FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Análise e Otimização de Projetos de Linhas Aéreas AT e MAT

Tiago Rafael Martins Mendes

VERSÃO FINAL

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Orientador: Professor Doutor António Machado e Moura
Co-orientador: Eng. Rui Carvalho

23 de Abril de 2020

© Tiago Mendes, 2020

Resumo

A presente dissertação foi efetuada em ambiente empresarial na PROEF. No departamento de linhas de transporte de energia havia a necessidade de desenvolver uma ferramenta de cálculo que permitisse de forma expedita obter a tabela de regulação dos condutores.

De modo a desenvolver essa ferramenta, primeiramente foram explorados os elementos constituintes de uma linha de transmissão de energia, sendo analisadas particularmente as caraterísticas próprias das linhas MAT (Muito Alta Tensão). Posteriormente, foram analisados os pressupostos teóricos relativos ao cálculo mecânico, com especial enfoque no cálculo de flechas por ser o tema central desta dissertação. O método usado no desenvolvimento da ferramenta de cálculo é descrito e analisado, sendo igualmente descrita a forma como a informação inserida é processada de modo a obter os dados da tabela de regulação.

Posteriormente foram analisados os resultados, de forma a serem validados. Nesse âmbito, foram confrontados os resultados obtidos na ferramenta de cálculo com dados relativos a linhas previamente implementadas. Os resultados desta análise mostram que a ferramenta desenvolvida retorna valores válidos e satisfatórios, que cumprem as tolerâncias exigidas.

Para complementar o trabalho desenvolvido, e perceber de que forma os valores obtidos são utilizados no terreno, foi explorado o método de regulação dos condutores conforme regulamentado pela REN (Redes Energéticas Nacionais) .

Palavras-chave: Linhas Aéreas, Muito Alta Tensão, Flecha, *Offset*, Regulação de Condutores.

Abstract

The execution of this dissertation project took place during the graduate traineeship at PROEF where there was a necessity to develop a tool that could easily calculate the sag and tension of the conductor in a VHV (very high voltage) overhead power line.

To develop this tool, firstly were explored the elements that constitute a power line, particularly in very high voltage cases.

Then, it was analysed the theory behind the mechanical solicitation to the power line tower, and especially regarding conductor sagging. The method used to develop the calculating tool is explored in the next chapter, explaining how the inserted information is processed to return the desired data. To validate the values obtained in the developed tool, a comparison is made between the data returned by the tool and data from previous lines that were constructed by PROEF. This analysis showed that the obtained values were valid and satisfactory to be used.

To complement the developed dissertation and explain how the obtained data is used in the field, the method to sagging and regulation of the conductor was explored based on REN's regulation.

Keywords: Overhead Power Line, Very High Voltage, Conductor Sag, Offset, Conductor Regulation.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, um forte agradecimento ao meu orientador Prof. Dr. António Machado e Moura, não apenas pela confiança depositada e pelo incansável esforço que possibilitou a realização deste estágio, mas também por todo o conhecimento e inspiração que transmitiu durante o meu percurso académico.

Ao meu orientador na PROEF, Eng. Rui Carvalho por toda a disponibilidade, atenção e esforço dispensados no meu trabalho, mesmo quando o tempo era muito escaço e a responsabilidade imensa. À PROEF pela forma como fui acolhido, em particular aos colegas do departamento de Redes de Transporte, que facilitaram toda a integração. Ao meu colega e futuro Eng. Pedro Torres, pela disponibilidade e prontidão que sempre mostrou quando alguma ajuda era necessária. Pela aprendizagem que tive nestes meses, sinto que não podia ter escolhido melhor instituição para estagiar.

A toda a minha família, em particular aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada um enorme agradecimento pela paciência e encorajamento. Não são anos fáceis na vida de um estudante e sozinho não seria possível.

A todos os meus os amigos por todo o apoio e motivação.

Tiago Mendes

"If you are not willing to risk the unusual,
you will have to settle for the ordinary."

Jim Rohn

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 Enquadramento da Dissertação . . . 1
- 1.2 Motivação e Objetivos . . . 1
- 1.3 Estrutura da Dissertação . . . 2

2 Conceitos Gerais Sobre Linhas Aéreas **5**
- 2.1 Introdução . . . 5
- 2.2 Classificação das linhas aéreas . . . 5
- 2.3 Elementos constituintes de uma linha aérea de muito alta tensão . . . 6
  - 2.3.1 Apoios . . . 6
  - 2.3.2 Conjuntos sinaléticos . . . 8
  - 2.3.3 Isoladores . . . 9
  - 2.3.4 Condutores . . . 11
  - 2.3.5 Ligações à terra . . . 12
- 2.4 Resumo . . . 14

3 Cálculos de um Projeto de uma Linha Aérea de Muito Alta Tensão **15**
- 3.1 Introdução . . . 15
- 3.2 Cálculo mecânico . . . 16
  - 3.2.1 Estados Atmosféricos . . . 16
  - 3.2.2 Ação do gelo . . . 17
  - 3.2.3 Ação do vento . . . 17
  - 3.2.4 Coeficiente de redução . . . 18
  - 3.2.5 Coeficiente de forma . . . 18
  - 3.2.6 Pressão dinâmica do vento . . . 18
  - 3.2.7 Peso do próprio cabo . . . 19
  - 3.2.8 Forças exercidas sobre um condutor . . . 19
  - 3.2.9 Coeficiente de sobrecarga . . . 19
  - 3.2.10 Vão crítico . . . 20
  - 3.2.11 Vão Equivalente . . . 21
  - 3.2.12 Estado mais desfavorável . . . 21
  - 3.2.13 Equação dos estados . . . 22
  - 3.2.14 Determinação de t_i . . . 23
  - 3.2.15 Determinação do parâmetro P da curva e catenária . . . 23
  - 3.2.16 Determinação da flecha máxima . . . 25
  - 3.2.17 Situação de arrancamento . . . 28
  - 3.2.18 Desvio transversal da cadeia de isoladores . . . 28
  - 3.2.19 Offset . . . 29

3.2.20 Distâncias regulamentares a cumprir . . . 31
3.3 Resumo . . . 31

4 Desenvolvimento da ferramenta de cálculo de flechas **33**
4.1 Metodologia a usar . . . 33
4.2 Cálculo da flecha de montagem . . . 37
4.2.1 Exemplo númerico de cálculo da flecha de montagem . . . 39
4.3 Funcionamento da ferramenta de cálculo . . . 42
4.4 Resumo . . . 44

5 Comparação e análise de resultados **47**
5.1 Análise do caso 1 . . . 47
5.2 Análise do caso 2 . . . 51
5.3 Análise do caso 3 . . . 53
5.4 Tolerâncias admitidas no processo de regulação . . . 57
5.5 Conclusões da análise de resultados . . . 57

6 Processo de regulação dos condutores **59**
6.1 Espiamento dos apoios . . . 59
6.2 Desenrolamento de condutores . . . 60
6.3 Regulação . . . 61
6.3.1 Ângulo de visada . . . 62
6.3.2 Marcação do Offset . . . 63
6.4 Fixação dos condutores . . . 63

7 Conclusões e Trabalhos Futuros **67**
7.1 Conclusões . . . 67
7.2 Desenvolvimentos Futuros . . . 69

A Códigos desenvolvidos na ferramenta de cálculo. **71**
A.1 Códigos desenvolvidos na ferramenta de cálculos . . . 71

B Análise de resultados **75**
B.1 Análise dos resultados para cabo de guarda do tipo Dorking . . . 75
B.2 Análise dos resultados para cabo de condutor do tipo Bear . . . 75

Referências **79**

Lista de Figuras

2.1 Apoio metálico de uma linha de 400kV da REN [1] 6
2.2 Esquema representativo dos esforços solicitados a um apoio metálico através de um isolador. [2] 8
2.3 Constituição de um Isolador de Compósito [3] 10
2.4 Cadeia de isoladores em suspensão (esquerda), cadeia de isolamento em amarração (direita) [4] 11
2.5 Representação do cabo ACSR [5] 12
2.6 Esquemas de ligação à terra nos postes metálicos [1] 13

3.1 Forças exercidas sobre um condutor [6] 19
3.2 Fluxograma de apoio à determinação do estado atmosférico mais desfavorável . 22
3.3 Representação gráfica da variação do parâmetro da catenária 24
3.4 Distâncias consideradas no calculo de flechas em situação de desnível. [7] 26
3.5 Distância de segurança a assegurar na situação de flecha máxima. [8] 26
3.6 Curva descrita por um condutor suspenso em A e B com diferente altura. [9] . . . 27
3.7 Situação de arrancamento. [10] 28
3.8 Desvio transversal da cadeia de isoladores [11] 29
3.9 Desvio transversal da cadeia de isoladores [11] 30
3.10 Desvio transversal da cadeia de isoladores [10] 30

4.1 Excerto do desenho de perfil de uma linha. 34
4.2 Representação gráfica da curva representativa do comportamento de um condutor segundo a catenária. [12] 37
4.3 Cálculo do *offset* e fator de correção da flecha para suspensão em roldanas num cantão. 40
4.4 Interface da ferramenta de cálculo de mudança de estado atmosférico de forma manual 42
4.5 Forma de armazenamento dos dados relativos aos cabos condutores e de guarda . 43
4.6 Forma de seleção dos dados relativos aos cabos condutores e de guarda 43
4.7 Fluxograma dos cálculos efetuados. 45
4.8 Fluxograma do método de operação da ferramenta de cálculo. 45

5.1 Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada. 48
5.2 Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada. 52
5.3 Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada. 55

5.3 Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada. 56

6.1 Apoio de amarração com os cabos de guia a serem passados em roldanas. 60
6.2 Conjunto de guincho e freio [10] 61
6.3 Roldana colocada num apoio de amarração durante a passagem dos condutores . 62
6.4 Conjunto de guincho e freio [10] 63
6.5 Representação das medidas consideradas durante a marcação do Offset[10] . . . 64
6.6 Processo de cravação dos condutores obra. 64
6.7 Pormenor de medição em obra da dimensão da vareta após ser cravado o condutor 65

