

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**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 PROVISÓRIA

Dissertação de Projeto realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Hélder Filipe Duarte Leite
Coorientador: Eng. Rui Filipe da Silva Mendes da Cunha

janeiro, 2016

© Rui Póvoas de Almeida, 2016

Resumo

O presente documento apresenta o projeto final do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - especialização em Energia - cuja elaboração foi realizada em regime de estágio, no Departamento Técnico & Inovação e Desenvolvimento da empresa Irmãos Silva, S.A - Metalgalva, localizada no distrito do Porto, no concelho da Trofa.

Este relatório 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 que foi utilizado transversalmente durante toda a elaboração do projeto.

A realização do projeto compreende 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, pela que se designa EN 50341-3-17.

A linha aérea projetada para o estudo, é uma linha dupla de 60 kV que faz a ligação entre a subestação de Fafe e uma nova subestação da REN, pertencente ao mesmo concelho.

O documento contempla cinco intitulados capítulos. No capítulo introdutório são expostas as motivações para a escolha do tema, a sua descrição e objetivos.

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 as bases teóricas e os aspetos normativos inerentes a projetos de linhas aéreas de alta tensão, fazendo a ponte para o terceiro capítulo, onde está detalhada a memória descritiva e justificativa do projeto.

No capítulo seguinte é realizada uma introdução ao *software* PLS-CADD e à sua competência enquanto instrumento para a concretização do objetivo proposto.

Por fim, são apresentadas a análise técnico económica, as conclusões e desafios futuros.

Página em branco

Abstract

The present document, entitled “Otimização da Metodologia de Projeto de Linhas Aéreas de Alta-Tensão com Modelização do Traçado Real em 3D” presents the final project of the Integrated Master Course in Electrical and Computers Engineering - Energy. This work was developed during an internship on the Technical & Innovation and Development Department of the “Irmãos Silva, S.A - Metalogalva” company, based on Trofa, Porto.

This work studies the application and adaptation, using the PLS-CADD, of the European norm EN 50341-1 “Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - General requirements - Common specifications” to the Portuguese reality, fulfilling the EN 50341-3-17 Portuguese normatives. The study case considered was a 60 kV double power line, which connects the Fafe and new REN substations.

The document is divided into five chapters. Chapter 1 exposes the research motivation to undertake this study, the problem description and goal of the project. Also, the EN 50341-1 norm is described, in the scope of both national and international realities. Chapter 2 describes the theory and normative aspects behind high tension power lines and introduces the descriptive memory, detailed on Chapter 3. Chapter 4 describes the PLS-CADD tool. Finally, the document ends with a technical and economical analysis, conclusions and future work.

Página em branco

Página em branco

Índice

Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Lista de figuras.....	xi
Lista de tabelas.....	xii
Abreviaturas e Símbolos.....	xiii
Glossário.....	xiv
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 - Descrição e Objetivo do Projeto.....	1
1.2 - Introdução da Norma Europeia EN 50341-1.....	2
Capítulo 2.....	4
Linhas Aéreas de Alta Tensão - Considerações Gerais.....	4
2.1 - Elementos Constituintes das Linhas.....	4
2.1.1. Condutores.....	5
2.1.2. Cabo de Guarda.....	6
2.1.3. Disposição dos condutores.....	7
2.1.4. Cadeias de isoladores.....	8
2.2 - Efeito de Coroa.....	13
2.1.5. Apoios.....	14
2.3 - Sistemas de Terras.....	16
2.1 - Fundações.....	19
2.2 - Fiabilidade das Linhas Aéreas.....	21
2.3 - Cálculo Elétrico.....	22
2.4.1. Resistência.....	22
2.4.2. Intensidade de Corrente de Serviço.....	22
2.4.3. Densidade de Corrente.....	23
2.4.4. Perdas de Energia.....	23
2.4.5. Queda de Tensão.....	24
2.4.6. Distância Equivalente entre os Condutores.....	25
2.4.7. Coeficiente de Autoindução.....	25
2.4.8. Reatância.....	26
2.4.9. Capacidade.....	26
2.4.10. Susceptância.....	27
2.4.11. Condutância.....	27
2.4.12. Admitância.....	28
2.4.13. Impedância.....	28
2.4.14. Impedância Caraterística.....	28
2.4.15. Ângulo Caraterístico.....	29

2.4 - Cálculo Mecânico	29
2.4.1. Objetivos.....	29
2.4.2. Tensão Mecânica Máxima.....	30
2.4.3. Ações dos agentes externos sobre as Linhas	31
2.4.4. Ação do Vento.....	31
2.4.5. Velocidade e Pressão Dinâmica do Vento.....	31
2.4.6. Forças do Vento sobre os Elementos da Linha	33
2.4.6.1. Forças do Vento sobre os Condutores	34
2.1.1.1. Forças do Vento sobre os Isoladores.....	34
2.4.2. Ação do Gelo	34
2.4.3. Ação da Variação da Temperatura.....	35
2.4.4. Temperatura Mínima e Máxima de Projeto.....	35
2.4.5. Estados Atmosféricos	35
2.4.6. Curva Caraterística dos Condutores Suspensos	36
2.4.7. Aproximação Parabólica	37
2.4.8. Coeficientes de Sobrecarga	38
2.4.9. Equação dos Estados	39
2.4.10. Cantão e Vão Equivalente Fictício	40
2.4.11. Geometria das Linhas	41
2.4.12. EDS (every-day-stress)	41
2.4.13. Vãos Desnivelados	42
2.4.14. Vãos em Patamar	43
2.4.15. Apoio Enforcado	43
2.4.16. Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores.....	44
2.4.17. Distâncias de Isolamento	45
2.4.18. Distâncias Mínimas Regulamentares	46
2.4.19. Casos de carga normalizados	48
2.1.1.1. Apoios de Alinhamento (T).....	49
2.1.1.1. Apoios de Ângulo (A).....	50
2.1.1.1. Apoios Fim de Linha (DE).....	51
2.1.1.1. Apoios de Reforço em Alinhamento (RT)	52
2.1.1.1. Apoios de Reforço de Ângulo (RA)	53
Capítulo 3.....	55
Projeto linha Fafe - Fafe (REN) - Memória descritiva e justificativa	55
3.1 - Objetivo.....	55
3.2 - Regulamentação	55
3.3 - Caraterísticas da linha.....	55
3.4 - Cálculo Elétrico	56
3.4.1. Caraterísticas dos Cabos.....	56
3.4.2. Resistência.....	56
3.4.3. Corrente de Serviço	57
3.4.4. Densidade de Corrente	57
3.4.5. Perdas de Energia	58
3.4.6. Distância Equivalente entre os Condutores.....	59
3.4.7. Coeficiente de Autoindução	59
3.4.8. Reatância	60
3.4.9. Queda de Tensão	61
3.4.10. Capacidade	61
3.4.11. Susceptância	62

3.4.12.	Condutância	62
3.4.13.	Admitância	63
3.4.14.	Impedância	63
3.4.15.	Impedância Característica.....	63
3.4.2.	Isoladores	64
3.5 -	Cálculo Mecânico	64
3.4.1.	Tensões Mecânicas Máximas	64
3.4.2.	Coefficientes de Sobrecarga	65
3.4.3.	Parâmetro da Catenária e Flecha Máxima	66
3.4.4.	Apoios	69
3.4.5.	Verificação da Estabilidade dos Apoios	69
3.5.1.1.	Apoio Fim de Linha (DE)	69
2.1.1.2.	Apoios de Reforço em Alinhamento (RT)	70
2.1.1.2.	Apoios de Reforço de Ângulo (RA)	71
Capítulo 4.....	73	
Conclusões e Desafios	73	
4.1 - Conclusões Gerais	73	
4.2 - Desafios	74	
Referências	75	
Anexos	76	

Lista de figuras

Figure 1 - Cabo A.C.S.R (<i>Aluminium Cable Steel Reinforced</i>)	6
Figure 2 - Cabo OPGW (<i>Optical Ground Wire</i>).....	7
Figure 3 - Tipos de isoladores.....	8
Figure 4 - Cadeia de isoladores em suspensão	9
Figure 5 - Cadeia de isoladores em amarração.....	9
Figure 6 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em suspensão	10
Figure 7 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em amarração	10
Figure 8 - Apoio enforcado	10
Figure 9 - Tipos de apoios, vista de topo	15
Figure 10 - Vista de topo de um apoio.....	16
Figure 11 - Sistema de terra apoio de betão	17
Figure 12 - Sistema de terra apoio metálico	17
Figure 13 - Catenária, flecha e vão formado entre os apoios A e B.....	37
Figure 14 - Vão em desnível.....	42
Figure 15 - Vão em patamar	43
Figure 16 - Apoio enforcado.....	44

Lista de tabelas

Table 1 - Linha de fuga específica mínima em função do nível de poluição da região de implementação da linha.....	11
Table 2 - Fatores parciais e fatores de combinação.....	21
Table 3 - Distâncias externas admissíveis.....	47
Table 4 - Casos de carga normalizados.....	48

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

CSA	Coeficiente de Sobre-Amostragem
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CN	National Committee
IPQ	Instituto Português da Qualidade
NNA's	National Normatives Aspects
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
PLS-CADD	<i>Power Load System Computer Aided Design</i>

Lista de símbolos

ω	Frequência angular
α	Ângulo
α	Coeficiente de forma [sem unidades]
α_d	Coeficiente de dilatação térmica do cabo [$^{\circ}$ C]
β	Ângulo que a direção do vento faz com a linha [graus]
B	Valor total da susceptância por fase da linha [S]
Ψ	
c	coeficiente de forma [sem unidades]
ϕ	
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]

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;

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

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

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

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.

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Descrição e Objetivo do Projeto

O presente documento apresenta o projeto final do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, com especialização em Energia, cuja elaboração foi realizada em regime de estágio, no Departamento Técnico & Inovação e Desenvolvimento da empresa Irmãos Silva, S.A - Metalgalva, localizada no distrito do Porto, no concelho da Trofa.

A Metalgalva é uma empresa que se tem destacado nacionalmente por se constituir como um dos principais fornecedores de estruturas metálicas para as linhas de transporte e distribuição de energia. Paralelamente, tem feito uma aposta considerável no aumento da sua capacidade de resposta ao nível de projeto e é neste contexto que é criada a oportunidade para a realização do presente projeto que tem como objetivo 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*.

Por conseguinte, foi selecionada (ou projetada???) uma linha aérea dupla de 60 kV que faz a ligação entre a subestação de Fafe e uma nova subestação da REN, pertencente ao mesmo concelho.

O desenvolvimento deste projeto teve em consideração a conformidade do mesmo com a norma europeia EN 50341-1 intitulada “Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - General requirements - Common specifications” e a sua

2 Introdução

adaptação ao contexto nacional, cumprindo com os aspetos normativos para Portugal, a qual se apresentou como um outro desígnio a cumprir.

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. Esta componente de aprendizagem e comparação, estimulou em larga medida a minha apetência para a concretização deste trabalho.

O estudo e compreensão do software PLS-CADD foi igualmente desafiante e gratificante na mesma proporção, pois revelou ser uma ferramenta plena para o projeto.

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 - Introdução da Norma Europeia 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.

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.

O documento está organizado em três grandes partes, sendo que a primeira designa-se *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

¹ Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão.

² Comité Européen de Normalisation Electrotechnique.

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/TC 11.

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

Capítulo 2

Linhas Aéreas de Alta Tensão - Considerações Gerais

2.1 - 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.

2.1.1. 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, conclui-se que a sua utilização não se justifica, exceto em circunstâncias em que seja efetivamente aconselhado o seu uso, como em zonas muito urbanizadas.

Nas linhas aéreas de alta tensão são utilizados condutores multifilares 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 seção inferior e uma melhor resistência mecânica, pois são mais flexíveis que os unifilares.

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

Os condutores podem ser descritos diferentes formas tal como é exposto de seguida.

- Condutor isolado - condutor que é revestido por uma ou várias camadas isolantes;
- Condutor nu - condutor sem isolamento exterior;
- Condutor multifilar - condutor constituído por vários fios 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.

Atualmente o 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 contribui para uma maior resistência mecânica do cabo.

