		1a	Long.	9010	3464	596	21041	7839	1270	21347	7839	1234	"21667	"7839	"1196
							21041	7839	1270	21347	7839	1234	21667"	7839"	1196"
27	ACSR 130 + ACSR 325	1a	Transv.	19152	3465	0	"34546	"7841	"0	"34338	"7841	"0	"34118	"7841	"0
							34546"	7841"	0"	34338"	7841"	0"	34118"	7841"	0"
		5b	S/vento	2700	3465	7318	"5062	"7841	"13721	"5062	"7841	"13721	"5062	"7841	"13721
							5062"	7841"	13721"	5062"	7841"	13721"	5062"	7841"	13721"
		5a Rot. C. Gua. Lado A	S/vento	5399	1732	14636	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0
							28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"
		5a Rot. C. Sup. Lado A	S/vento	15118	3465	0	"10124	"6056	"27442	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0
							28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"
		5a Rot. C. Med. Lado A	S/vento	15118	3465	0	"28347	"7841	"0	"10124	"6056	"27442	"28347	"7841	"0
							28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"
		5a Rot. C. Inf. Lado A	S/vento	15118	3465	0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0
							28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"	10124"	6056"	27442"
		5a Rot. C. Gua. Lado B	S/vento	5399	1732	-14636	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0
							28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"
		5a Rot. C. Sup. Lado B	S/vento	15118	3465	0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0
							10124"	6056"	27442"	28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"
		5a Rot. C. Med. Lado B	S/vento	15118	3465	0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0
							28347"	7841"	0"	10124"	6056"	27442"	28347"	7841"	0"
		5a Rot. C. Inf. Lado B	S/vento	15118	3465	0	"28347	"7841	"0	"28347	"7841	"0	"10124	"6056	"27442
							28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"	28347"	7841"	0"
		1a	Long.	19152	3465	0	"34546	"7841	"0	"34338	"7841	"0	"34118	"7841	"0
							34546"	7841"	0"	34338"	7841"	0"	34118"	7841"	0"

POSTE TIPO FB165ADN

FUNDAÇÕES - VISTA FRONTAL/LATERAL

TERRENO		APOIO	a [m]	b [m]	c [m]	d [m]	e [m]	h [m]	ht [m]	l [m]	l1 [m]	u [m]	VOLUMES POR APOIO	
PESO	ÂNGULO B (*)												ESCAV. [m3]	BETÃO (**) [m3]
daN/m³	GRAUS													
1600	30	FB95ADN/15	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.70	1.00	0.10	35.245	8.221
		FB95ADN/18	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.70	1.00	0.10	35.245	8.221
		FB95ADN/21	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.70	1.00	0.10	35.245	8.221
		FB95ADN/24	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.70	1.00	0.10	35.245	8.221
		FB95ADN/27	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.70	1.00	0.10	35.245	8.221
		FB95ADN/30	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.70	1.00	0.10	35.245	8.221
		FB95ADN/33	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.70	1.00	0.10	35.245	8.221
1600	25	FB95ADN/15	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.80	1.10	0.10	39.477	9.107
		FB95ADN/18	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.80	1.10	0.10	39.477	9.107
		FB95ADN/21	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.80	1.10	0.10	39.477	9.107
		FB95ADN/24	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.80	1.10	0.10	39.477	9.107
		FB95ADN/27	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.80	1.10	0.10	39.477	9.107
		FB95ADN/30	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.25	3.30	1.80	1.10	0.10	39.477	9.107
		FB95ADN/33	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.30	3.35	1.85	1.15	0.10	42.368	9.605
1600	20	FB95ADN/15	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.45	3.50	1.90	1.20	0.10	46.837	10.181
		FB95ADN/18	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.45	3.50	1.90	1.20	0.10	46.837	10.181
		FB95ADN/21	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.45	3.50	1.90	1.20	0.10	46.837	10.181
		FB95ADN/24	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.45	3.50	1.90	1.20	0.10	46.837	10.181
		FB95ADN/27	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.50	3.55	1.95	1.25	0.10	50.078	10.709
		FB95ADN/30	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.50	3.55	1.95	1.25	0.10	50.078	10.709
		FB95ADN/33	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.55	3.60	1.95	1.25	0.10	50.838	10.741
1600	15	FB95ADN/15	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.85	3.90	1.90	1.20	0.10	52.613	10.437
		FB95ADN/18	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.85	3.90	1.90	1.20	0.10	52.613	10.437
		FB95ADN/21	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.85	3.90	2.10	1.30	0.10	64.197	12.131
		FB95ADN/24	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.85	3.90	2.10	1.30	0.10	64.197	12.131
		FB95ADN/27	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.85	3.90	2.10	1.30	0.10	64.197	12.131
		FB95ADN/30	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.85	3.90	2.10	1.30	0.10	64.197	12.131
		FB95ADN/33	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.85	3.90	2.10	1.30	0.10	64.197	12.131

[*] O ângulo B é o ângulo definido no quadro 5.1 do RSLEAT (artigo 74º).
 [**] Betão do tipo C20/25.