7.1 Método sugerido para nova forma de marcar offset. [10] 69

A.1 Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para auxiliar o cálculo dos diferentes estados atmosféricos através do *Solver*. 71
A.2 Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para efetuar os cálculos do *offset* e correção de flechas para roldanas. 72
A.2 Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para efetuar os cálculos do *offset* e correção de flechas para roldanas. 73
A.3 Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para efetuar os cálculos do vão equivalente. 74

B.1 Comparação de resultados obtidos para cabo de guarda na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada. 76
B.2 Comparação de resultados obtidos para cabo condutor na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada. 77

Lista de Tabelas

3.1 Temperaturas de refêrencia conforme o estado atmosférico 17
3.2 Coeficiente de forma de condutores nus e cabos de guarda 18
3.3 Variação da Pressão dinâmica do vento com a altura do apoio 18
3.4 Distâncias mínimas de segurança usadas nas linhas MAT pela REN. [1] 31

4.1 Cálculo do *offset* e fator de correção da flecha para suspensão em roldanas. [13] . 36
4.2 Características técnicas do cabo ACSR 595 Zambeze da Cabelte 39
4.3 Características do vão em análise 39
4.4 Caraterísticas do cantão em análise 40

Abreviaturas e Símbolos

ACSR	Aluminium conductor steel-reinforced cable
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
MAT	Muito Alta Tensão
PLD-CADD	Power Line Systems - Computer Aided Design and Draft
REN	Redes Energéticas Nacionais
RNT	Rede Nacional de Transporte de Electricidade
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão
kV	Unidade de Tensão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento da Dissertação

As linhas aéreas de transporte de energia constituem um elemento essencial do Sistema Elétrico de Energia português, uma vez que permitem realizar o transporte de energia elétrica desde os grandes centros produtores até aos grandes centros consumidores. Quanto mais densa for a rede de transporte mais robusto será o sistema. Com a crescente importância das fontes renováveis a produção é cada vez mais dispersa e distante dos pontos de grande consumo. Adicionalmente, a operação da rede de forma segura e económica está dependente da interligação a outros mercados, no caso ao mercado ibérico de energia. Também por isso a rede nacional de transporte de energia está em constante expansão e melhoramento. [14]

Para assegurar a viabilidade dos novos projetos, é necessário que as linhas aéreas sejam devidamente projetadas e executadas. As linhas estão sujeitas a condições atmosféricas que em alguns locais podem ser muito adversas. Um incorreto dimensionamento ou implementação pode resultar em danos de elevada gravidade. Por essa razão a este tipo de instalação impõe-se o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão, sendo que em muitos campos a REN adota medidas de segurança ainda mais restritivas que as contempladas no RSLEAT. [15]

Uma das condições de segurança mais importantes é distância mínima a que os condutores podem estar dos obstáculos que cruzam. É crucial para a segurança de pessoas e bens que não haja uma aproximação excessiva das zonas em tensão, sendo que para isso o estudo do comportamento dos condutores, em particular da flecha do cabo é de grande importância. [15]

1.2 Motivação e Objetivos

A dissertação foi efetuada em ambiente empresarial na PROEF. Sediada na Trofa, a PROEF é uma empresa de engenharia e serviços com mais de 35 anos no mercado nacional e internacional. Conta com um quadro de colaboradores uma vasta experiência na execução de obras de grande

complexidade e envergadura principalmente na área da energia e telecomunicações. Particularmente no departamento de redes de transporte e distribuição, são executadas obras de construção de novas linhas, melhoramento, monitorização e trabalhos em tensão. O departamento conta com uma equipa de engenheiros com uma vasta experiência que monitorizam e articulam com os responsáveis de obra durante a execução dos trabalhos. A equipa de engenheiros é também responsável por fornecer ao terreno todos os dados necessários para a execução da obra.

Quando o processo chega ao departamento todo o projeto já se encontra efetuado, e é fornecida a localização dos apoios e o perfil da linha. Cabe ao topógrafo e aos engenheiros analisar se a localização dos apoios que consta no projeto é viável. Não raras vezes quando é efetuada essa verificação surgem condicionantes que impedem a implementação do apoio no local definido na fase de projeto. Nestes casos é necessário fazer uma alteração ao projeto que pode em certos casos levar à alteração do tipo de apoio e comprimento do vão. Por essa razão deve haver no departamento capacidade de efetuar cálculo mecânico, onde se destaca o cálculo de flechas dos condutores.

O programa usado anteriormente para efetuar esse cálculo estava obsoleto e não apresentava os resultados com o rigor pretendido. Por essa razão, era necessário no departamento uma ferramenta de calculo que providenciasse de forma expedita a flecha, tração e *offset* para as diferentes temperaturas que se podem verificar nos dias em que for efetuada a regulação e fixação dos condutores. O desafio lançado pela empresa foi o desenvolvimento de uma ferramenta que colmatasse esta necessidade.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende, numa primeira fase, analisar os elementos constituintes de uma linha aérea de muito alta tensão, de forma a entender a sua importância no sistema e os desafios que apresentam na fase de construção. Esta análise consta no capítulo 2.

De seguida, no capítulo 3, são analisados os métodos e fases de calculo mecânico habitualmente usados e que servem de base teórica para a ferramenta desenvolvida nos capítulos seguintes. É dado particular enfoque ao cálculo da flecha dos condutores sendo também referidas as distâncias regulamentares que são seguidas nestes projetos.

No capítulo 4, é retratado o desenvolvimento da ferramenta de cálculo, sendo explorado de forma profunda os pressupostos teóricos e os métodos usados. Consta também a forma de funcionamento da ferramenta e um exemplo numérico de um vão real.

No capítulo 5, é feita uma análise dos resultados obtidos com a ferramenta desenvolvida, tendo como base de comparação os valores reais de outras linhas já efetuadas cujos dados foram fornecidos pelo software de projeto PLS-CADD.

No capítulo 6, é explorado o processo de regulação dos condutores, desde a passagem do cabo condutor à fixação definitiva. Este capítulo permite compreender a importância dos valores anteriormente calculados e de que forma são utilizados no terreno.

No capítulo 7 constam as conclusões retiradas do trabalho realizado e os trabalhos futuros que podem ser relevantes. As referências bibliográficas e os anexos surgem no final do documento.

Capítulo 2

Conceitos Gerais Sobre Linhas Aéreas

2.1 Introdução

As linhas aéreas são elementos de importância vital no sistema elétrico de energia, e o seu projeto e exploração obedecem ao Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão. Este documento contém regulamentação quanto às linhas de alta e muito alta tensão , mas também para linhas aéreas de média tensão. Neste sentido, o estudo que se segue é válido também para este nível de tensão. Adicionalmente são tecidas considerações sobre condicionantes impostas nos regulamentos da REN quanto às linhas de muito alta tensão, uma vez que o regulamento contempla a utilização de materiais que não são viáveis nem tecnicamente, nem economicamente. Para a elaboração de um projeto de uma linha aérea importa conhecer os principais elementos constituintes. Por esta razão, neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos essenciais.

2.2 Classificação das linhas aéreas

As linhas aéreas são classificadas no Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão conforme a tensão nominal para que são projetadas. As linhas de 1ª classe englobam as instalações cuja tensão nominal não ultrapassa os 1000 V em corrente alternada ou os 1500 V em corrente contínua, correspondendo assim, às linhas de Baixa Tensão. A 2ª classe refere-se às instalações cuja tensão nominal é superior à 1º classe mas inferior a 40000 V, que corresponde às linhas de Média Tensão. Finalmente, as linhas de 3º classe dizem respeito às restantes linhas em que a tensão nominal é igual ou superior a 40 000 V, ou seja, as linhas de Alta e Muito Alta Tensão. [1]

Desta feita, considerando que as linhas em análise nesta dissertação são de MAT, correspondem a linhas de 3ª classe, importa por isso atentar à regulamentação desta classe.

[1] Capítulo I, Secção III, Artigo 3º do RSLEAT

2.3 Elementos constituintes de uma linha aérea de muito alta tensão

2.3.1 Apoios

Os principais elementos de uma linha aérea de muito alta tensão são os apoios, constituídos pelo poste, a respetiva armação e fundação, os isoladores e os condutores. Associados a estes elementos podem ainda ter-se em consideração acessórios de fixação, balizagem e a sinalização avifauna. Além destes, os sistemas de ligação à terra são um aspeto construtivo essencial para o funcionamento e segurança da linha. Segundo o RSLEAT, os apoios de uma linha aérea podem ser de aço, betão armado ou madeira.[2]

Na muito alta tensão, são utilizados apoios de aço, normalmente designados por apoios metálicos, ilustrados na Figura 2.1. Os apoios metálicos são constituídos por estruturas reticuladas em aço construídas com cantoneiras de abas iguais e chapas ligadas entre si por parafusos.[3] Estes apoios apresentam caraterísticas distintas que lhe conferem vantagem em relação a diversos aspetos. A facilidade de transporte e altura são os principais. As torres treliçadas ou apoios metálicos são apoios com maior altura do que os de betão armado, o que se pode traduzir numa vantagem, na medida em que é garantida uma maior distância ao solo. Em zonas urbanas com condicionalismos de espaço ao nível do solo poderão ser usados também apoios tubulares. [1]



Figura 2.1: Apoio metálico de uma linha de 400kV da REN [1]

[2]Capítulo V, Secção I, Artigo 51º do RSLEAT
[3]Capítulo 2- REN - LINHAS DA RNT PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE MAT ET-PLN.01

2.3.1.1 Classificação dos apoios

De acordo com o disposto no artigo 4.º do RSLEAT os apoios de umas linhas aéreas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Apoios de alinhamento, que correspondem aos apoios situados num troço retilíneo da linha;
- Apoios de ângulo, que correspondem aos apoios situados num ângulo da linha;
- Apoios de derivação em alinhamento/ângulo, que correspondem aos apoios em alinhamento/ângulo onde se estabelecem uma ou mais derivações;
- Apoios de reforço em alinhamento/ângulo, que correspondem aos apoios destinados a suportarem esforços longitudinais unilateralmente. Desta forma reduzem as consequências resultantes de uma possível rotura de condutores;
- Apoios fim de linha, que correspondem aos apoios capazes de suportar a totalidade dos esforços que os condutores lhe transmitem de um só lado da linha.