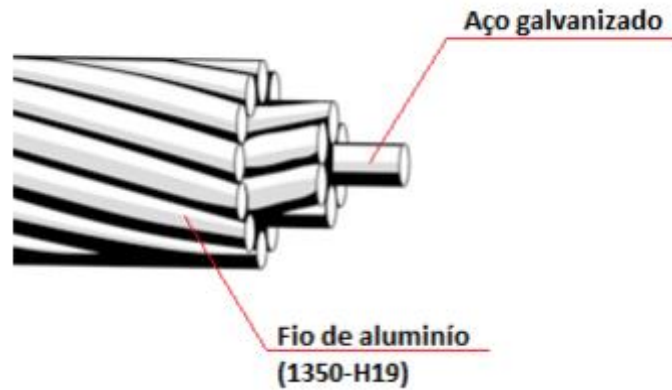


Figure 1 - Cabo A.C.S.R (*Aluminium Cable Steel Reinforced*)

2.1.2. Cabo de Guarda

A principal função dos cabos de guarda numa linha aérea de alta tensão é interceptar uma possível descarga atmosférica, impedindo-a que atinja diretamente os condutores, que na maioria dos casos dará origem a contornamentos e subsequentes curto-circuitos, reduzindo assim a possibilidade de ocorrência de interrupções no fornecimento de energia elétrica [3]. Ao serem atingidos por uma descarga atmosférica, têm a capacidade de escoar a onda de corrente através dos elétrodos de terra presentes nos sistemas de terra de cada apoio. Os cabos de guarda também são vistos como meio de comunicação (voz, dados) com subestações ou outra qualquer estação automatizada, sendo nestes casos necessário que possuam um cabo de fibra ótica no seu interior.

Além destas funções, os cabos de guarda contribuem para a redução da indução (na ordem dos 15% a 25%) em circuitos de telecomunicações presentes na vizinhança da linha.

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.

Os cabos de guarda são estabelecidos na parte mais alta dos apoios e ligados à terra através desses apoios, de acordo com as seguintes recomendações:

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 mostra a figura. Se a linha for composta por dois cabos de guarda, são

estabelecidos por forma a que cada um dos condutores fique relativamente a algum dos cabos de guarda, nas condições supra mencionadas.

Os cabos de guarda normalmente implementado é o A.C.S.R (*Aluminium Cable Steel Reinforced*)[7]. Quando pretendemos adicionar a capacidade de comunicação teremos de optar por um cabo do tipo OPGW (*Optical 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 que se segue.



Figure 2 - Cabo OPGW (*Optical Ground Wire*)

2.1.3. Disposição dos condutores

Os condutores podem ser dispostos em posições:

- Esteira vertical
- Esteira vertical dupla
- Galhardete

A esteira vertical é utilizada em linhas com circuito simples.

A esteira vertical dupla é utilizada em linhas de circuito duplo.

A disposição dos condutores em galhardete é utilizado em circuito simples.

2.1.4. Cadeias de isoladores

Os isoladores têm como função evitar a passagem de corrente elétrica dos condutores para os apoios e suportar mecanicamente os cabos. 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 cuidadoso.

Quanto ao tipo de isolador, este poderá ser um isolador rígido ou uma cadeia de isoladores. A Figura 3 representa de forma esquemática estes dois tipos de isoladores.

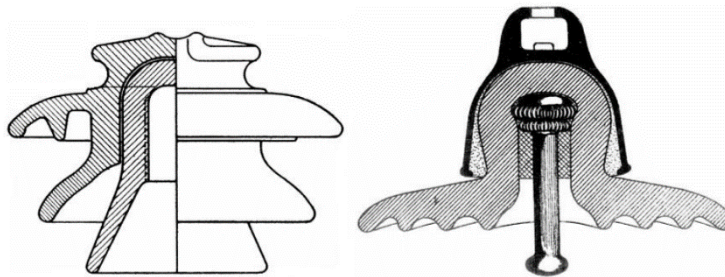


Figure 3 - Tipos de isoladores

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 [8] [3]. 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 [33].

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 acentuados, 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 cadeiras quando comparado com as de suspensão.

As Figuras 4,5,6 e 7 ilustram os dois tipos de cadeias de isoladores, as cadeias de suspensão e as cadeias de amarração.

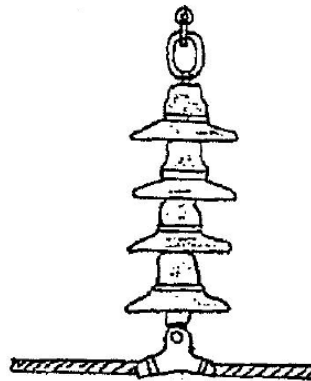


Figure 4 - Cadeia de isoladores em suspensão

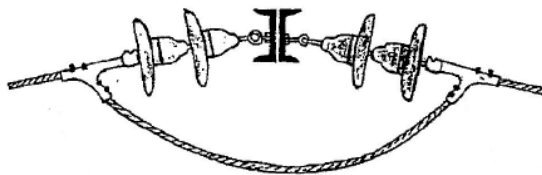


Figure 5 - Cadeia de isoladores em amarração



Figure 6 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em suspensão

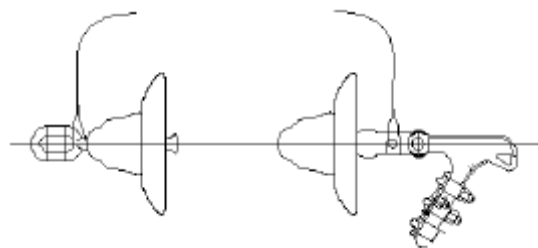


Figure 7 - Hastes de descarga utilizadas em isoladores em amarração

No entanto existem situações em que é necessário utilizar cadeias de amarração em apoios de alinhamento. Uma dessas situações é quando se está na presença de locais com declive bastante acentuado, podendo 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 8 ilustra um exemplo de um apoio enforcado.

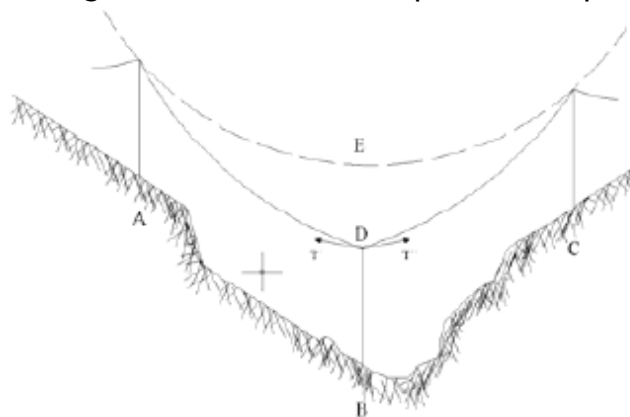


Figure 8 - Apoio enforcado

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 rutura mecânica pelo menos igual à tração de rutura dos condutores.

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 pelos menos em 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:

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

em que U_m é a tensão mais elevada.

O peso da cadeia de isoladores depende do número de elemento 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.

Table 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

12 Introdução

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:

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

De seguida, são apresentados alguns incidentes que poderão decorrer de um mau dimensionamento ou de deficiente manutenção [5]:

- 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 - Efeito de Coroa

Se os condutores de uma linha elétrica atingem um potencial suficientemente grande que passe a correspondente rigidez dielétrica do ar produzem-se perdas de energia devido à corrente que se forma no meio. O ar torna-se num condutor, dando lugar a uma corrente de fuga análoga à produzida pela condutância do isolador.

O fenómeno conhecido como efeito de coroa é visível na escuridão da noite, os condutores vêm-se envolvidos num arco luminoso azulado, de seção transversal circular em forma de coroa, nesta fase significa que a tensão crítica visível foi alcançada.

As perdas por efeito de coroa começam a produzir-se desde que a tensão crítica disruptiva seja menor que a tensão da linha, momento em que se dá a ruptura do dielétrico em causa, ar.

É de salientar que a tensão crítica disruptiva é tem menor valor que a tensão crítica visível.

A fórmula geral da tensão crítica disruptiva deve-se ao Engenheiro americano Peek, e é a seguinte:

$$U_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} * \sqrt{3} * m_c * \delta * m_t * r * n * \log \frac{D}{r'} [kV] \quad (2.4)$$

Onde:

29,8 - Valor em quilovolts por centímetro, da rigidez dielétrica do ar a 25 °C de temperatura e a pressão barométrica de 76 cm de mercúrio. Para que seja possível operar com valores eficazes, é preciso dividi-lo por $\sqrt{2}$.

U_c - Tensão composta crítica eficaz em kilovolts, ou tensão crítica disruptiva;

m_c - Coeficiente de rugosidade do condutor, m_c [0,83; 0,87] para cabos;

m_t - Coeficiente que mede o efeito da chuva, com valor de 1 com tempo seco e 0,8 com tempo chuvoso;

r - Raio do condutor [cm];

n - Número de condutores de cada fase;

D - Distância entre os centros da fase [cm];

r' - Raio fictício [cm];

δ - Fator de correção da densidade do ar;

2.1.5. 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.

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 às 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 e que desde o início dos anos 70 e em especial nos EUA, 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. Este tipo de apoios são definidos pelas seguintes características:

Apoios reticulados: Apoios que podem ser transportados em módulos, facilitando o seu transporte e são montados no local de implantação, no entanto apresentam bases de grandes dimensões e preços elevados.

Apoios tubulares: Apoios que podem ser transportados em módulos, facilitando o seu transporte e são montados no local de implantação, apresentam secções bastante reduzidas, necessitando de um menor espaço

para implantação e por estes motivos têm maior aceitação por parte dos proprietários dos terrenos. Do ponto de vista económico têm preços elevados.

Apoios de betão: Apoios que necessitam de pouco espaço de implantação, economicamente apresentam preços reduzidos, no entanto em terrenos sinuosos e de difícil acesso, trazem imensas dificuldades no que diz respeito ao transporte, por não serem desmontáveis.

A altura dos apoios é variável, conforme a topografia do terreno e os obstáculos que a linha tem que atravessar. Numa linha aérea existem vários tipos de apoios com diferentes funções [6]:

- Apoio de ângulo - apoio situado num ângulo da linha;
- Apoio de derivação - apoio onde se estabelece uma ou mais derivações da linha;
- Apoio de fim de linha - 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 reforço - apoio que suporta esforços ao ponto de ser capaz de reduzir as consequências negativas em caso de rutura de um cabo ou condutor;
- Apoio de travessia ou cruzamento - apoio que limita um vão ou cruzamento. Utilizados para fazer cruzamentos de linhas.

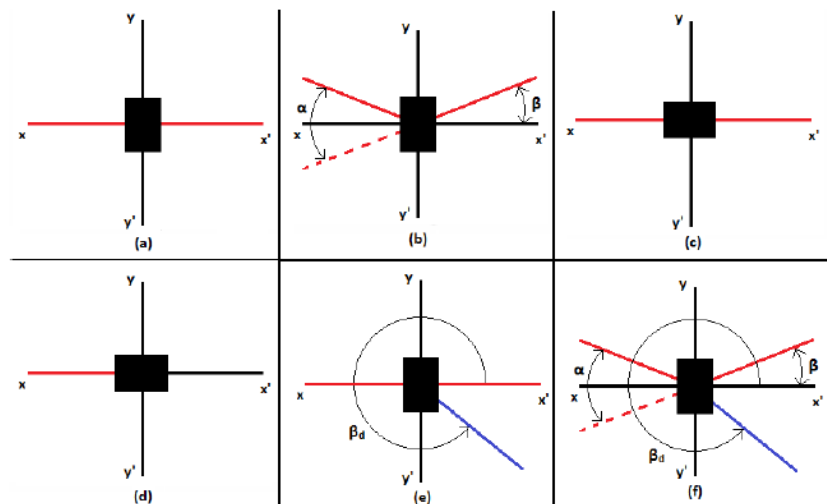


Figure 9 - Tipos de apoios, vista de topo

Os apoios são sujeitos a esforços verticais (F_z), longitudinais (F_x) e transversais (F_y).

Os esforços verticais advêm do peso da cadeia de isoladores e do peso dos condutores, se se encontrar numa zona propícia a gelo têm de suportar o peso

relativa à manga de gelo que se forma em volta do condutor. Os esforços longitudinais correspondem às tensões exercidas pelos condutores e cabos de guarda quando estes estamos perante vãos adjacentes com comprimentos desiguais ou quando se trata de uma situação de apoio fim de linha. Já os esforços transversais estão relacionados com a ação do vento sobre os condutores, isoladores e cabos de guarda, no seu pior caso, quando o vento é normal à linha ou quando se trata de um apoio de ângulo.

A Figura 10 representa os três tipos de esforços que os apoios estão sujeitos [11].