2.3.1.2 Fundações

As fundações dos diversos tipos de apoios são projetadas tendo em conta as características previsíveis dos terrenos onde irão ser implantados os apoios. O seu dimensionamento é por sua vez dependente das condições geotécnicas do terreno onde são implantadas. No dimensionamento das fundações aplicam-se as disposições aplicáveis da EN 50341[4] e do RSLEAT. Em condições normais as fundações previstas são do tipo convencional e são constituídas por quatro maciços de betão independentes, com sapata em degraus, chaminé prismática e armação. Neste sentido, as fundações são dimensionadas para os mais elevados esforços que lhe poderão ser transmitidos pela estrutura metálica considerando todas as combinações regulamentares e definidas para condições "médias" de terreno. Quando as características de terreno o justificarem ou se tratar de apoios tubulares serão projetadas fundações especiais a estudar caso a caso. [1]

2.3.1.3 Esforços

A escolha de um apoio é um processo que deve ter em conta diversos aspetos. Tem de atender à sua altura, essencial para controlar a distância dos condutores ao solo, mas também à sua robustez, que é traduzida pela capacidade de o apoio suportar diferentes esforços que lhe são solicitados. As ações que se fazem sentir sobre os apoios podem ser divididas segundo os eixos cartesianos xyz. Podem considerar-se esforços longitudinais (F_x) os esforços mecânicos aplicados ao apoio pelos condutores dos dois vãos adjacentes. Os transversais (F_y) resultam quer da ação do vento sobre os apoios, quer do desvio transversal da cadeia de isoladores. Os esforços verticais (F_z) resultam do peso dos condutores e possíveis depósitos de gelo ou neve. [6]

A ação total sobre os apoios é resultado da associação de todos os esforços mencionados.

Na Figura 2.2 é possível verificar os esforços solicitados ao apoio através de um isolador.

[4] EN 50341, European Standard, Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV - Part 1: General requirements - Common specifications

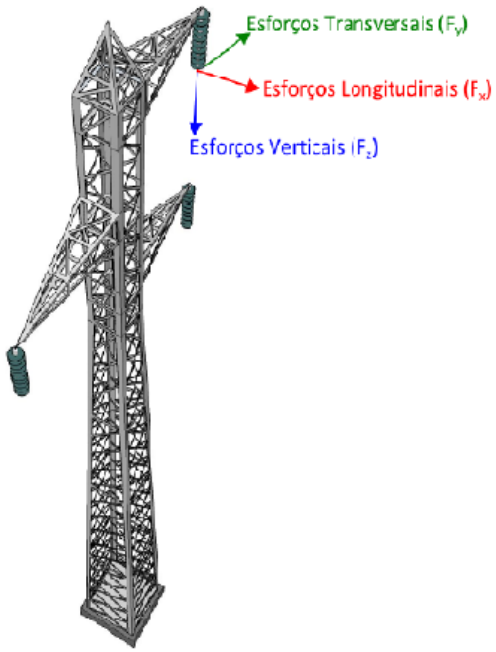


Figura 2.2: Esquema representativo dos esforços solicitados a um apoio metálico através de um isolador. [2]

2.3.2 Conjuntos sinaléticos

Cada apoio tem de possuir sinalização claramente visível do solo. Em particular deverão existir os seguintes elementos:

• Chapa de sinalização ou de advertência com o texto "Perigo de Morte" e o número de ordem do apoio na linha;

• Chapa de identificação com o nome (sigla) da linha, e nº de telefone do departamento responsável;

• Os apoios localizados junto de vias de comunicação e zonas urbanas, deverão ter ainda placas sinaléticas com o logotipo da empresa responsável;

• Para permitir inspeções aéreas, devem ser colocadas de dez em dez apoios, na parte superior, as chapas com o número de ordem do apoio. [6]

2.3.2.1 Sinalização das linhas aéreas

As linhas aéreas, por serem estruturas de grande envergadura, devem ser sinalizadas. Esta sinalização é particularmente importante em linhas de AT e MAT, devido à grande dimensão dos apoios. Dependendo da localização e da dimensão, pode também ser exigida essa sinalização em linhas de MT. A sinalização indicada pelo Instituto Nacional de Aviação Civil consiste na colocação de esferas de sinalização, que pode ser de cor branca ou vermelha sendo escolhida a

que apresente maior contraste com o meio ambiente ou, quando se justificar, podem ser usadas alternadamente. Em determinados locais pode também ser necessário sinalizar os apoios recorrendo à pintura dos mesmos com as cores referidas anteriormente. Este tipo de medidas são de balizagem diurna, se for necessária balizagem noturna são colocados dispositivos luminosos nos apoios. O Instituto Nacional de Aviação Civil regulamenta a utilização de este tipo de dispositivos de sinalização e indica as caraterísticas técnicas que devem apresentar.

Em certas zonas geográficas são necessários outros tipos de acessórios para proteção da avifauna. Alguns procedimentos a adotar neste sentido são a aplicação de dispositivos salva-pássaros, dispositivos anti-nidificação e anti-poiso e plataformas para ninhos. [16]

2.3.3 Isoladores

Os isoladores são os elementos da linha que fixam os condutores aos apoios, possuindo um corpo isolante com um ou mais dispositivos de fixação. Estes elementos evitam a passagem de corrente dos condutores em tensão para os apoios que suportam a linha. [6]

Essencialmente, os isoladores deverão apresentar dimensões e formas apropriadas ao ambiente em que vão ser utilizados, tendo em conta os níveis de poluição. Devem também atender às tensões elétricas a que vão estar sujeitos, aos esforços mecânicos que terão de suportar em exploração normal e a outras ações físico-químicas que as condições circundantes venham a exercer sobre eles. [17]

Os isoladores das linhas aéreas podem ser rígidos ou em cadeia. Os isoladores rígidos são fixos rigidamente à armação do apoio, garantindo por si só as condições de isolamento do condutor. No entanto, a sua utilização é muitas vezes desaconselhada para tensões superiores a 60 kV, devido às dificuldades de montagem e à sua fragilidade. Além disso, uma vez verificado um defeito no seu isolamento, é necessário trocar todo o isolador. [17]

Os isoladores em cadeia são fixos articuladamente à armação do apoio, garantindo por si só, ou associado a outros idênticos, em forma de cadeia, as condições de isolamento do condutor. Os isoladores em cadeia, tal como os isoladores rígidos, são constituídos por vários isoladores de campânula de porcelana, vidro ou resina artificial, por componentes metálicos e pelo material ligante que as justapõe podendo constituir cadeias de amarração ou cadeias de suspensão. [6]

Os principais materiais dos isoladores são a cerâmica, nomeadamente a porcelana, o vidro e os materiais poliméricos. São compostos por um núcleo, um revestimento e um conjunto de ferragens como é visível na figura 2.3. O regulamento recomenda que sejam em vidro, porcelana vidrada ou de outros materiais apropriados, como os poliméricos. [18]

Além disto, de acordo com a função do apoio, as cadeias de isoladores podem encontrar-se em suspensão ou amarração. As cadeias em suspensão são montadas verticalmente e são utilizadas apenas nos apoios de alinhamento. Dado que as cadeias de isoladores em suspensão utilizam metade dos isoladores das cadeias em amarração, são utilizadas sempre que possível por questões económicas. As cadeias de amarração correspondem a cadeias horizontais usadas normalmente em apoios de ângulo, apoios fim de linha e apoios onde a utilização de isoladores rígidos não seja

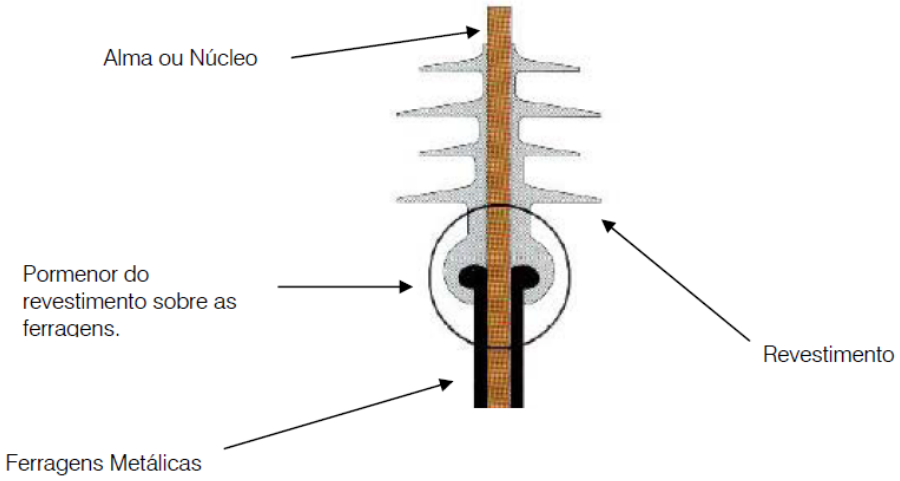


Figura 2.3: Constituição de um Isolador de Compósito [3]

possível. As cadeias de amarração poderão ser ascendentes ou descendentes conforme a colocação das linhas.

A queda de cabos condutores surge normalmente por rotura de cadeia de isoladores. Por isso, é importante a utilização de cadeias duplas, melhorando a fiabilidade mecânica do sistema de transporte. A utilização desta solução é particularmente relevante em locais onde a segurança de pessoas e bens é mais sensível como na proximidade de auto-estradas, estradas nacionais, zonas públicas, e cruzamento com edifícios. [1]

Podem também existir cadeias com hastes de descarga. Estas hastes de descarga têm como objetivo proteger o condutor e a cadeia de isoladores dos efeitos nocivos provocados pelas sobretensões atmosféricas. As cadeias equipadas com hastes de descarga são uma solução prevista no RSLEAT para evitar o sobre isolamento de quatro apoios consecutivos. Estas cadeias, quando utilizadas, devem ser empregues em apoios localizados em locais de difícil acesso e relativamente longe de habitações. [5]

Ao conjunto de medidas adotadas, com o objetivo de selecionar as caraterísticas dielétricas dos equipamentos, de forma a evitar que sejam causados danos ao equipamento elétrico das instalações pelas sobretensões a que estas são submetidas, é chamado coordenação de isoladores. Adicionalmente, esta medida tem como função localizar as descargas em pontos onde não possam causar danos e perturbar notoriamente o serviço, nas situações em que é economicamente impossível impedi-las. A coordenação de isolamentos visa ainda a determinação do isolamento ótimo para cada ponto de uma rede elétrica, tendo em conta as consequências das avarias e das interrupções de serviço. [19]

[5] Capítulo IV, Artigo 48º do RSLEAT

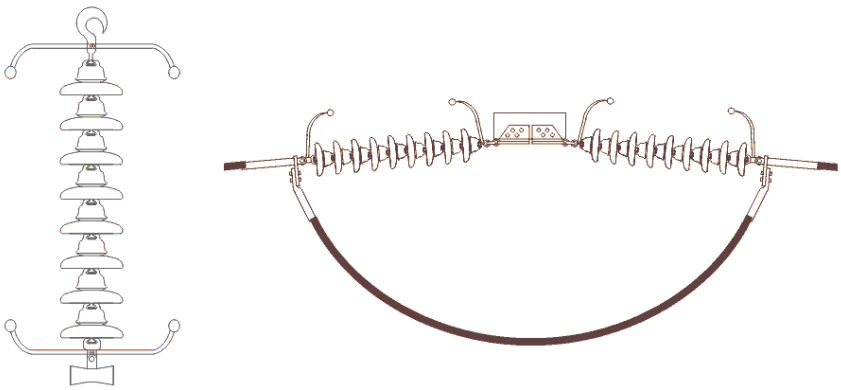


Figura 2.4: Cadeia de isoladores em suspensão (esquerda), cadeia de isolamento em amarração (direita) [4]

2.3.4 Condutores

Os condutores são os elementos responsáveis pela condução da energia elétrica. Nas linhas aéreas de muito alta tensão utilizam-se condutores nus, ou seja, sem revestimento, uma vez que para tensões superiores a 60 kV, os condutores isolados podem sofrer alterações irreversíveis das suas caraterísticas e também devido ao facto de serem bastante mais caros. A utilização de condutores isolados pode-se justificar em circunstâncias em que seja efetivamente aconselhado o seu uso, como em zonas muito urbanizadas ou ligação a secções subterrâneas. [20]

Os cabos aéreos nus consistem num conjunto de fios de um ou mais metais em camadas concêntricas, de sentidos alternados. Variando o diâmetro dos fios, a relação dos fios no caso de cabos de alumínio-aço e o número de camadas, obtém-se uma multiplicidade de desenhos que permitem responder aos requisitos de cada linha, tanto a nível da capacidade de transporte e de todos os parâmetros elétricos associados. [21]

• Condutor isolado – condutor isolado provido de bainha ou conjunto de condutores isolados devidamente agrupados, provido de bainha, trança ou outra envolvente comum;

• Condutor nu – condutor nu multifilar em que os vários fios constituintes estão enrolados em hélice;

• 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.[6]

Na execução de linhas aéreas de muito alta tensão são utilizados condutores multifilares, geralmente heterogéneos. Atualmente o condutor mais utilizado é o alumínio-aço, também designado por ACSR (Aluminium Cable Steel Reinforced) como representado na figura 2.5, onde a condutividade elétrica é assegurada pelas camadas de alumínio, enquanto a alma de aço contribui para uma maior resistência mecânica do cabo. A aplicação de cabos homogéneos de alumínio puro

[6]Capítulo IV, Artigo 48º do RSLEAT

ainda que contemplada no RSLEAT é restringida nas linhas aéreas, uma vez que embora com grandes potencialidades a nível de capacidade de transporte, os cabos de alumínio demonstraram-se inadequados em determinadas situações, pela insuficiente resistência mecânica, relacionada com fluência excessiva, tensões de rutura baixas, e coeficiente de expansão térmica elevado. [21]

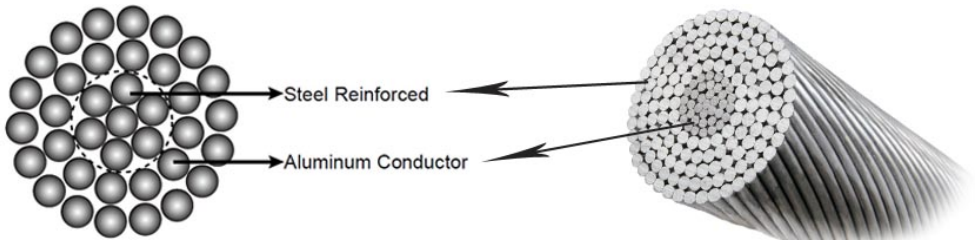


Figura 2.5: Representação do cabo ACSR [5]

Também não é comum a utilização de condutores de cobre, que apesar de serem vantajosas no transporte de energia, apresentam algumas desvantagens a nível técnico e económico. Em primeiro lugar, os cabos de cobre têm um custo muito superior, apresentam menor resistência mecânica do que cabos de alumínio-aço. Adicionalmente, comparando um cabo de cobre com um cabo de alumínio-aço com a mesma resistência, ou seja, em igualdade de perdas, o cabo de alumínio-aço apresenta um diâmetro cerca de 40 % superior, o que traz vantagens na redução do efeito coroa. A utilização de condutores com alumínio permite ainda uma redução de cerca de 50 % no peso dos condutores. Esta diminuição é particularmente importante para reduzir a flecha e aumentar vãos, resultando numa solução mais económica e facilitando o projeto. Isto acontece pois diminuindo a flecha diminui também a altura dos apoio. Por outro lado, diminuindo o peso dos condutores é possível diminuir o número de apoios, as ferragens e os isoladores. Os condutores de uma linha devem ser selecionados de acordo com as correntes de serviço e as tensões mecânicas a que serão submetidos. [17]

Na RNT onde é usado o nível de tensão mais elevado, a solução de feixe geminado está normalizada para o nível de tensão de 400 kV. A utilização desta solução garante valores adequados no referente aos efeitos consequentes ao efeito de coroa, onde se destacam perdas, ruído audível e diminuição do campo elétrico. Nesta solução, os condutores da mesma fase são dispostos de forma próxima, separados por peças metálicas designadas separadores, que mantêm a estabilidade mecânica, impedindo que batam uns nos outros e também amortecendo as vibrações eólicas. [1]

2.3.5 Ligações à terra

As ligações à terra têm como objetivo escoar as correntes de defeito para o solo de forma a garantir a segurança de pessoas e equipamentos que se encontram nas proximidades de instalações elétricas. No caso das pessoas é particularmente importante que não sejam afetadas por tensões de passo e de contacto superiores aos máximos admissíveis. Este sistema de ligações à terra cria um ponto comum e de referência entre as partes eletricamente condutoras e a terra. Do sistema fazem

parte os elétrodos de terra e os conjuntos de condutores. O escoamento deve ser feito garantindo que não afeta os equipamentos nem a continuidade de serviço. [22]

Nas linhas de muito alta tensão toda a aparelhagem metálica (normalmente fora de tensão) necessária ao suporte dos condutores e proteção das linhas, tem de ser ligada à terra. A ligação é assegurada por elétrodos de terra que são constituídos por quatro estacas de cobre com cerca de 2 metros de comprimento cravadas verticalmente no solo, no fundo de cada cova e ligadas em anel aos montantes através de um cabo nu. Os cabos de ligação das bases dos apoios aos elétrodos de terra ficarão embebidas no betão em cerca de 1m, procurando-se que não estabeleçam contacto com as bases no interior do betão. O cabo é ligado à cantoneira e às estacas por intermédio de ligadores apropriados, procurando-se sempre um permanente bom contacto e baixa resistência. Na figura 2.5 é possível ver um esquema de terras a um apoio metálico. [23]

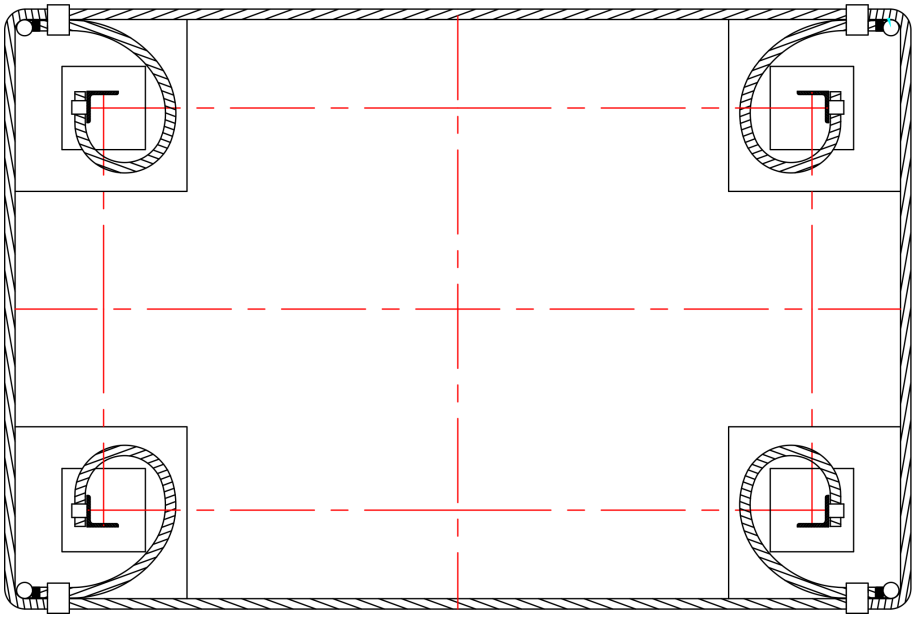


Figura 2.6: Esquemas de ligação à terra nos postes metálicos [1]