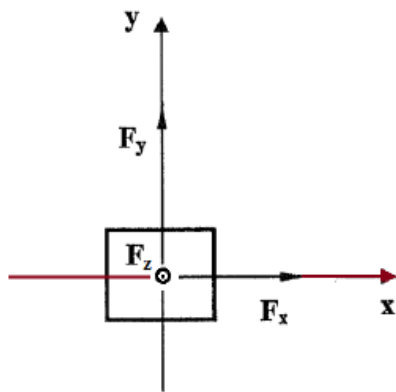


Figure 10 - Vista de topo de um apoio.

2.3 - Sistemas de Terras

A ligação à terra dos sistemas elétricos tem como objetivo garantir a segurança de pessoas, equipamentos e instalações, consistindo na criação de um ponto comum e de referência entre as partes eletricamente condutoras e a terra.

Para prevenir ocorrências que não garantam a segurança dos elementos descritos, será necessário projetar as ligações à terra eficazes e que assegurem, por um lado, que as pessoas que estejam nas proximidades de instalações elétricas não sejam expostas a tensões de passo e de contacto superiores aos máximos admissíveis face à temporização das proteções existentes e ao valor presumível de resistividade média do terreno onde se encontra a instalação, e por outro lado que escoem para a terra em circunstâncias normais correntes elétricas, sem afetar os equipamentos ou a continuidade de serviço.

Nas linhas aéreas AT, todos os elementos metálicos (normalmente fora de tensão) necessários ao suporte dos condutores e ao seccionamento e proteção das linhas, têm de ser ligadas à terra.

Tratando-se de apoios de betão armado, os suportes metálicos dos isoladores devem ser ligados a terra do próprio apoio. Devem ainda ser ligados a terra dos apoios, as estruturas metálicas dos aparelhos de corte ou de manobra. Esta ligação é assegurada interligando-se o terminal de terra existente na parte inferior do apoio com o eléctrodo de terra, através de cabo de cobre nu. Os postes metálicos devem ser ligados à terra, interligando-se os terminais de terra existentes em cada um dos montantes aos eléctrodos de terra, e interligando-os entre si. Na base do apoio, deverá ainda existir, uma malha ou plataforma equipotencial colocada por debaixo do punho de comando da aparelhagem de corte ou de manobra. Em zonas públicas ou frequentadas, o valor da resistência de terra não deve exceder 20 Ohm [12].

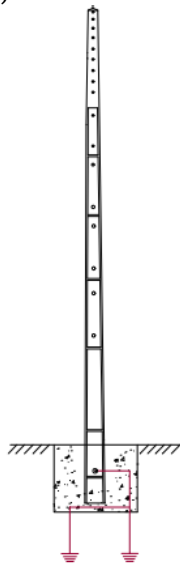


Figure 11 - Sistema de terra apoio de betão

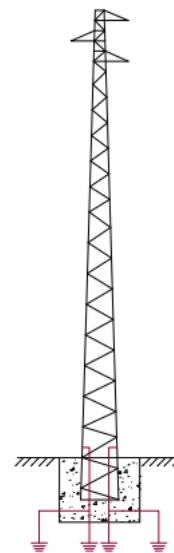


Figure 12 - Sistema de terra apoio metálico

a) Eléctrodos de Terra

Os sistemas de terra são constituídos por um (ou vários) eléctrodo(s) de terra enterrado(s), e por condutores de terra, que ligam os eléctrodos aos respetivos equipamentos e instalações AT da EDP Distribuição.

Os eléctrodos de terra são constituídos por materiais metálicos enterrados no solo, podendo estes ser em cobre, aço galvanizado, ou aço revestido a cobre

perfeitamente aderente ou outro material apropriado (ferro zincado ou ferro fundido, por exemplo) [12].

As dimensões mínimas dos elétrodos de terra garantem, em princípio, que os elétrodos:

- Não são danificados pelas correntes de defeito que os atravessam;
- Têm resistência mecânica suficiente;
- Não são prematuramente inutilizados por eventual corrosão química.
Os elétrodos de terra podem ser classificados em dois tipos [12]:
- Elétrodos de terra horizontais: elétrodos enterrados, geralmente até a uma profundidade de cerca de 1 metro (normalmente cabos nus, constituídos por condutores maciços ou multifilares, com configuração em serpentina ou estrela);
- Elétrodos de terra verticais: elétrodos enterrados, geralmente a uma profundidade superior a 1 metro (normalmente varetas, simples ou extensíveis, com configuração isolada ou em paralelo).

A escolha do tipo de eletrodo de terra mais adequado para uma determinada utilização, deve ter em atenção as Características do terreno (dureza e resistividade), bem como a resistência mecânica, elétrica e a resistência à corrosão do eletrodo.

A nível das Características do terreno, a resistividade do solo (que depende do tipo de solo) e a sua humidade, são as que mais influenciam o valor da resistência de terra do eletrodo [12]. Na escolha do tipo e configuração de elétrodos a utilizar, deverá ter-se em conta o espaço disponível para a sua instalação.

Os elétrodos de terra devem, sempre que possível, ser enterrados nas partes mais húmidas dos terrenos disponíveis, afastados de depósitos ou locais de infiltração de produtos que os possam corroer (fumeiros, estrumeiras, nitreiras, produtos químicos, coque, etc.) e longe de locais de presença, passagem ou permanência habitual de pessoas e/ou animais.

A determinação, ainda que de uma forma aproximada, da adequação de diferentes tipos de elétrodos de terra aos valores máximos regulamentares de resistência de terra das instalações e equipamentos permite concluir os seguintes aspetos mais relevantes [12]:

- No caso de solos de resistividade baixa (até 200/300 $\Omega.m$), a utilização de varetas simples ou extensíveis, com configuração isolada ou em paralelo, é a solução mais adequada;

- No caso de solos de resistividade mais elevada (até 500 $\Omega.m$), poderá ser utilizado cabo nu (seção mínima de 25 mm²) - configuração em serpentina - desde que a natureza do solo e o espaço disponível permita a abertura de vala com a dimensão necessária;
- Considera-se, porém que, quando possível, se deverá dar preferência à utilização de cabo nu (seção mínima de 25 mm²) - configuração em estrela. De facto, para além desta solução se adequar melhor a solos de resistividade mais elevada (próxima dos 1000 $\Omega.m$), está mais vocacionada para situações em que, por razões de limitação de espaço disponível, não é possível a abertura de vala que permita a adoção da configuração em serpentina;
- No caso de solos de alta resistividade (acima de 1000 $\Omega.m$), deverá procurar-se soluções mais eficazes para redução da resistência de terra, tais como, por exemplo, enterramento do elétrodo a grande profundidade com recurso a furos artesianos (se a resistividade do terreno for baixa a essa profundidade, como resultado comprovado de medições a efetuar).

b) Ligação dos Cabos de Guarda

Os cabos de guarda deverão ser ligados individualmente ao circuito de terra de cada um dos apoios através do terminal de terra aéreo existente nos apoios de betão, ou, à estrutura metálica de fixação destes cabos.

A ligação à terra deverá ser efetuada através de fio de cobre ou do mesmo material do cabo de guarda, de seção pelo menos equivalente à deste.

A intensidade de corrente máxima que percorre os cabos de guarda, na ocorrência de um curto-circuito fase-terra, deverá ser tomada como 75% do valor da corrente de defeito fase-terra, assumindo-se que toda a corrente flui pela seção de alumínio nos cabos de guarda em alumínio-aço.

2.1 - Fundações

Os maciços de fundação têm a função de transmitir ao solo os esforços resultantes de todas as solicitações exteriores que lhes são aplicadas, como forças de tração, forças devidas à ação do vento, peso dos apoios e de todos os componentes que lhe estão associados. Assim, os maciços de fundação devem ser convenientemente dimensionados de modo a que, sob o efeito das solicitações máximas a que forem submetidos, não se verifiquem aumentos perigosos das flechas dos condutores, nem o possível derrubamento do apoio.

20 Introdução

Os critérios que se devem ter em conta no dimensionamento de maciços de fundação são, nomeadamente:

- Natureza do terreno;
- Responsabilidade da linha na rede elétrica;
- Função do apoio;
- Esforços envolvidos;
- Altura do apoio.

O cálculo do dimensionamento das fundações não será aqui objeto de maior pormenorização, uma vez que normalmente não é realizado pelo projetista, sendo que as dimensões das fundações vêm já especificadas para o respetivo apoio.

2.2 - Fiabilidade das Linhas Aéreas

No que diz respeito à fiabilidade das linhas aéreas, incluindo os seus elementos constituintes, são considerados três níveis de acordo com o período de retorno das ações climatéricas como mostra a tabela seguinte.

Table 2 - Fatores parciais e fatores de combinação

Ação	Símbolo	Nível de fiabilidade		
		1	2	3
Ações variáveis:				
<i>Cargas climáticas</i>				
Carga de vento	γ_w	1,0	1,2	1,4
	Ψ_w	0,4	0,4	0,4
Carga de gelo	γ_i	1,0	1,25	1,5
	Ψ_i	0,35	0,35	0,35
<i>Cargas de segurança (safety)</i>				
Cargas de construção e manutenção ^a	γ_P	1,5		
Ações permanentes:				
<i>Peso próprio</i>				
	γ_G	1,0		
Ações acidentais:				
<i>Cargas de segurança (security)</i>				
Cargas de torção devidas à tração dos condutores	γ_{A1}	1,0		
Cargas longitudinais devidas à tração dos condutores	γ_{A2}	1,0		
NOTA Os fatores parciais para as ações acima mencionados deverão ser considerados em conjunto com os fatores parciais para as propriedades dos materiais, os quais se definem noutros pontos desta norma.				
^a O valor combinado das ações do vento e do gelo pode admitir-se como equivalente às forças reais, que podem ocorrer durante a manutenção e a construção. Frequentemente, os efeitos das ações do vento e do gelo são desprezáveis.				

2.3 - Cálculo Elétrico

O cálculo elétrico tem como objetivo a determinação da tensão nominal de uma linha de transmissão de energia elétrica e da seção transversal dos condutores que a constituem de forma a assegurar que não sejam excedidas as limitações técnicas impostas pelos condutores, nomeadamente as intensidades de corrente máximas admissíveis, as intensidades de corrente de curto-circuito máximas admissíveis, quedas de tensão, perdas de energia e também a resistência mecânica.

2.4.1. Resistência

O cálculo da resistência elétrica da linha baseia-se no valor adquirido através do catálogo do cabo condutor, relativamente à resistência por quilómetro (considerando o seu valor para 80 °C) multiplicando pela distância em questão.

$$R_{80^{\circ}C} = R_{20^{\circ}C} \times K\theta \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (2.5)$$

Em que:

$$K\theta = 1 + \alpha (\theta_2 - \theta_1) = 1,171 \quad (2.6)$$

Obtendo o valor para a linha a projetar de:

$$R_{linha} = R_{80^{\circ}C} \times l \text{ } [\Omega] \quad (2.7)$$

onde:

l - Comprimento total da linha [km]

2.4.2. Intensidade de Corrente de Serviço

O cálculo elétrico inicia-se no cálculo da intensidade de corrente de serviço presente nas linhas, considerando um fator de potência de 0.9 uma potência de 120 MVA e um nível de tensão de 60 kV.

Para verificar-se se a linha suporta a corrente necessária é importante a realização deste cálculo que é dado pela fórmula:

$$I_s = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi} \text{ [A]} \quad (2.8)$$

Onde:

- U_c - Tensão composta [V];
- I_s - Intensidade de corrente de serviço [A]
- P - Potência [VA];
- $\cos \varphi$ - fator de potência.

2.4.3. Densidade de Corrente

A densidade de corrente, é a quantidade de corrente por milímetro quadrado que circula no condutor é obtida pela seguinte fórmula:

$$d = \frac{I_s}{\sigma} \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (2.9)$$

Onde:

- I_s - Intensidade de corrente de serviço [A];
- σ - Seção do condutor [mm²].

2.4.4. Perdas de Energia

As perdas de energia calculadas, representam as perdas por efeito joule/dissipação térmica e são calculas pela seguinte expressão:

$$p = n \times R \times I^2 \text{ [W]} \quad (2.10)$$

Onde:

- n - Número de condutores da linha;
- R[Ω] - Resistência linear da linha [Ω/km]* L [km];
- I - intensidade de corrente nominal da linha em A;

A resistência por unidade de comprimento linear do condutor utilizado, é fruto do quociente da resistividade (ρ) e da seção dos condutores.

$$R = \frac{\rho}{S} \text{ [}\Omega/\text{km]} \quad (2.11)$$

O valor da resistividade linear é conhecido, de acordo com a natureza do condutor, a uma temperatura igual a 20 °C. Se no local onde se encontra a

linha, tiver uma temperatura diferente, será necessário efetuar uma correção do valor da resistividade para essa mesma temperatura. A resistividade linear é dada pela expressão:

$$\rho = \rho_{20^{\circ}\text{C}} * [1 + \alpha_{20^{\circ}\text{C}} * (\theta_{final} - 20)] \quad (2.12)$$

Onde:

- ρ - Resistividade do condutor;
- $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$ - Resistência do condutor a 20 °C;
- $\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$ - Coeficiente de termo resistividade (1/°C);
- θ_{final} - Temperatura local (°C).

As perdas de energia calculadas representam perdas por dissipação térmica que se verificam nas linhas. Para isso é necessário determinar a resistência linear do condutor utilizado. A resistência, por unidade de comprimento, é fruto do quociente da resistividade (ρ) e da seção dos condutores que constituem as linhas.

Ora o valor da resistividade linear, expressa em Ω/km , é conhecido, de acordo com a natureza do condutor, à uma temperatura igual à 20°C. Caso a temperatura, no local onde se situa a linha, seja diferente desse valor será necessário efetuar uma correção do valor da resistividade para essa mesma temperatura. A resistividade linear é dada pela expressão:

2.4.5. Queda de Tensão

A determinação da queda de tensão é um fator fundamental no cálculo elétrico de uma linha, pois indicará se a linha garante os valores nominais de 60 kV, garantindo uma diferença que não ponha em causa a gestão da linha. A queda de tensão não deverá ser superior a 5% da tensão nominal da linha.

A queda de tensão entre fases de uma linha aérea, é calculada através da seguinte expressão:

$$\Delta U = \sqrt{3} \times I \times (R \times \cos \theta + X \times \sin \theta) \quad [V] \quad (2.13)$$

Onde:

- I - intensidade de corrente de Serviço da linha em A;
- R - resistência elétrica da linha em Ω ;
- X - reatância da linha em Ω ;
- θ - ângulo de defasamento.

2.4.6. Distância Equivalente entre os Condutores

A distância equivalente entre os condutores é dada por:

$$D = \sqrt[3]{(d1 \times d2 \times d3)} \quad (2.14)$$

$$d1 = \frac{\sqrt{D12 \times D12' \times D13' \times D13'}}{D11'}$$

$$d2 = \frac{\sqrt{D21 \times D21' \times D23 \times D23'}}{D22'}$$

$$d3 = \frac{\sqrt{D31 \times D31' \times D33 \times D32'}}{D33'}$$

Em que:

- D - distância equivalente entre condutores em esteira vertical;
- D_{ij}' - distância entre as fases i do primeiro circuito e as fases j do segundo.

2.4.7. Coeficiente de Autoindução

As linhas possuem autoindução devido às correntes que geram campos magnéticos que interferem em cada um dos condutores.

A expressão que permite calcular o coeficiente de Autoindução para condutores de um linha é:

$$L = \left[\frac{\mu}{2 \times n} + 4,6 \times \log\left(\frac{D}{r'}\right) \right] \times 10^{-4} [H/km] \quad (2.15)$$

Onde:

- μ - permeabilidade do condutor (toma o valor de 1 para condutores de cobre, alumínio, ligas de alumínio e cabos de alumínio-aço e o valor de 200 para condutores de aço galvanizado);
- n - número de condutores por fase;

26 Introdução

- D - distância equivalente entre condutores;
- r' - raio fictício, definido através da expressão:

$$r' = \sqrt{n \times r \times R^{n-1}} \text{ [mm]} \quad (2.16)$$

Sendo:

- r - raio do condutor;
- R - raio da circunferência que passa pelos condutores que formam as fases;
- n - número de condutores por fase.

Dado se tratar de uma linha simples (1 condutor por fase), $n = 1$ e $r' = r$, logo o coeficiente de Autoindução é dado por:

$$L = \left[\frac{1}{2} + 4,6 \times \log\left(\frac{D}{r}\right) \right] \times 10^{-4} \text{ [H/km]} \quad (2.17)$$

2.4.8. Reatância

A reatância é calculada através do produto da frequência angular w [rad/s] da corrente alternada e coeficiente de autoindução. A expressão que determina o valor da reatância é:

$$X = w \times L = 2 \times \pi \times f \times L \text{ [}\Omega/\text{km]} \quad (2.18)$$

Sendo as variáveis as seguintes:

- X - reatância da linha;
- f - frequência da corrente alternada em [Hz];
- L - coeficiente de autoindução.

2.4.9. Capacidade

A capacidade da linha surge devido à existência de carga capacitiva eletrostática no condutor e diferença de potencial entre o condutor e o invólucro, sendo neste caso o invólucro considerado como a distância à terra.

A expressão utilizada para o cálculo da capacidade de uma linha trifásica é:

$$C = \left(\frac{24,2}{\log\left(\frac{D}{r'}\right)} \right) \times 10^{-9} [F/km] \quad (2.19)$$

Em que:

- D - distância equivalente entre os condutores em mm;
- r' - raio fictício em mm.

2.4.10. Susceptância

A susceptância é calculada pela seguinte fórmula:

$$B = w \times C = 2 \times \pi \times f \times C [S/km] \quad (2.20)$$

Sendo:

- C - capacidade da linha em F/km;
- f - frequência da linha em Hz;
- w - frequência angular da corrente alternada em rad/s.

2.4.11. Condutância

A condutância representa a limitação dos isoladores entre os condutores e o apoio, porém esta é muito elevada pelo que a condutância é considerada nula.

A condutância é dado por:

$$G = \frac{p}{U_s^2} * 10^{-3} [S/km] \quad (2.21)$$

Onde:

- p - energia perdida em kW/km;
- U_s - tensão eficaz simples em kV.

2.4.12. Admitância

O valor da admitância é dada por:

$$Y = G + jB \text{ [S/km]} \quad (2.22)$$

Onde:

- G - condutância em S/km;
- B - susceptância em S/km.

2.4.13. Impedância

A impedância é dada por:

$$Z = R + jX \text{ [\Omega/km]} \quad (2.23)$$

Sendo:

- R - resistência em Ω/km ;
- X - reactância em Ω/km .

2.4.14. Impedância Caraterística

A impedância Caraterística da linha é dada pela equação:

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \sqrt{\frac{R + jX}{G + jB}} \text{ [\Omega]} \quad (2.24)$$

Onde:

- \bar{Z} - resistência em Ω/km ;
- \bar{Y} - reactância em Ω/km .

2.4.15. Ângulo Caraterístico

$$\bar{\theta} = \sqrt{\bar{Z} * \bar{Y}} \quad (2.25)$$

Onde:

- \bar{Z} - resistência em S/km ;
- \bar{Y} - reactância em S/km .

2.4 - Cálculo Mecânico

2.4.1. Objetivos

O cálculo mecânico é essencial nos projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, de forma a assegurarem todas as condições de segurança, de modo a que os diversos apoios presentes no projeto suportem todas as tensões solicitadas, nas mais adversas condições. Para tal é essencial realizar um cálculo mecânico que cumpra com os principais objetivos.

Os principais objetivos do cálculo mecânico são:

A determinação das tensões de montagem a aplicar aos condutores de acordo com as condições atmosféricas que se verifiquem na altura da sua montagem por forma a assegurar que a rutura dos condutores não se verifique independentemente das condições atmosféricas que vierem a verificar-se;

Dimensionamento dos apoios no que consiste a verificação da estabilidade dos mesmos através da determinação da sua resistência mecânica com base nos casos de carga, associados a cada tipo de apoio, patentes nas recomendações para Linhas Aéreas de Alta Tensão até 60kV da Norma Europeia EN 50341-3-17 bem como a verificação da estabilidade dos maciços de fundação;

Escolher convenientemente a altura dos postes de modo a que os condutores verifiquem as distâncias mínimas impostas pela EN 50341-3-17 por forma a evitar uma aproximação exagerada dos condutores a objetos próximos da linha.

Verificar o afastamento entre condutores de forma a serem cumpridas as distâncias regulamentares em vigor, de acordo com o disposto na EN 50341-3-17, de modo a evitar-se eventuais arcos que possam formar-se quando da passagem de uma eventual descarga para assim garantir o devido isolamento entre condutores.

2.4.2. 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 rutura dos mesmos.

A expressão que garante essa condição é:

$$t_{seg} = \frac{0,4 * T_R}{\sigma} [N/mm^2] \quad (2.26)$$

- T_R - tensão de rutura dos condutores[N];
- σ - seção do cabo em [mm²];
- t_{seg} - tensão de segurança.

A escolha da tensão máxima a aplicar nos condutores e cabos de guarda, não deverá ser regida única e exclusivamente pelo valor da tensão de segurança, mas também com o facto de que quanto maior for a tensão aplicada, menores serão as flechas e conseqüentemente mais facilmente garantir-se-ão as distâncias regulamentares, no entanto trarão esforços excessivos ao apoio, podendo ser necessário reforçar o apoio e torna-lo mais caro. Por outro lado, se for utilizada uma tensão inferior, os esforços mecânicos solicitados aos apoios diminuirão, as flechas serão maiores e será mais difícil cumprir com as distâncias regulamentares. Desta feita, é necessário ter em conta estes dois lados e procurar encontrar um ponto de equilíbrio, em regra os valores utilizados para trações máximas estão compreendidos entre os 7 e os 9 daN/mm².

2.4.3. Ações dos agentes externos sobre as Linhas

De acordo com a sua variação no tempo as ações são classificadas da seguinte forma [EN 50341-1]:

- 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.

2.4.4. Ação do Vento

De acordo com a cláusula 4.2.2 da EN50341-3-17, para quantificar as ações do vento para as linhas aéreas, o território Português está dividido em duas zonas.

- 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.

2.4.5. Velocidade e Pressão Dinâmica do Vento

A EN 50341-1, considera diferentes velocidades do vento, assim como a pressão dinâmica, conforme é descrito de seguida:

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:

$$V_g = K_g * V_{média} [m/s] \quad (2.27)$$

Velocidade do vento de referência V_r - é a 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:

$$V_h = V_r * \left(\frac{h}{10}\right)^{0.2} [m/s] \quad (2.28)$$

Tabela 1 - Velocidade do vento em Zona A e Zona B

	Zona A	Zona B
$V_{m\acute{e}dia}$ (m/s)	20	22
V_g (m/s)	30	33
V_r (m/s)	30	33

Pressão dinâmica do vento q_h - é dada pela expressão:

$$q_h = \frac{1}{2} * \rho * V_h^2 [m/s] \quad (2.29)$$

Onde:

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

V_h - é a velocidade do vento a uma altura h acima do solo.

A tabela 2 apresenta alguns valores da pressão dinâmica do vento em função da altura acima do solo e zona de vento.

Tabela 2 - 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

2.4.6. Forças do Vento sobre os Elementos da Linha

$$Q_W = q_h * G_q * G_x * C_x * A [N] \quad (2.30)$$

Onde:

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

G_q - é o fator de rajada;

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

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

A - é a área do elemento da linha considerado, projetada num plano perpendicular à direção do vento em m^2 .

Para efeitos de dimensionamento do projeto em questão, importa calcular a força do vento sobre os condutores, cabos de guarda e isoladores. As expressões utilizadas para os mesmos são:

2.4.6.1. Forças do Vento sobre os Condutores

$$Q_{wc} = q_h * G_q * G_c * C_c * d * \frac{L_1 + L_2}{2} * \cos^2 \phi \text{ [N]} \quad (2.31)$$

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].

2.1.1.1. Forças do Vento sobre os Isoladores

$$Q_{wins} = q_h * G_q * G_x * C_x * A \text{ [N]} \quad (2.32)$$

Onde:

G_{ins} - é o fator de ressonância estrutural nos isoladores;

G_q - é o fator de rajada;

C_{ins} - 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 .

2.4.2. 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 EN 50341-3-17, no território português devem ser consideradas zonas de gelo, as regiões com altitudes superiores a 600 metros nos seguintes

distritos: Viana do Castelo, Braga, Vila Real, Bragança, Porto, Viseu, Guarda, Castelo Branco, Coimbra e Portalegre.

A manga de gelo a considerar no cálculo mecânico dos condutores e cabos de guarda das linhas aéreas deverá ter uma espessura uniforme de, pelo menos, 10 mm e uma densidade de 900 kg/m³.

2.4.3. Ação da Variação da Temperatura

Os condutores das linhas aéreas estão sujeitos, ao longo do ano, a variações bastante acentuadas da temperatura ambiente.