2.4 Resumo

Uma linha aérea, particularmente de MAT, é um elemento de especial complexidade e importância no sistema elétrico de energia. A sua estabilidade e segurança está dependente de diversos fatores elétricos e mecânicos. Por serem elementos de grande dimensão devem estar projetados de forma a garantir a segurança de pessoas e bens à sua volta sendo também responsáveis por assegurar continuidade de serviço em quaisquer condições. Neste capítulo foram sucintamente descritos os principais elementos e de que forma estão regulamentados, servindo assim de apoio à compreensão do disposto nos capítulos seguintes. Estes conceitos devem ser do conhecimento geral de qualquer engenheiro que trabalhe com linhas de MAT. Nesta dissertação, os elementos da linha são especialmente referidos pelas suas caraterísticas mecânicas, nomeadamente os isoladores e os condutores.

Capítulo 3

Cálculos de um Projeto de uma Linha Aérea de Muito Alta Tensão

3.1 Introdução

A elaboração de um projeto de uma linha MAT contempla diversas fases. , desde a escolha do traçado até ao cálculo elétrico. Na definição do traçado devem ser tidas em consideração diversas imposições regulamentares que limitam os locais que podem cruzar. As travessias de rios e albufeiras, construções, zonas de interesse cultural, zonas de proteção ecológicas, vias de comunicação, caminhos de ferro, locais com densa vegetação, são exemplos de caraterísticas do terreno que podem representar dificuldades acrescidas na garantia das questões de segurança da linha, nomeadamente nas distâncias de segurança. Desta forma devem estar representadas no projeto da linha de forma detalhada. Existem ainda locais em que a passagem de linhas não é permitida como escolas, centros desportivos, áreas militares, aeroportos, locais de radiodifusão e de antenas de comunicação ou locais armazenamento de explosivos. [11] Toda esta fase não será tratada nesta dissertação uma vez que o projeto chega à PROEF numa fase em que o traçado já se encontra definido. Crucial é o cálculo mecânico por forma a garantir a estabilidade dos apoios e as distâncias de segurança.

Quando o projeto é recebido no departamento, são efetuadas no local onde está destinado receber o apoio diligências de piquetagem topográfica, de forma a analisar se o tipo de terreno pode efetivamente receber o apoio e se o perfil da linha está corretamente efetuado. Em certas situações o local escolhido não é viável para a colocação e são feitas ligeiras alterações ao local onde será implementado o apoio. Estas alterações implicam que o cálculo mecânico seja efetuado por forma a garantir que o tipo apoio inicialmente considerado ainda é viável. Por essa razão o presente capítulo incidirá sobre as questões teóricas por trás do cálculo mecânico que irão auxiliar a elaboração de uma ferramenta de cálculo de flechas no capítulo seguinte desta dissertação.

3.2 Cálculo mecânico

A fase de cálculo mecânico é das mais relevantes no projeto de uma linha MAT. Destes cálculos resultará a garantia que as distâncias impostas pelo RSLEAT são cumpridas assim como a segurança e estabilidade da linha. De particular relevância é a determinação da flecha máxima de forma a garantir as distâncias mínimas regulamentares. Daqui advêm as tensões de montagem a aplicar nos condutores, de acordo com as condições atmosféricas verificadas. Também relevante é o cálculo da distância entre condutores, e desvio transversal das cadeias de isoladores em suspensão assegurando o afastamento necessário para não haver aproximação perigosa quer em entre linhas quer ao apoio em situações de vento. A gama do apoio, e a sua altura, estão definidas no projeto que chega à PROEF, no entanto, na eventualidade de ser necessário fazer alterações à localização do apoio, é necessário garantir que as condições de segurança continuam a ser cumpridas. Serão agora apresentados os fundamentos teóricos que suportam os cálculos a efetuar na ferramenta que será desenvolvida nos capítulos seguintes.

3.2.1 Estados Atmosféricos

Uma linha MAT é formada por diversos elementos que, pela sua envergadura, estão especialmente suscetíveis às solicitações elásticas provocadas pelas forças que sobre eles se exercem, das quais se destacam as solicitações térmicas originadas pelas variações de temperatura e a ação do vento. As características da região em termos de temperatura e vento são preponderantes. Para descrever as diversas hipóteses são normalmente determinados três estados atmosféricos tipo que se apresentam mais desfavoráveis sob diversos pontos de vista. São eles:

• Estado de inverno é o estado atmosférico caracterizado pela menor temperatura previsível para a região onde a linha se vai implantar. Considera-se a possibilidade da existência de manga de gelo e vento reduzido. Para zonas habitualmente sem gelo considera-se uma temperatura de -5^{o}C, e para zonas propícias à formação de gelo, a temperatura a admitir é de -10^{o}C.

• Estado de primavera é considerado o estado de vento máximo, caracterizado pela temperatura média previsível de 15^{o}C para a região onde a linha se vai implantar, e pela existência de vento muito intensos e ausência de manga de gelo;

• Estado de verão é considerado o estado de flecha máxima, caracterizado pela temperatura máxima previsível para a região onde a linha se vai implantar, pela ausência de vento e mangas de gelo nos condutores. Em linhas MAT, ou seja, de 3.^{a} classe, é considerada uma temperatura de 75^{o}C.[1]

3.2.1.1 Ação da temperatura

As linhas aéreas são expostas a diferentes temperaturas durante o seu período de funcionamento. Estas variações são particularmente relevantes pois a temperatura afeta diretamente o estado de dilatação dos condutores. Em períodos de temperatura elevada os condutores encontram-se

[1] Capítulo III, Artigo 22^{o} do RSLEAT

com maior dilatação. Pelo contrário, em períodos de temperatura mais baixa os condutores estão contraídos, aumentado a tensão sobre os apoios. Assim, é importante definir as temperaturas de referência a considerar para cada estado atmosférico, informação que está presente na Tabela

Tabela 3.1: Temperaturas de refêrencia conforme o estado atmosférico

	Temperatura(ºC)	
Estado atmosferico	**Sem gelo**	**Com gelo**
Verão	75	-
Primavera	15	-
Inverno	-5	-10

3.2.2 Ação do gelo

A formação de uma manga de gelo envolvendo o condutor ou cabo de guarda acontece quando um conjunto condições de humidade do ar e a temperatura da linha se verificam. A formação desta manga de gelo resulta num aumento do peso e diâmetro do condutor, levando por isso a um aumento considerável da superfície afetada pelo vento. Este aumento tem um duplo efeito penalizador nas solicitações ao apoio. Por esta razão, dependendo da região onde a linha é implementada é importante a consideração deste fator na realização do cálculo mecânico. As zonas de gelo a considerar dependem não só da temperatura mínima verificada na região, mas também da altitude. Então, para altitudes superiores a 700 m considera-se uma espessura uniforme da manga de gelo de 10 mm e uma densidade de 0,9g=dm^3. [11]

O peso específico do gelo W_g é calculado através da expressão 3.1.

$$W_g = \frac{\rho * \pi}{4} * [(d+2e)^2 - d)^2] \tag{3.1}$$

- ρ é o peso volumétrico do gelo;
- d é o diâmetro do cabo, em m;
- e é a espessura da manga de gelo, em m.

A manga de gelo a considerar no cálculo dos condutores deverá ter uma espessura uniforme de pelo menos $10mm^2$, contudo, o projetista pode considerar outro valor caso a experiência assim o indique.

3.2.3 Ação do vento

O vento exerce sobre as linhas aéreas uma ação de grandeza relevante sendo por isso importante calcular o esforço exercido sobre os condutores. Assim, o vento deverá considerar-se, de acordo com o RSLEAT atuando numa direção horizontal e a força proveniente da sua ação considerar-se-á paralela àquela direção e será determinada pela expressão:

$$F = \alpha * c * q * (d + 2e) \tag{3.2}$$

- α é o coeficiente de redução, que é adimensional;
- c é o coeficiente de forma nos condutores, que é adimensional;
- q é a pressão dinâmica do vento, em daPa;
- d é o diâmetro do cabo, em m;
- e é a espessura da manga de gelo, em m, no caso de ser uma zona de gelo.

3.2.4 Coeficiente de redução

O coeficiente de redução trata-se de um fator da efetividade do efeito do vento. O valor regulamentar a considerar é de 0,6 para condutores e cabos de guarda.[2]

3.2.5 Coeficiente de forma

É considerado um coeficiente de forma que traduz a influência da forma geométrica do elemento exposto à ação do vento. Os seus valores são definidos no RSLEAT e apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Coeficiente de forma de condutores nus e cabos de guarda

Elemento da linha	**Diâmetro**[mm]	**Coeficiente**
Condutores nus e cabos de guarda	$\leq$ 12,5	1,2
	12,5 < d < 15,8	1,1
	$\geq$ 15,8	1

3.2.6 Pressão dinâmica do vento

Os valores da pressão dinâmica do vento variam em função da altura acima do solo a que se encontra o elemento da linha sobre o qual incide o cálculo da ação do vento e com o estado atmosférico. Os valores deste parâmetro fixados no RSLEAT [3] e estão apresentados na Tabela seguinte:

Tabela 3.3: Variação da Pressão dinâmica do vento com a altura do apoio

Altura em relação ao solo, h[m]	**Pressão dinamica q[Pa]**	
	Vento Máximo Habitual	**Vento Reduzido**
$\leq$ 30	750	300
30 < h $\leq$ 50	900	360
> 50	1050	420

[2] Capítulo II, Artigo 14º do RSLEAT
[3] Capítulo II, Artigo 13º do RSLEAT

3.2.7 Peso do próprio cabo

O peso específico do cabo é um dos primeiros valores a considerar. É estabelecido de acordo com o cabo a utilizar e é fornecido pelo fabricante. Este valor é apresentado em daN/m.