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 consequentemente na variação da tração a que os condutores estão sujeitos [14].

2.4.4. Temperatura Mínima e Máxima de Projeto

Exceto se indicado nas Especificações de Projeto, a temperatura mínima de projeto na ausência de outra ação climática deve ser de -5 °C. Em zonas de gelo esta temperatura deve ser -10°C. Estas temperaturas devem ser usadas para o cálculo de flechas mínimas tanto para os condutores como para os cabos de guarda (cláusula 4.2.5/PT.1, EN 50341-3-17).

A temperatura máxima de projeto a ser considerada no cálculo de flechas máximas ou para efeitos de distribuição de apoios não deve ser inferior a:

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

2.4.5. Estados Atmosféricos

A temperatura a ser considerada para a condição de carga de vento máximo ($\gamma_w.Q_w$) deve ser de 15 °C. Esta deve também ser considerada a

temperatura de referência para o EDS (*every-day-stress*) - também conhecido como estado atmosférico de Primavera.

A temperatura a ser considerada para a condição de carga de vento reduzido ($\psi_w \cdot Q_w$) deve ser **-5 °C** - também conhecido como estado atmosférico de Inverno.

A temperatura a ser considerada para a condição de carga sem vento e temperatura máxima, também conhecido como estado atmosférico de Verão, deve ter em consideração as seguintes temperaturas:

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

2.4.6. Curva Característica 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 característica denominada por catenária [14].

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

$$y = p * \left(\cosh \frac{x}{p} \right) - p \text{ [m]} \quad (2.33)$$

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:

$$p = \frac{t_{\theta_i} * \sigma}{\omega} \text{ [m]} \quad (2.34)$$

Onde:

$t\theta_i$ - Tensão de montagem do condutor [daN/mm²];

σ - Seção do condutor [mm²];

ω - Peso próprio do condutor [daN/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 afastam-se 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. Além disso, os ventos atuam geralmente em forma de rajadas irregulares, impondo curvatura dupla e movimento a uma curva que se supõe plana e em equilíbrio [8].

A escolha 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][21].

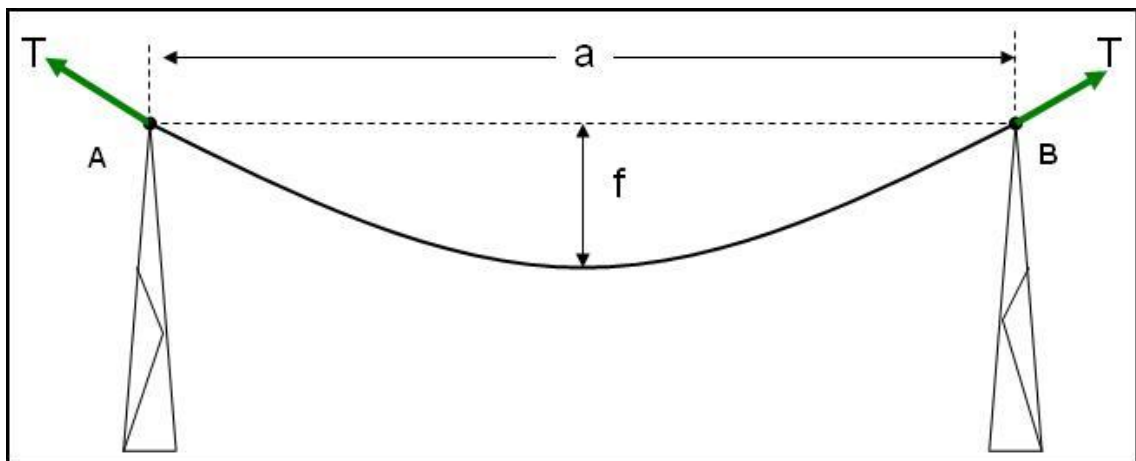


Figure 13 - Catenária, flecha e vão formado entre os apoios A e B

2.4.7. 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.

$$y = \frac{x^2}{2 * p} \quad (2.35)$$

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 [9].

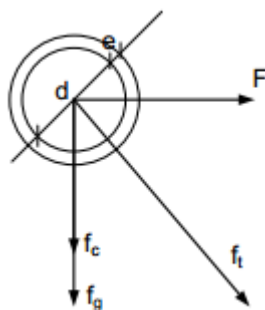
A Figura 22 demonstra a diferença que se obtém quando se utiliza a curva catenária, a vermelho, e a aproximação parabólica, a azul, ao se intersetar as duas curvas nos pontos de fixação do condutor.

Figura 22 - Posições relativas das curvas catenária e aproximação parabólica [36].

2.4.8. 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 que se segue (fig. N°).

Figura 1 - Esquema de forças aplicadas num condutor.



F - Força exercida pelo vento [N];

- f_c - Peso próprio do condutor [N];
 f_g - Peso da manga de gelo [N];
 f_t - Somatório das forças aplicadas no condutor.
 d - Diâmetro do condutor;
 e - espessura da manga de gelo;

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.

$$F_r = \sqrt{(P_c) + (P_g) + F_v^2} \quad (2.36)$$

$$m = \frac{F_r}{P_c} \quad (2.37)$$

$$m = \frac{\sqrt{\{\omega + \rho_{gelo} * \frac{\pi}{4} [(d + 2 * e)^2 - d^2]\}^2 + F_{vento}^2}}{\omega} \quad (2.38)$$

2.4.9. 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]. Mais concretamente, a equação de estados traduz a variação da tensão mecânica, em função da temperatura. Esta equação encontra-se representada na expressão seguinte.

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d * E} - \frac{m_{\theta_i}^2 * w^2 * L_{medio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_{máx}}{\alpha_d * E} - \frac{m_k^2 * w^2 * L_{medio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{máx}^2} \quad (2.39)$$

Onde:

- θ_i e θ_k - Temperatura [°C];
 t_{θ_i} e t_{θ_k} - Tensão mecânica do condutor às temperaturas θ_i e θ_k [daN/mm²];

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

E - Módulo de Young [daN/mm^2];

α - Seção do condutor [mm^2];

ω - Peso do condutor [daN/m];

m_k - Coeficiente de sobrecarga do estado mais desfavorável.

Resolvendo a equação 35 é possível determinar a tensão mecânica t_{θ_i} , à temperatura θ_i , conhecendo para o estado mais desfavorável a temperatura θ_k e a tensão mecânica t_{θ_k} .

2.4.10. Cantão e Vão Equivalente Fictício

Segundo o RSLEAT, 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. O cálculo do vão equivalente é obtido a partir da equação 34:

$$L_{medio} = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i L_i}} \quad (2.40)$$

O vão equivalente fictício, também representa o vão que, se existisse no cantão, deixaria as cadeias de suspensão sempre verticais para qualquer estado atmosférico.

Este parâmetro, também chamado vão ideal de regulação, 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 ruptura dos condutores.

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

- Utilizar sempre que possível apoios com cadeias de suspensão. No entanto, não se deve projetar cantões com mais de 15 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.

2.4.11. Geometria das Linhas

2.4.12. 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 aparece-se e provoca-se roturas no cabo, chegando-se assim a um conceito intitulado “tensão de cada dia”.

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 que se segue:

Tabela 3 - 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 passar os seguintes valores:

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

Cabos de	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 contribuem para que as vibrações se autoamortizem.

2.4.13. Vãos Desnivelados

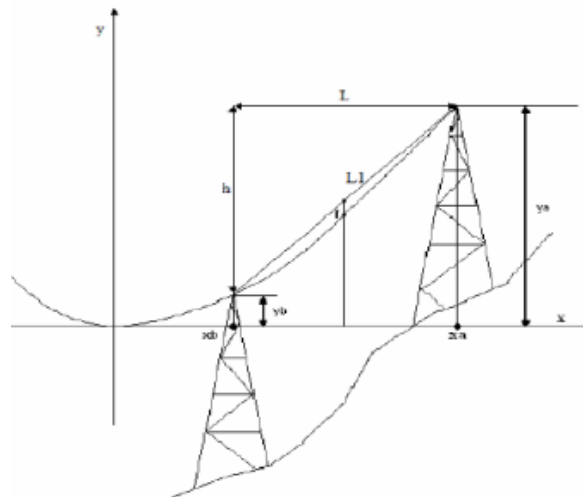


Figure 14 - Vão em desnível

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

$$f = \frac{m * \omega * L * L_1}{8 * \sigma * t_{\theta^{\circ}\text{C}}} [m] \quad (2.41)$$

O estado de flecha máxima pressupõe a temperatura máxima do condutor e ausência de vento. É neste estado que se verificam as maiores flechas dos condutores. O seu cálculo é efetuado substituindo o valor de t_{θ} pelo valor obtido pela equação de estados para as condições de Verão. A utilidade deste cálculo é a verificação das distâncias mínimas a manter entre os condutores e o solo ou obstáculos circundantes.

2.4.14. Vãos em Patamar

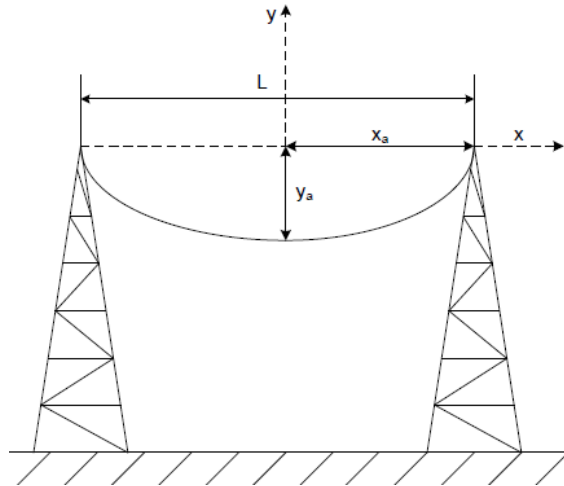


Figure 15 - Vão em patamar

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

$$f = \frac{m * \omega * L^2}{8 * \sigma * t_{\theta^{\circ}\text{C}}} [m] \quad (2.42)$$

Onde:

m - Coeficiente de sobrecarga (unitário pois na regulação dos condutores pressupõe-se que não há vento nem gelo);

L - Comprimento do vão [m]; σ - Secção do condutor [mm²]; ω - Peso próprio do condutor [daN/m]; $t_{\theta i}$ - Tensão de montagem do condutor à temperatura θi [daN/mm²].

2.4.15. Apoio Enforcado

No entanto existem situações em que é necessário utilizar cadeias de amarração em apoios de alinhamento. Uma dessas situações é quando se está na presença de locais com declive bastante acentuado, podendo 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 8 ilustra um exemplo de um apoio enforcado.

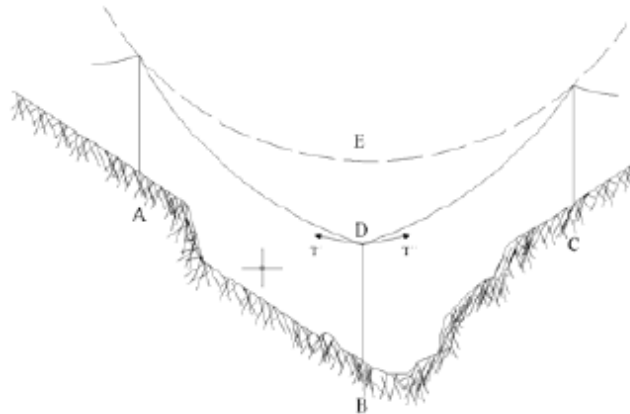


Figure 16 - Apoio enforcado

2.4.16. Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores

A acção do vento transversal sobre os condutores da linha e sobre a própria cadeia em suspensão de isoladores pode provocar o desvio desta, podendo mesmo levar os condutores a aproximarem-se demasiado dos apoios. A figura 2.15 ilustra o desvio de uma cadeia de comprimento S_L , e mostra também as forças aplicadas na mesma.

As forças aplicadas são então:

P_v - Força do vento nos cabo condutores em daN;

Q_v - Força do vento na cadeia de isoladores em daN;

P - Peso dos condutores sobre o apoio daN;

Q - Peso da cadeia de isoladores daN;

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:

$$i = \tan^{-1} \frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \text{ [grados]} \quad (2.43)$$

O desvio máximo admissível igual a 60 grados.

2.4.17. Distâncias de Isolamento

Na EN50341-1 são consideradas cinco tipos de distâncias eléctricas para evitar contornamentos. Para efeitos de projecto, e com vista a calcular as diferentes distâncias mínimas admissíveis entre condutores de fase, condutores e o próprio poste, condutores e solo e obstáculos diversos, é necessário o conhecimento de dois tipos daquelas distâncias eléctricas.

São estas:

D_{el} - distância mínima necessária para prevenir a descarga disruptiva entre condutores de fase e objectos ao potencial da terra, durante sobretensões transitórias. D_{el} pode ser considerada uma distância interna considerando a distância de condutores ao estrutura do poste ou externa considerando a distância a de condutores a obstáculos.

D_{pp} - distância mínima necessária para prevenir a descarga disruptiva entre condutores de fase, durante sobretensões transitórias. D_{pp} é, por isso, considerada uma distância interna.

O cálculo de D_{el} e D_{pp} é realizado de acordo com o demonstrado no Anexo E da EN50341-1 e difere consoante o tipo de sobretensão considerado.

Tem-se então a fórmulas finais que permitem o cálculo das distâncias:

- Sobretensões de Choque Atmosférico (frente rápida)

$$D_{el} = \frac{U_{90\%_{ff_is}}}{530 \cdot K_a \cdot K_{z_ff} \cdot K_{g_ff}} \quad (2.44)$$

$$D_{pp} = \frac{1,2 \cdot U_{90\%_{ff_is}}}{530 \cdot K_a \cdot K_{z_ff} \cdot K_{g_ff}} \quad (2.45)$$

- Sobretensões de manobra (frente lenta)
- Sobretensões à frequência industrial

sendo:

K_{g_ff} o factor de intervalo para sobretensões de choque atmosférico para sobretensões de frente rápida de valor $K_{g_ff} = 0,74 + 0,26K_g$, sendo que K_g é o factor de intervalo;

$U_{90\%_ff_is}$ rápida;

a tensão suportável ao choque atmosférico da cadeia de isoladores; K_{z_ff} o factor de desvio da distribuição da tensão suportável a sobretensões de frente

2.4.18. Distâncias Mínimas Regulamentares

A cláusula 5.4.3/PT.2 da EN50341-3-17 refere que a distância de segurança entre condutores de fase de um circuito ou entre condutores de fase de diferentes circuitos no mesmo apoio deve ser não inferior a D_{pp}

Adicionalmente, os condutores nus devem manter distâncias entre si não inferiores a D dada por:

$$D = k * (f + S_L + D_{pp}) [m] \quad (2.46)$$

onde:

k é o coeficiente de material que vale 0,6 para o alumínio-aço;

f é a flecha do condutor à temperatura máxima de projecto (75 °C) e sem vento;

S_L é o comprimento da cadeia de isoladores.

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 não inferior a $\frac{2}{3} * D$.

Há ainda que considerar as distâncias mínimas admissíveis em relação ao solo, estruturas e objectos diversos apresentadas na tabela 2.8 de acordo com a EN50341-3-17:

Table 3 - 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 protecção			–	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 electrificados		5.4.5.3/PT. 1	$D = 7m + D_{el}$	$7m + D_{el}$
Distância dos condutores nos cruzamentos com caminhos de ferro electrificados		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

Definem-se ainda os seguintes requisitos especiais [EN50341-3-17]:

- Nas as distâncias a árvores define-se uma faixa de protecção centrada no eixo da linha, no interior da qual as árvores pode 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 1,5m. Isto não se aplica, no entanto, a espécies protegidas pela Lei Portuguesa.
- Nas distâncias a edifícios, para telhados com inclinação maior que 15º e resistentes ao fogo $D=2m+D_{el}$; Para telhados com inclinação

menor ou igual a 150 e resistentes ao fogo $D=4m+D_{el}$; Para telhados não resistentes ao fogo e instalações sensíveis ao fogo $D=10m+D_{el}$;

- Para auto-estradas os apoios devem situar-se a uma distância horizontal não inferior a 5 m do limite da zona de auto-estrada; Para outras estradas essa distância é de 3m; Nas situações em que no caso de colapso do apoio, este poder cair sobre uma estrada as suas fundações devem ser dimensionadas para 1,5 vezes os valores das cargas normalizadas;
- É estabelecida um 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°.

2.4.19. Casos de carga normalizados

No cálculo mecânico dos apoios em Portugal são definidos casos de carga normalizados de acordo com a tabela 2.9:

Table 4 - 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	5b	Cargas de segurança, cargas longitudinais
Hipótese 3	5a	Cargas de segurança, cargas de torção

Segundo a 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 para cada apoio.

2.1.1.1. 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):

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.

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 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.

NOTA: As cargas de segurança previstas na Hipótese 3 podem ser dispensadas para os apoios de alinhamento (T) se o projeto da linha tiver previstos apoios de alinhamento de reforço (RT) (cláusula 4.2.10.1/PT.1 da EN 50341-3-17).

2.1.1.1. 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):

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.

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 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.

NOTA 1: No cálculo da tensão horizontal dos condutores e cabos de guarda para as hipóteses de cálculo 2 e 3 acima, é aceitável considerar que o vento atua perpendicularmente aos condutores e cabos de guarda.

NOTA 2: As cargas de segurança para apoios de ângulo (A) previstas na hipótese 3 são dispensáveis se o projeto da linha tiver previstos apoios de ângulo de reforço (RA) (cláusula 4.2.10.1/PT.1 da EN 50341-3-17).

2.1.1.1. 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):

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.

2.1.1.1. 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):

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)

Apoios de 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.

Apoios de 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.

NOTA: A hipótese 3 é dispensada no caso de apoios com braços articulados, se o cálculo evidenciar suficientemente que o apoio não fica sujeito a cargas de torção.

2.1.1.1. 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):

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)

- Apoios de 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.

Apoios de 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.

NOTA 1: É aceitável considerar que o vento atua perpendicularmente aos condutores e cabos de guarda quando se efetua o cálculo da tensão horizontal dos condutores e cabos de guarda para as hipóteses 2 e 3 acima.

Capítulo 3

Projeto linha Fafe - Fafe (REN) - Memória descritiva e justificativa

3.1 - Objetivo

A EDP Distribuição - Energia, S.A pretende interligar a subestação de FAFE a uma nova subestação da REN, situada no mesmo concelho.

Para tal será construída uma linha aérea dupla de transporte de energia a 60 kV, que interligará estas duas subestações com um comprimento total de aproximadamente 4,312 km.

3.2 - Regulamentação

O projeto será regido pela norma europeia EN 50341-1, com o complemento dos aspetos normativos nacionais referentes a Portugal, designado EN 50341-3-17.

3.3 - Características da linha

A linha a ser executada trata-se de uma linha de transporte de potência de 120 MVA, com a tensão alternada de 60 kV, frequência de 50 Hz e fator de potência de 0.9 (indutivo).

3.4 - Cálculo Elétrico

3.4.1. Características dos Cabos

A linha dupla será constituída por seis cabos condutores e por um cabo de guarda, ambos em alumínio-aço.

Tabela 5 - Características do cabo condutor e cabo de guarda

Designação	Condutor AL-AÇO	C. Guarda (AL-AÇO)	Unidades
	ACSR 325 (Bear 325)	Guinea 130	
Seção nominal do cabo	325.00	127.50	mm ²
Diâmetro do fio de aço	3.35	2.92	mm
Diâmetro do fio de alumínio	3.35	2.92	mm
Seção total do cabo	326.10	127.20	mm ²
Seção total de aço	61.70	46.90	mm ²
Seção total de alumínio	264.42	80.40	mm ²
Peso do cabo	1.21	0.59	kg/m
Diâmetro exterior	23.45	14.60	mm
Carga de rutura mínima	10938.00	6646.00	daN
Modulo de Young final	80000.00	104000.00	N/mm ²
Coeficiente de dilatação linear	0.0000179	0.0000153	1/°C
Resistência elétrica máxima em CC a 20°C	0.11	0.36	Ω/km

3.4.2. Resistência

O cálculo da resistência elétrica da linha baseia-se no valor adquirido através do catálogo do cabo condutor, relativamente à resistência por quilómetro (considerando o seu valor para 80 °C) multiplicando pela distância em questão.

$$R_{80^{\circ}C} = R_{20^{\circ}C} \times K\theta \quad (3.1)$$

Em que:

$$K\theta = 1 + \alpha (\theta_2 - \theta_1) = 1,171 \quad (3.2)$$

⇔

$$1 + 0,0038(80 - 20) = 1,228$$

Implica que:

$$R_{80^{\circ}C} = 0,1093 \times 1,228 = 0,1342 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Obtendo o valor para a linha a projetar de:

$$R_{linha} = R_{80^{\circ}C} \times l \quad (3.3)$$

↔

$$R_{linha} = 0,1342 \times 4,3138 = 0,5789 \text{ } \Omega$$

3.4.3. Corrente de Serviço

O cálculo elétrico inicia-se no cálculo da intensidade de corrente de serviço presente nas linhas, considerando um fator de potência de 0.9 uma potência de 120 MVA e um nível de tensão de 60 kV.

Numa perspetiva de verificar se a linha suporta a corrente necessária é importante a realização deste cálculo que é dado pela fórmula:

$$I_s = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi} \text{ [A]} \quad (3.4)$$

Substituindo os valores para o nosso caso tem-se:

$$I_s = \frac{120 * 10^6}{\sqrt{3} * 60 * 10^3 * 0,9} = 1283 \text{ A} \quad (3.5)$$

Como se trata de dois condutores por fase:

$$I_{sf} = \frac{I_s}{2} = \frac{1283}{2} = 641,50 \text{ A} \quad (3.6)$$

Sendo:

I_{sf} - Intensidade de corrente por fase [A].

3.4.4. Densidade de Corrente

O cálculo seguinte é a obtenção da densidade de corrente do condutor por fase, que atribui o valor da corrente por milímetro quadrado que circula no condutor e é dado pela fórmula:

$$d = \frac{I_s}{\sigma} [A/mm^2] \quad (3.7)$$

Para o presente caso temos que:

$$d = \frac{641,5}{325} = 1,974 A/mm^2 \quad (3.8)$$

3.4.5. Perdas de Energia

As perdas de energia são efetuadas para o pior caso, portanto tem-se em conta a temperatura mais elevada (80 °C).

O valor é calculado através da fórmula:

$$P_p = n \times R_{80^\circ C} \times I^2 \times l \quad (3.9)$$

Onde:

- n - número de condutores;
- $R_{80^\circ C}$ - resistência a 80 °C por fase;
- I - intensidade de corrente;
- l - comprimento da linha.

Para o presente caso temos que:

$$P_p = 3 * \frac{0,1342}{2} * 1283^2 \times 4,3138 = 1,4294 MW$$

Relativamente ao cálculo em percentagem determina-se a potência ativa total dividindo pela potência de perdas determinada:

$$P = S \times \cos \varphi = 120 \times 0,9 = 108 MW \quad (3.10)$$

$$P_{p.tot} = P_p \times 2 = 1,4294 * 2 = 2,8588 MW \quad (3.11)$$

$$P_{p.tot} (\%) = P_{p.tot} \times \frac{100}{P} = 2,8588 \times \frac{100}{108} = 2,6 \% \quad (3.12)$$

3.4.6. Distância Equivalente entre os Condutores

Para a construção da linha, os apoios que se enquadram nas características da mesma foram, o F20CA e F95CA. Na perspetiva de calcular o coeficiente de autoindução é necessário antes calcular a distância equivalente entre os condutores:

$$DEV = \sqrt[3]{(d1 \times d2 \times d3)} \quad (3.13)$$

$$d1 = \frac{\sqrt{D12 \times D12' \times D13' \times D13'}}{D11'}$$

$$d2 = \frac{\sqrt{D12 \times D12' \times D23 \times D23'}}{D22'}$$

$$d3 = \frac{\sqrt{D13 \times D13' \times D23 \times D23'}}{D33'}$$

Em que:

- *DEV* - distância equivalente entre condutores em esteira vertical;
- *Dij'* - distância entre as fases *i* do primeiro circuito e as fases *j* do segundo.

3.4.7. Coeficiente de Autoindução

As linhas possuem autoindução devido às correntes que geram campos magnéticos que interferem em cada um dos condutores.

A expressão que permite calcular o coeficiente de autoindução entre os condutores da linha transmissão é:

$$L = \left[\frac{\mu}{2 \times n} + 4,6 \times \log\left(\frac{D}{r'}\right) \right] \times 10^{-4} \text{ H/km} \quad (3.14)$$

Onde:

- μ - permeabilidade do condutor;
- *n* - número de condutores por fase;
- *D* - separação média geométrica entre condutores;
- *r'* - raio fictício, definido através da expressão:

$$r' = \sqrt{n \times r \times R^{n-1}} \text{ mm} \quad (3.15)$$

Sendo:

- r - raio do condutor;
- R - raio da circunferência que passa pelos condutores que formam as fases;
- n - número de condutores por fase.