3.2.8 Forças exercidas sobre um condutor

As forças exercidas sobre um condutor, representadas vetorialmente na figura 3.1, devem-se ao peso dos próprios cabos, à ação do vento e, na eventualidade da formação de uma manga de gelo, à ação da massa de gelo sobre os condutores. A resultante das diferentes ações que se exercem sobre o condutor não se situa no plano vertical, mas isso não tem quaisquer consequências do ponto de vista mecânico dos condutores.

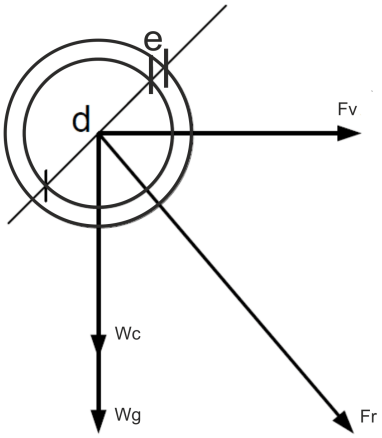


Figura 3.1: Forças exercidas sobre um condutor [6]

• Wc – Ação da gravidade sobre o condutor (peso do próprio condutor) [daN/m];

• Wg – Ação da gravidade sobre a manga de gelo eventualmente existente (peso da manga de gelo)[daN/m];

• Fv – Força exercida pelo vento[daN/m];

• Fr – Força resultante[daN/m];

Desta forma, a força resultante (Fr) da ação dos agentes atmosféricos e do peso do cabo é dada pela seguinte expressão:

$$F_r = \sqrt{(W_C + W_g)^2 + F_v^2} \tag{3.3}$$

3.2.9 Coeficiente de sobrecarga

Os agentes atmosféricos, usados para definir os estados atmosféricos, são considerados no cálculo mecânico por meio de um coeficiente de sobrecarga (m). Este coeficiente de sobrecarga

confere ao peso próprio do condutor um agravamento que traduz a ação do vento e do gelo, na eventualidade de existir, como se as respetivas ações se resumissem a um aumento de peso próprio dos condutores. Este coeficiente é calculado de acordo com a expressão 3.4

$$m = \frac{F_r}{W_c} = \frac{\sqrt{(W_c + W_g)^2 + F_v^2}}{W_c} \tag{3.4}$$

Em que:

- Wc é o peso específico do cabo, em daN/m;
- Wg é o peso específico do gelo, em daN/m;
- Fv é a força do vento, em daN/m.
- Fr é a resultante da soma das forças que atuam no condutor, em daN/m.

Os agentes atmosféricos, usados para definir os estados atmosféricos, são considerados no cálculo mecânico por meio de um coeficiente de sobrecarga (m). Este coeficiente de sobrecarga confere ao peso próprio do condutor um agravamento que traduz a ação do vento e do gelo, na eventualidade de existir, como se as respetivas ações se resumissem a um aumento de peso próprio dos condutores. Desta forma, deve calcular-se o coeficiente de sobrecarga para o estado de inverno e de primavera. No estado de verão, usado para o cálculo da flecha máxima, o coeficiente de sobrecarga é unitário pois não se considera a existência de vento. [6]

3.2.10 Vão crítico

O chamado vão crítico corresponde ao vão de referência para o qual os condutores ficam sujeitos a uma determinada tensão máxima admissível em ambos os estados, o de inverno e o de primavera. Uma vez calculados os coeficientes de sobrecarga para os estados de inverno e primavera, é determinado qual o estado atmosférico mais desfavorável para cada cantão. Determina-se pela seguinte expressão, que deriva da equação dos estados que consta no ponto 3.2.13 :

$$L_{cr} = \frac{\sigma * t_k}{\omega} * \sqrt{\frac{24 * \alpha * (\theta_i - \theta_k)}{m_i^2 - m_k^2}} \tag{3.5}$$

Em que:

- t_k é a tensão mecânica de serviço aplicada aos condutores nos estados k e i, em daN/mm^2;
- σ é a secção do condutor, em mm^2;
- α corresponde ao coeficiente de dilatação térmica do condutor, em $^oC^{-1}$;
- ω é o peso próprio do condutor, em daN/m^2;
- θ_i e θ_k são as temperaturas do estado i e do estado k, respetivamente, em ^{o}C;
- m_i e m_k são os coeficientes de sobrecarga do estado i e do estado k, respetivamente.

3.2.11 Vão Equivalente

Conforme é evidente, uma linha real é formada por diversos apoios em amarração e suspensão, sendo os apoios em amarração usados apenas nos casos em que são estritamente necessários. Para efeitos de calculo de projeto considera-se que nas cadeias de amarração os pontos de fixação dos condutores são imóveis no espaço, independentemente das solicitações mecânicas a sejam sujeitos. No caso das cadeias em suspensão, estando os pontos de fixação dos condutores no extremo das cadeias dispostas em posição verticais, podem deslocar-se angularmente. Assim, define-se vão equivalente como o vão que, a existir, deixaria as cadeias de suspensão sempre verticais para qualquer estado atmosférico.

Este vão é cálculo pela expressão:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_1^n * L_i^3}{\sum_1^n * L_i}} \tag{3.6}$$

Sendo que:

• $\sum_1^n * L_i^3$-Somatório dos vãos pertencentes ao cantão [m].

O vão equivalente é também importante na regulação mecânica da linha aérea, isto é, na escolha adequada da tração aplicada aos condutores durante o processo de montagem da linha. Por parte do projetista devem ser adotadas algumas boas práticas que facilitam a implementação do projeto e garantem que a sua viabilidade económica não é comprometida. Sempre que possível os vãos devem ser suportados por cadeias de suspensão, não devem, no entanto, incluir mais de quinze vãos por cantão. Importa também verificar que o comprimento dos vãos que compõe cada cantão estão contidos num intervalo 25% inferior ou superior ao do vão equivalente. Um cantão de uma linha aérea, por sua vez, é uma porção de uma linha compreendida entre dois apoios, os quais são fixados por amarrações[4].

3.2.12 Estado mais desfavorável

Na realização de um projeto mecânico para linhas aéreas MAT é fundamental prever qual o estado atmosférico mais desfavorável ao longo de toda a linha. Dependendo do estado que resulte deste estudo, a linha terá diferentes comportamentos. Para isso considera-se o pior estado atmosférico aquele onde seja atingida a tensão mais elevada, ainda que tenha obrigatoriamente de ser inferior à tensão máxima estipulada. As tensões máximas de trabalho dos cabos deverão apresentar um coeficiente de segurança pelo menos igual a 2,5 em relação à carga de rotura; As variações de temperatura e de pressão dinâmica do vento têm efeitos contrários sobre o esforço a que está submetido um condutor e consequentemente sobre o apoio. De forma genérica:

• Um aumento de temperatura provoca uma diminuição de esforço;

• Um aumento de pressão dinâmica do vento provoca um aumento do esforço.

[4]Capítulo I, Secção IV, artigo 4º, ponto 20 do RSLEAT

Assim, quando o vão é pequeno a ação do vento sobre o condutor é pequena, mas, sendo a flecha pequena, uma diminuição da temperatura fará aumentar significativamente o esforço a que condutor é submetido.

Por outro lado, se o vão é grande, a flecha é igualmente grande e uma diminuição da temperatura não implica um aumento do esforço apreciável. O estado de verão é caraterizado pela ausência de vento e elevadas temperaturas, o que origina a dilatação dos condutores, resultando assim num estado de flecha máxima. Consequentemente, há uma diminuição na tração solicitada aos apoios.

Desta forma, este estado nunca poderá ser o caso mais desfavorável do ponto de vista de esforço mecânico. É usado apenas para determinação da flecha máxima.

A determinação do estado mais desfavorável é auxiliada por um fluxograma que consta na Figura 3.2. A escolha é feita com critérios baseados em comparações entre os valores dos coeficientes de sobrecarga nos estados atmosféricos considerados e também entre os valores do vão crítico e vão equivalente.

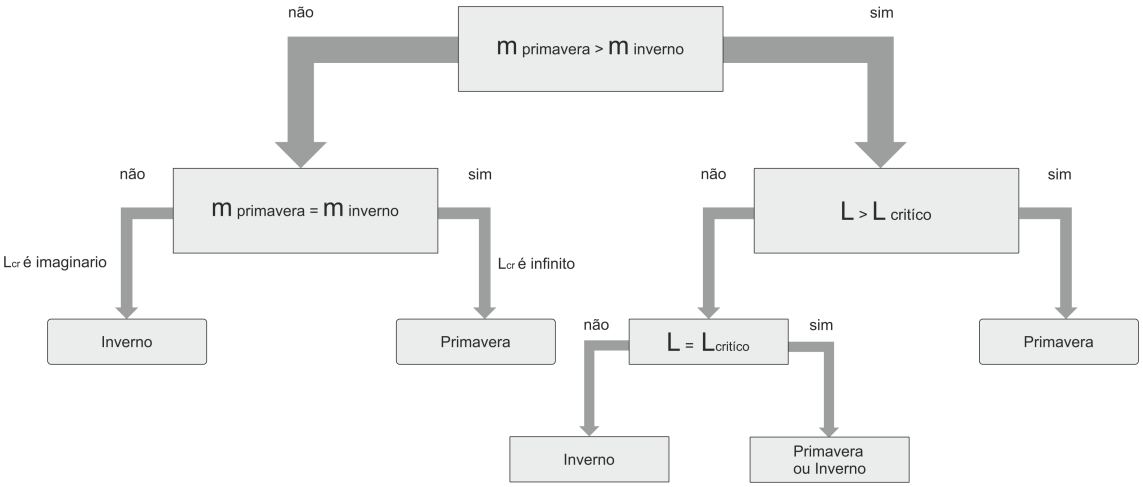


Figura 3.2: Fluxograma de apoio à determinação do estado atmosférico mais desfavorável

3.2.13 Equação dos estados

A equação dos estados é uma equação de equilíbrio mecânico que relaciona dois estados atmosféricos. Permite o cálculo da tensão mecânica nos condutores de um dado vão, num qualquer estado atmosférico, conhecendo o seu valor no outro estado atmosférico. Desta forma, se forem conhecidos os coeficientes de sobrecarga e as temperaturas em cada um dos estados atmosféricos, assim como as caraterísticas dos condutores utilizados e o valor de tensão mecânica num desses estados, pode ser determinada a tensão mecânica no outro estado atmosférico.

A expressão da equação dos estados é então:

$$\theta_i + \frac{t_{serv}}{E * \alpha} - \frac{m_i^2 * w^2 * L_{cr}^2}{24 * \alpha * \sigma^2 * t_i^2} = \theta_k + \frac{t_{serv}}{E * \alpha} - \frac{m_k^2 * w^2 * L_{cr}^2}{24 * \alpha * \sigma^2 * t_k^2} \tag{3.7}$$

Em que:

• σ é a secção do condutor, em mm2;

• θ_i e θ_i são as tensões mecânicas de serviço aplicadas aos condutores nos estados i e k, em daN/mm^2;

• L é o comprimento do vão, em m;

• E é o módulo de elasticidade do conduto, em daN/mm^2;

• ω é o peso próprio do condutor, em daN/m;

• α é o coeficiente de dilatação térmica do condutor, em $^oC^-1$;

• θ_i e θ_k são as temperaturas do estado i e do estado k, respetivamente, em C;

• m_i e m_k são os coeficientes de sobrecarga do estado i e do estado k, respetivamente.

3.2.14 Determinação de t_i

Após determinado o estado atmosférico mais desfavorável para cada cantão é executada uma comparação com o estado de verão, recorrendo para isso à equação dos estados (3.7). Daqui é determinada a tensão mínima de serviço, que corresponde à tensão para a qual se verifica a flecha máxima, ou seja, a flecha no estado de verão. A montagem e regulação mecânica dos condutores é realizada em condições semelhantes às das consideradas no estado atmosférico de verão. Não é, no entanto, possível prever a temperatura a que a montagem da linha será efetuada.

Assim, além de ser determinada a tensão para a temperatura máxima considerada, são também determinadas as tensões de montagem para outras temperaturas. Estas devem ser disponibilizadas em intervalos de 5^{o}C, para que a regulação seja feita em conformidade com a temperatura ambiente do dia em que for efetuada a montagem.

3.2.15 Determinação do parâmetro P da curva e catenária

Determinada a tensão mínima de serviço t_i, importa determinar P o parâmetro da curva, também designado parâmetro da catenária. A melhor aproximação da curva que os condutores de uma linha elétrica descrevem entre dois apoios adjacentes é a catenária. Este é um parâmetro que representa geometricamente o raio de curvatura no ponto em que a tangente à curva é horizontal. Este efeito encontra-se representado na figura 3.3.

Analiticamente é representado pela relação entre a força de tração horizontal do condutor e o peso linear do mesmo, como representado na expressão (3.8)

$$p = \frac{t_i * \sigma}{\omega}[m] \tag{3.8}$$

Sendo:

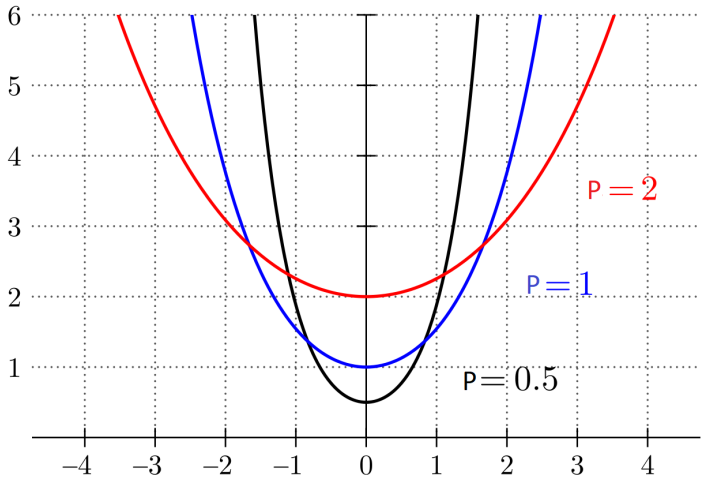


Figura 3.3: Representação gráfica da variação do parâmetro da catenária [11]

- σ é a secção do cabo, em mm^2;
- t_i é a tensão mínima verificada, em daN/mm^2;
- ω é o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m.

A partir do valor do parâmetro da catenária é possível determinar a catenária utilizando a expressão (3.9):

$$y = p\left(cosh\left(\frac{xa}{p}\right) - 1\right)[m] \tag{3.9}$$

Em que:

- p é o parâmetro da catenária, em m;
- x_a é a distância em projeção horizontal entre um ponto da catenária e o ponto horizontal tangente à curva, em m.

Esta expressão é uma aproximação hiperbólica que deriva dos estudos de estática de *Michin* e trata-se de uma aproximação da equação (3.10) que representa analiticamente a curva de equilíbrio de um fio inextensível. [12]

$$y = \frac{t_i\sigma}{\omega}\left(cosh\left(\frac{xa}{\frac{t_i\sigma}{\omega}}\right) - 1\right) - \frac{(t_i\sigma)^2}{2\omega e}senh^2\left(\frac{xa}{\frac{t_i\sigma}{\omega}}\right) + \frac{(t_i\sigma)^3}{2\omega e^2}cosh\left(\frac{xa}{\frac{t_i\sigma}{\omega}}\right)senh^2\left(\frac{xa}{\frac{t_i\sigma}{\omega}}\right)[m] \tag{3.10}$$

Em que:

• p é o parâmetro da catenária, em m;

• xa é a distância em projeção horizontal entre um ponto da catenária e o ponto horizontal;

• e é o módulo de elasticidade do material do condutor.

Sucede, no entanto, que para os valores habituais das variáveis utilizadas relativamente aos condutores, as duas últimas parcelas do segundo membro da equação são extraordinariamente pequenas comparadas com a primeira, considera-se então que desprezar essas duas parcelas representa uma simplificação com pouca influência no resultado final. Deve também notar-se que a expressão, embora seja a que descreve de forma mais rigorosa a curva efetuada por um fio suspenso, só é verdadeira para um fio inextensível, isto é, não suscetível de sofrer um alongamento elástico devido à ação dos esforços a que está submetido. Na realidade os materiais alongam ligeiramente sob tensão, sendo esse alongamento inversamente proporcional ao seu modulo de elasticidade. No entanto, para os valores mecânicos usais dos cabos o fio pode ser considerado ideal, ou seja, inextensível. [7]

Estas expressões derivam do estudo mecânico da teoria dos fios suspensos que desde há muito representam um desafio para os engenheiros projetistas, particularmente quando não existiam ferramentas computacionais de cálculo. Várias equipas de engenheiros propuseram inicialmente métodos de descrever o comportamento dos cabos suspensos, mas só com o aparecimento de ferramentas de cálculo computacional com grande capacidade foi possível aplicar o método hiperbólico de forma generalizada. [12]

Contudo, para linhas onde o vão médio não exceda os 300 metros é ainda usual ser considerada uma aproximação parabólica da expressão (3.11), cujo resultado não difere muito da aproximação anterior e que permite simplificar os cálculos.

$$y = \frac{x^2}{2p}[m] \tag{3.11}$$

Em que:

• p é o parâmetro da catenária, em m;

• x é a distância em projeção horizontal entre um ponto da parábola e o ponto horizontal tangente à curva, em m.

No caso das linhas MAT a REN recomenda uma distribuição inicial dos apoios com vão de 400 metros, e exige a utilização do método hiperbólico. [1]

3.2.16 Determinação da flecha máxima

De grande importância é também a determinação da flecha máxima. Esta deve ser calculada para a temperatura máxima, ou para uma outra temperatura de forma a determinar a flecha de montagem, que será tema central nesta dissertação. Conforme demonstrado na figura 3.4 a flecha de um cabo corresponde à distância entre o ponto do condutor onde a tangente é paralela à reta que passa pelos pontos de fixação e a intersecção da vertical que passa por esse ponto com esta

reta, admitindo que o condutor ou o cabo de guarda não são desviados pelo vento. Também na figura 3.4 se encontra representada uma situação com vão desnivelado em que está representada a flecha para esta situação.