O valor de μ para condutores de cobre é de 1, assim como para alumínio e ligas de alumínio.

Dado que neste cálculo se considera 1 condutor por fase:

$$r = \frac{23,45}{2} = 11,725 \quad (3.16)$$

$$L_{30} = \left[\frac{1}{2} + 4,6 \times \log \frac{3,561}{11,725} \right] \times 10^{-4} = 1,24 \times 10^{-3} \text{ H/km}$$

$$L_{95/165} = \left[\frac{1}{2} + 4,6 \times \log \frac{4,373}{11,725} \right] \times 10^{-4} = 1,28 \times 10^{-3} \text{ H/km}$$

3.4.8. Reatância

A reatância é a grandeza elétrica que se calcula pelo produto do coeficiente de autoindução e a pulsação da corrente alternada. A fórmula para o cálculo da reatância é a seguinte:

$$X = w \times L = 2 \times \pi \times f \times L \quad (3.17)$$

Sendo as variáveis as seguintes:

- X - reactância da linha;
- f - frequência de exploração da linha;
- L - coeficiente de autoindução.

Substituindo pelos valores do nosso caso tem-se:

$$X_{30} = 2 \times \pi \times 50 \times 0,00128 = 0,40 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X_{95/165} = 2 \times \pi \times 50 \times 0,00124 = 0,39 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Para o valor total da linha multiplica-se pelo comprimento desta e obtém-se:

$$X_{total30} = 0,39 \times 4,3148 = 1,68 \text{ } \Omega$$

$$X_{total95/165} = 0,40 \times 4,3148 = 1,74 \text{ } \Omega$$

3.4.9. Queda de Tensão

É muito importante no cálculo elétrico a determinação da queda de tensão, pois é um fator fundamental para saber se a linha permite garantir os valores nominais de 60 kV, garantindo uma diferença que não ponha em causa a gestão da linha.

$$\Delta U = \sqrt{3} \times I \times (R_{80^{\circ}C} \times l \times \cos \theta + X \times l \times \sin \theta) \quad V \quad (3.18)$$

Onde:

- I - corrente de Serviço da linha;
- $R_{80^{\circ}C}$ - resistência a 80 °C;
- l - comprimento da linha;
- X - reatância da linha;
- θ - ângulo de defasamento.

Para o nosso caso:

$$\begin{aligned} \Delta U_{30} &= \sqrt{3} \times 641,5 \times (0,1280 \times 4,3148 \times 0,9 + 0,39 \times 4,3148 \times 0,436) = 1367,58 \text{ V} \\ \Delta U_{95/165} &= \sqrt{3} \times 641,5 \times (0,1280 \times 4,3148 \times 0,9 + 0,40 \times 4,3148 \times 0,436) = 1394,54 \text{ V} \end{aligned}$$

Em percentagem:

$$\Delta U_{30}(\%) = \frac{(\Delta U \times 100)}{U_n} = \frac{(1367,58 \text{ V} \times 100)}{60 \text{ kV}} = 2,28 \% \quad (3.19)$$

$$\Delta U_{95/165}(\%) = \frac{(\Delta U \times 100)}{U_n} = \frac{(1394,54 \text{ V} \times 100)}{60 \text{ kV}} = 2,32 \%$$

3.4.10. Capacidade

A capacidade da linha surge devido à existência de carga capacitiva eletrostática no condutor e diferença de potencial entre o condutor e o invólucro, sendo neste caso o invólucro considerado como a distância à terra. A fórmula que expressa a capacidade da linha trifásica é:

$$C = \left(\frac{24,2}{\log\left(\frac{D}{r'}\right)} \right) \times 10^{-9} \text{ F/km} \quad (3.20)$$

Em que:

- D - distância equivalente entre os condutores;
- r' - raio do condutor.

Para o presente caso temos que:

$$C_{30} = \left(\frac{24,2}{\log\left(\frac{3,561}{11,725}\right)} \right) \times 10^{-9} = 9,75 \times 10^{-9} \text{ F/km}$$

$$C_{95/165} = \left(\frac{24,2}{\log\left(\frac{4,373}{11,725}\right)} \right) \times 10^{-9} = 9,41 \times 10^{-9} \text{ F/km}$$

3.4.11. Susceptância

A susceptância é calculada pela seguinte fórmula:

$$B = w \times C = 2 \times \pi \times f \times C \quad (3.21)$$

Sendo:

- C - capacidade da linha;
- f - frequência da linha.

Logo, para a nossa linha a susceptância é:

$$B_{30} = 2 \times \pi \times 50 \times 9,75 \times 10^{-9} = 3,06 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

$$B_{95/165} = 2 \times \pi \times 50 \times 9,41 \times 10^{-9} = 2,96 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

3.4.12. Condutância

A condutância representa a limitação dos isoladores entre os condutores e o apoio, porém esta é muito elevada pelo que a condutância é considerada nula.

$$G = 0 \quad (3.22)$$

3.4.13. Admitância

O valor da admitância é dada por:

$$Y = G + jB \quad (3.23)$$

Logo, para o nosso caso tem-se:

$$Y_{30} = j3,06 \times 10^{-6}$$

$$Y_{95/165} = j2,96 \times 10^{-6}$$

3.4.14. Impedância

A impedância é dada por:

$$Z = R + jX \quad (3.24)$$

Sendo:

- R - resistência;
- X - reactância.

$$Z_{30} = 0,1280 + j0,39$$

$$Z_{95/165} = 0,1280 + j0,40$$

3.4.15. Impedância Caraterística

A impedância Caraterística da linha é dada pela equação:

$$Z_c G = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{R + jX}{G + jB}} \quad (3.25)$$

Logo:

$$ZCG_{30} = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{R + jX}{G + jB}} = \sqrt{\frac{0,1280 + j0,39}{0 + j3,06 \times 10^{-6}}} = 338,55 - j139,48$$

$$ZCG_{95/165} = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{R + jX}{G + jB}} = \sqrt{\frac{0,1280 + j0,40}{0 + j2,96 \times 10^{-6}}} = 350,38 - j142,41$$

3.4.2. Isoladores

O valor da tensão nominal da linha é de 60 kV a que corresponde uma tensão mais elevada U_m de 72,5 kV.

A tensão de contornamento sob chuva U_{ch} não deverá ser inferior a

$$3 * \left(\frac{\sqrt{2} * U_m}{\sqrt{3}} \right) = 2,45 * U_m [kV] \quad (3.26)$$

isto é,

$$U_{ch} \leq 2,45 * 72,5 = 178 \text{ kV}$$

Considerando que a linha será implantada numa zona de poluição média, as cadeias de isoladores a utilizar serão constituídas por 5 elementos de cerâmica do tipo E100-127.

3.5 - Cálculo Mecânico

3.4.1. Tensões Mecânicas Máximas

$$t_{seg} = \frac{04 * T_R}{\sigma} \quad (3.27)$$

Cabo de Guarda:

$$t_{seg} = \frac{04 * 66460}{127,2} = 208,99 \text{ N/mm}^2$$

Condutor:

$$t_{seg} = \frac{04 * 109380}{326,1} = 134,17 \text{ N/mm}^2$$

3.4.2. Coeficientes de Sobrecarga

$$m = \frac{\sqrt{\omega^2 + F_{vento}^2}}{\omega} \quad (3.28)$$

Cabo de Guarda:

Vento reduzido (Inverno)

$$Q_W = q_h * G_q * G_{CG} * C_{CG} * d \quad [N] \quad (3.29)$$

$$Q_W = q_h * G_q * G_{CG} * C_{CG} * d = 0,4 * 960 * 1 * 0,6 * 1,1 * 0,0146 = 3,7[N]$$

$$m = \frac{\sqrt{5,77^2 + 3,7^2}}{5,77} = 1,19$$

Vento extremo (Primavera)

$$Q_W = 1,4 * 960 * 1 * 0,6 * 1,1 * 0,0146 = 12,95[N]$$

$$m = \frac{\sqrt{5,77^2 + 12,95^2}}{5,77} = 2,46$$

Sem vento (verão)

$$Q_W = 0 \quad [N]$$

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

Condutor:

Vento reduzido (Inverno)

$$Q_W = q_h * G_q * G_{CG} * C_{CG} * d = 0,4 * 960 * 1 * 0,6 * 1 * 0,0235 = 5,4 \quad [N]$$

$$m = \frac{\sqrt{11,9^2 + 5,4^2}}{11,9} = 1,1$$

Vento extremo (Primavera)

$$Q_w = 1,4 * 960 * 1 * 0,6 * 1 * 0,0235 = 18,91[N]$$

$$m = \frac{\sqrt{11,9^2 + 18,91^2}}{11,9} = 1,88$$

Sem vento (verão)

$$Q_w = 0 [N]$$

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

3.4.3. 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.

$$P = \frac{t_{\theta i^{\circ}C} * \sigma}{\omega} \quad (3.30)$$

$$f = \frac{\omega * L * L_1}{8 * \sigma * t_{\theta^{\circ}C}} \quad (3.31)$$

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.

Cabo de Guarda:

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

Aplica-se a equação dos estados:

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d * E} - \frac{m_{\theta_i}^2 * w^2 * L_{medio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_{máx}}{\alpha_d * E} - \frac{m_k^2 * w^2 * L_{medio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{máx}^2} \quad (3.32)$$

$$15 + \frac{94,05}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1^2 * 5,77^2 * 300^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 127,2^2 * 94,05^2} =$$

$$= 75 + \frac{t_{máx}}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1^2 * 5,77^2 * 300^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 127,2^2 * t_{máx}^2}$$

$$t_{máx} = 69 [N/mm^2]$$

Tração:

$$T = t_{máx} * \sigma = 69 * 127,2 = 8776,8 [N] \quad (3.33)$$

Parâmetro da catenária:

$$P = \frac{t_{\theta_i^{\circ}\text{C}} * \sigma}{\omega} = \frac{8776,8}{5,77} = 1516,75 [m]$$

Flecha máxima:

$$f = \frac{11,9 * 300^2}{8 * 127,2 * 69} = 5,97 [m]$$

Cabo de Condutor:

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

Aplica-se a equação dos estados:

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d * E} - \frac{m_{\theta_i}^2 * w^2 * L_{medio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_{máx}}{\alpha_d * E} - \frac{m_k^2 * w^2 * L_{medio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{máx}^2}$$

$$15 + \frac{60,38}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1^2 * 11,9^2 * 300^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * 60,38^2} =$$

$$= 75 + \frac{t_{máx}}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1^2 * 11,9^2 * 300^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * t_{máx}^2}$$

$$t_{máx} = 47 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Tração:

$$T = t_{máx} * \sigma = 47 * 326,6 = 15350,2 \text{ [N]}$$

Parâmetro da catenária:

$$P = \frac{t_{\theta_i^c} * \sigma}{\omega} = \frac{15350,2}{11,90} = 1284,21 \text{ [m]}$$

Flecha máxima:

$$f = \frac{11,9 * 300^2}{8 * 326,6 * 47} = 8,76 \text{ [m]}$$

Com a localização final dos apoios escolhidos, assim como as suas alturas e definidos os cantões de acordo com o desenho em CAD, 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:

$$L_{medio} = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i L_i}} \quad (3.34)$$

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

Vão AP16 - AP17: $L = 237,82$ [m]

Vão AP17 - AP18: $L = 187,31$ [m]

$$L_{medio} = \sqrt{\frac{237,82^3 + 187,31^3}{237,82 + 187,31}} = 217,02 \text{ [m]}$$

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

3.4.4. Apoios

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

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

- FB30ADN para apoios de alinhamento, com diferentes alturas totais;
- FB165ADN para situação de ângulo, apoio enforcado e fim de linha.

3.4.5. Verificação da Estabilidade dos Apoios

3.5.1.1. Apoio Fim de Linha (DE)

Os cálculos demonstrados são relativos ao apoio nº1.

Hipótese 1 (caso de carga 1a)

Cabo de Guarda

- Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L1 + L2}{2} \right) \omega_c + \omega_{isol}$$

$$F_v = \left(\frac{0 + 109,06}{2} \right) * 1,5 * 5,77 + 0 = 472$$

Cabo Condutor

- Eixo vertical

$$F_v = \left(\frac{L1 + L2}{2} \right) \omega_c + \omega_{isol}$$

$$F_v = \left(\frac{0 + 109,06}{2} \right) * 1,5 * 5,77 + 0 = 472$$

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.

2.1.1.2. 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):

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)

Apoios de 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.

Apoios de 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.

2.1.1.2. 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):

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)

- Apoios de 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.

Apoios de 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.

Capítulo 4

Conclusões e Desafios

4.1 - 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.

A elaboração do projeto mostrou-se multidisciplinar por todo o estudo, gestão, integração e monitorização que a sua execução requereu.

Além das demais qualidades técnicas adjacentes a todo o trabalho, sublinha-se o préstimo dado pela aplicação da Norma Europeia EN 50341-1 e os seus aspetos normativos nacionais. A introdução dos seus conceitos, em substituição do Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão, dota o mestrando de uma ferramenta notável, indispensável à continuidade do seu percurso na área em questão.

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.

Por fim, visto que o core da empresa é o dimensionamento de apoios metálicos, entre eles os tubulares, substituíram-se os apoios reticulados por

equivalente em tubular e foi feita uma nova simulação no PLS-CADD e posterior *report*.

Com os resultados obtidos no PLS-CADD para ambas as soluções, foi elaborada uma análise técnico-económica.

4.2 - Desafios

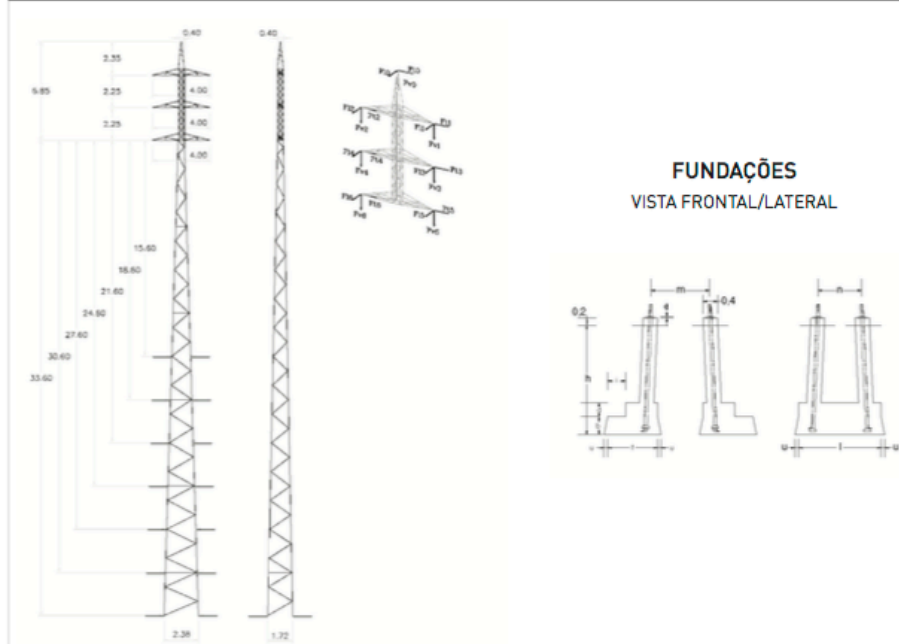
Como desafio futuro, seria de grande utilidade a elaboração de um projeto de uma linha aérea segunda a norma EN 50341-1, com a demonstração de todos os casos de carga possíveis.

Referências

- [1] R. J. F. V. Fernandes, “Guia Técnico do Projetista de Linhas Aéreas de Transporte de Energia”.
- [2] J. R. Ferreira, “Linhas de Transmissão - Apontamentos de Sistemas Elétricos de Energia”.
- [3] L. M. Checa, Linhas de Transporte de Energia, Barcelona, 1979.
- [4] P. R. Labegalini, J. A. Labegalini, R. D. Fuchs e M. T. d. Almeida, Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão, 1992.
- [5] H. Leite, “Apontamento de RTDI - Elaboração de Projetos de Linhas Aéreas de Energia,” Porto, 2008/09.
- [6] S. -. M. Irmãos Silva, “Metalogalva,” [Online]. Available: <http://www.metalogalva.pt/pt/>. [Acedido em 2016].
- [7] CENELEC, “EN 50341-1 - Overhead electrical lines exceeding AC 45kV,” 2001.
- [8] CENELEC, “EN 50341-3-17 - Aspetos Normativos Nacionais para Portugal,” 2001.
- [9] F. Kiessling, P. Nefzger, U. Kaintzyk e J. F. Nolasco, Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction, Springer, 2003.
- [10] F. Távora, Linhas de Trasmissão de Energia Elétrica.
- [11] A. M. e. Moura, “Cálculo elétrico e mecânico - Apontamento Teóricos”.
- [12] S. -. S. Condutores Elétricos, Guia Técnico.

Anexos

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.



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

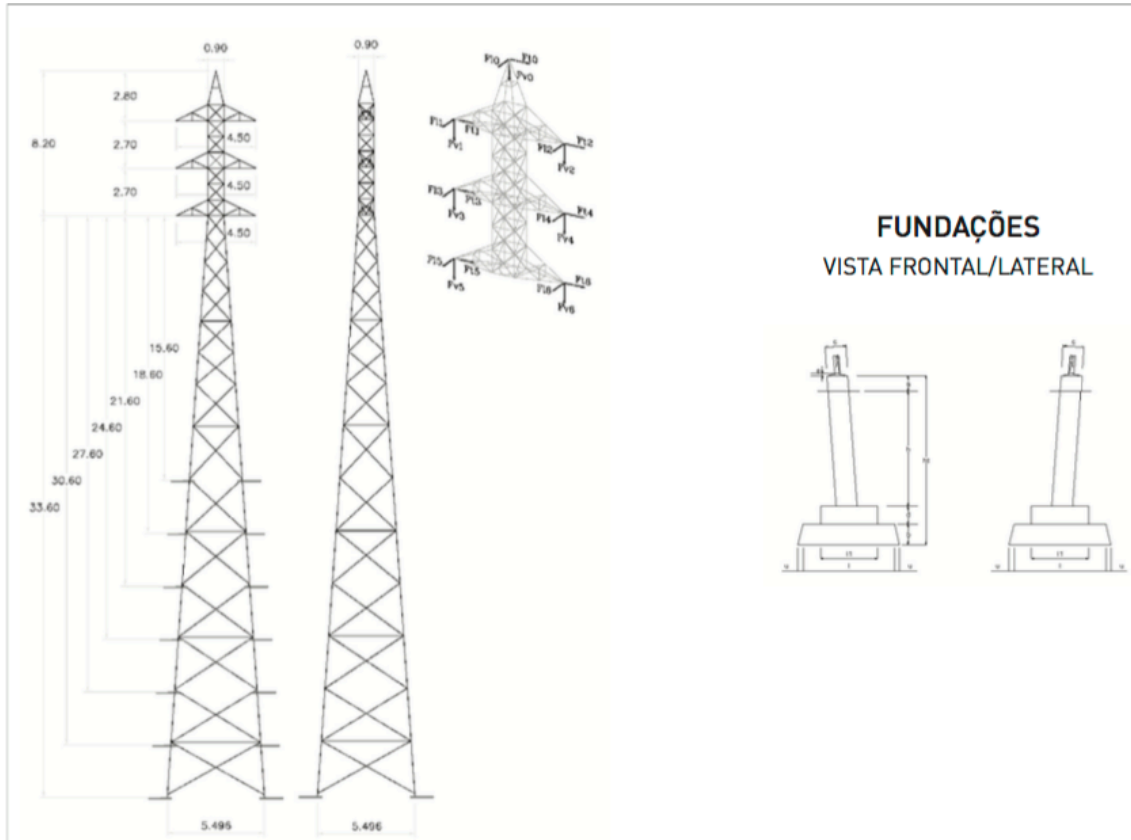
ALTURA [m]	CABOS	CASO DE CARGA	VENTO	Ft0	Fv0	Fl0	Ft1 Ft2	Fv1 Fv2	Fl1 Fl2	Ft3 Ft4	Fv3 Fv4	Fl3 Fl4	Ft5 Ft6	Fv5 Fv6	Fl5 Fl6	
33	ACSR 130 + ACSR 325	1a	Trans.	3642	3464	0	5719	7840	0	5581	7840	0	5438	7840	0	
							5719	7840	0	5581	7840	0	5438	7840	0	
		5b	S/vento	0	3464	520	0	7840	817	0	7840	797	0	7840	777	777
							0	7840	817	0	7840	797	0	7840	777	
		1a	Long.	0	3464	463	0	7840	1216	0	7840	1187	0	7840	1157	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	846
							0	7841	899	0	7841	873	0	7841	846	
		1a	Long.	0	3465	619	0	7841	1201	0	7841	1166	0	7841	1130	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. [m ³]	BETÃO SEM COFRAGEM. [**] [m ³]	BETÃO COM COFRAGEM [**] [m ³]
daN/m ²	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
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
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
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
1600	15	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 74°).
 [**] Betão do tipo C20/25.

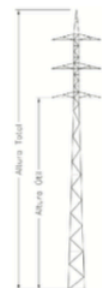
POSTE TIPO FB165ADN



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 (Ø)			
				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.



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

ALTURA (m)	CABOS	CASO DE CARGA	VENTO	Ft0	Fv0	Ft0	Ft1 Ft2	Fv1 Fv2	Ft1 Ft2	Ft3 Ft4	Fv3 Fv4	Ft3 Ft4	Ft5 Ft6	Fv5 Fv6	Ft5 Ft6
33	ACSR 130 + ACSR 160	1a	Transv.	2319	2020	21840	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
		5a Rot. C. Sup.	S/vento	0	2020	21840	0	1290	0	0	2230	20160	0	2230	20160
		5a Rot. C. Med.	S/vento	0	2020	21840	0	2230	20160	0	1290	0	0	2230	20160
		5a Rot. C. Inf.	S/vento	0	2020	21840	0	2230	20160	0	2230	20160	0	2230	20160
		1a	Long.	0	2020	15870	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
		5a Rot. C. Gua.	S/vento	0	1010	0	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
		5a Rot. C. Med.	S/vento	0	2021	21840	0	2230	20160	0	1290	0	0	2230	20160
		5a Rot. C. Inf.	S/vento	0	2021	21840	0	2230	20160	0	2230	20160	0	1290	0
		1a	Long.	0	2021	15400	0	2230	14777	0	2230	15069	0	2230	15378

ALTURA (m)	CABOS	CASO DE CARGA	VENTO	Ft0	Fv0	Ft0	Ft1 Ft2	Fv1 Fv2	Ft1 Ft2	Ft3 Ft4	Fv3 Fv4	Ft3 Ft4	Ft5 Ft6	Fv5 Fv6	Ft5 Ft6
33	ACSR 130 + ACSR 325	1a	Transv.	1874	3464	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
		5a Rot. C. Gua. Lado A	S/vento	5933	1732	14636	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
		5a Rot. C. Med. Lado A	S/vento	15118	3464	0	28347	7839	0	28347	7839	0	28347	7839	0
		5a Rot. C. Inf. Lado A	S/vento	15118	3464	0	28347	7839	0	28347	7839	0	28347	7839	0
		5a Rot. C. Gua. Lado B	S/vento	5399	1732	-14636	28347	7839	0	28347	7839	0	28347	7839	0
		5a Rot. C. Sup. Lado B	S/vento	15118	3464	0	10124	6055	27442	28347	7839	0	28347	7839	0
		5a Rot. C. Med. Lado B	S/vento	15118	3464	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	28347	7839	0
		1a	Long.	9010	3464	596	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
		5b	S/vento	2700	3465	7318	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
		5a Rot. C. Sup. Lado A	S/vento	15118	3465	0	10124	6056	27442	28347	7841	0	28347	7841	0
		5a Rot. C. Med. Lado A	S/vento	15118	3465	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
		5a Rot. C. Gua. Lado B	S/vento	5399	1732	-14636	28347	7841	0	28347	7841	0	28347	7841	0
		5a Rot. C. Sup. Lado B	S/vento	15118	3465	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
		5a Rot. C. Inf. Lado B	S/vento	15118	3465	0	28347	7841	0	28347	7841	0	28347	7841	0
		1a	Long.	19152	3465	0	34546	7841	0	34338	7841	0	34118	7841	0

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 β [°]												ESCAV. [m3]	BETÃO [**] [m3]
daN/m²	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
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
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
1600	15	FB95ADN/15	0.30	0.40	0.40	0.35	0.05	2.55	3.60	1.95	1.25	0.10	50.838	10.741
		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
1600	15	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 β é o ângulo definido no quadro 5.1 do RSL/EAT (artigo 74º).
 [**] Betão do tipo C20/25.