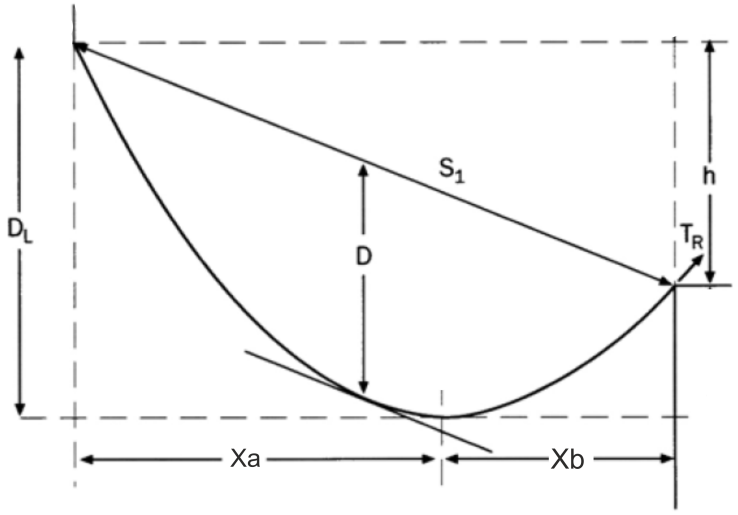


Figura 3.4: Distâncias consideradas no calculo de flechas em situação de desnível. [7]

Conforme referido anteriormente, a flecha depende das condições atmosféricas e de operação da linha. O valor da flecha de montagem deve ser conhecido de modo a determinar a tração que deve ser aplicada aos condutores a quando da sua montagem de modo a que, mesmo nas situações mais desfavoráveis a distância que se verifica ao solo cumpra as margens dispostas nos regulamentos. A figura 3.5 exemplifica como deve ser tida em conta essa distância em relação à flecha considerada.

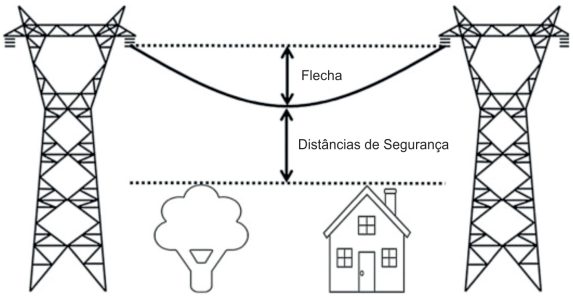


Figura 3.5: Distância de segurança a assegurar na situação de flecha máxima. [8]

Por exigência regulamentar da REN, para linhas as de MAT terá de ser usado o método hiperbólico, ou seja, não deve ser feita a aproximação da curva da catenária a uma parábola, mas sim usar a solução mais próxima da realidade, desta forma para o calculo de flechas deverá ser a seguinte expressão:

$$f = \frac{t_i * \sigma}{\omega} \left(cosh \left(\frac{x_a}{\frac{t_i * \sigma}{\omega}} \right) - 1 \right) [m] \tag{3.12}$$

Sendo:

• σ é a secção do cabo, em mm^2;

• t_i é a tensão mínima verificada, em daN/mm^2;

• ω é o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m.

Esta expressão deriva da equação (3.9) e é valida para situações de desnível entre apoios, como representado na figura 3.6.

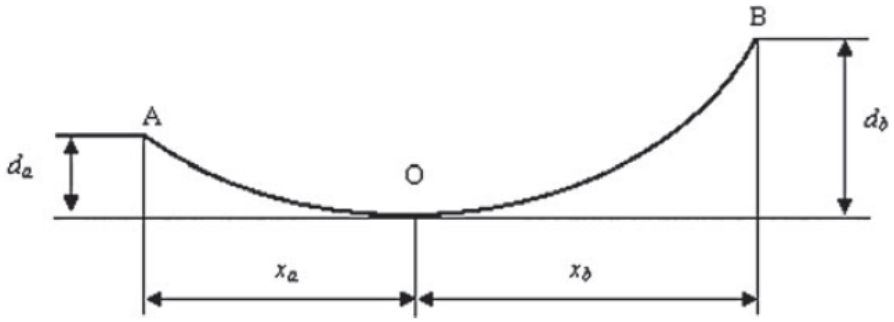


Figura 3.6: Curva descrita por um condutor suspenso em A e B com diferente altura. [9]

Sendo:

• A e B, apoios dos condutores;

• O, o ponto de altura mínima descrita pelo condutor;

• d_a e d_b, respetivamente a altura entre o ponto O e os pontos A e B;

•x_a e x_b, respetivamente a distância do ponto O à projeção vertical de A e B .

Importa então determinar x_a, sabendo de antemão que se a altura dos apoios for igual, o ponto O não estará e meio do vão caso exista uma diferença a cota dos apoios. Desta forma:

$$x_a = \frac{A}{2} - P * cosh \left(\frac{\frac{h}{2}}{P * senh \frac{\frac{h}{2}}{P}} \right) [m] \tag{3.13}$$

Sendo:

• A, distância entre apoios, em metros;

• h, a diferença de altura entre os apoios dos condutores, em metros;

• p, o parâmetro da catenária, em m;

O cálculo desta distância será amplamente explorado no capítulo seguinte.

3.2.17 Situação de arrancamento

A situação conhecida como arrancamento ou enforcamento, ilustrada na figura (3.7), pode acontecer em situações de desnível muito elevado entre apoios, ou quando um apoio é colocado com um desnível muito grande em relação aos adjacentes. Isto corresponde a haver uma força ascendente que faz com que os isoladores de suspensão tenham tendência a inverter o seu sentido que naturalmente é descendente, ou percam a sua verticalidade. O arrancamento pode ocorrer quando os pontos mínimos da catenária de um determinado vão se encontra para lá do apoio a que deveria ser fixado o condutor. Ocorre especialmente em situações de temperatura mínima, pois como é facilmente compreensível, a temperatura mais baixa leva a um aumento da tensão do cabo piorando este cenário. Para evitar esta situação deve haver por parte do projetista uma sensibilidade de evitar a passagem da linha por vales muito pronunciados. Na inevitabilidade de optar por uma solução que leve a que ocorra este fenómeno o apoio em questão tem obrigatoriamente de ser de amarração. [10] [7]

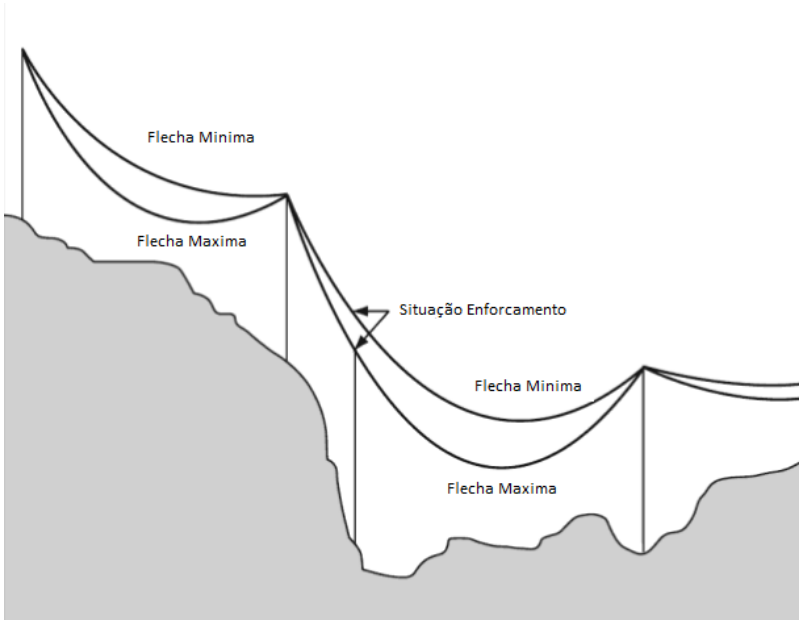


Figura 3.7: Situação de arrancamento. [10]

3.2.18 Desvio transversal da cadeia de isoladores

A ação transversal do vento sobre os condutores e sobre as cadeias de isoladores em suspensão podem provocar desvios significantes. Nas cadeias de isoladores em suspensão, os condutores encontram-se fixos através de um ponto, tendo as cadeias algum grau de liberdade de oscilação. É essencial garantir que os isoladores não se aproximam do apoio de forma que possa comprometer a segurança do equipamento. Para isso é calculado o ângulo que faz o isolador com o apoio, conforme demonstrado na figura 3.6.

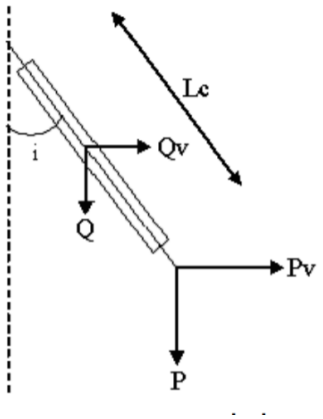


Figura 3.8: Desvio transversal da cadeia de isoladores [11]

Desta forma, deve ser calculado, recorrendo à expressão (3.12), o desvio que as cadeias sofrem e verifica-se se o ângulo sigma obtido é menor do que 60 grados.

$$i = tan^{-}1\left(\frac{F_{VC} + 0.5 * F_{Isol}}{P_C * 0.5 P_{Isol}}\right)[m] \tag{3.14}$$

Em que:

- F_{VC} corresponde à ação do vento sobre os condutores;
- F_{Isol} corresponde à ação do vento sobre os isoladores;
- P_C peso dos condutores;
- P_{Isol} peso dos isoladores;

3.2.19 Offset

Para garantir que os isoladores em suspensão se encontram verticalmente dispostos em relação ao solo e paralelos ao apoio importa que a tensão horizontal a que estão submetidos seja igual de ambos os lados, independentemente dos comprimentos dos vãos adjacentes e respetivos desníveis.

Durante o processo de passagem dos condutores, quando um condutor se encontra em roldanas consideradas ideais, sem atrito, e em terreno muito desnivelado, tende a atingir o equilíbrio num ponto em que a sua flecha é superior à calculada para pinças nos vãos inferiores, e uma flecha inferior nos vãos superiores. Este efeito é possível ser verificado na figura 3.10. As roldanas tendem a inclinar em direção ao apoio com maior elevação. Devido a este efeito é necessário calcular o valor da flecha para a situação de suspensão em roldanas. A diferença na tensão horizontal em dois vãos adjacentes, quando em repouso sobre roldanas, depende da diferença de cotas entre os pontos de cota de altura mínima dos respetivos vãos e o peso do condutor. [13]

Esta relação está descrita na equação 3.15.

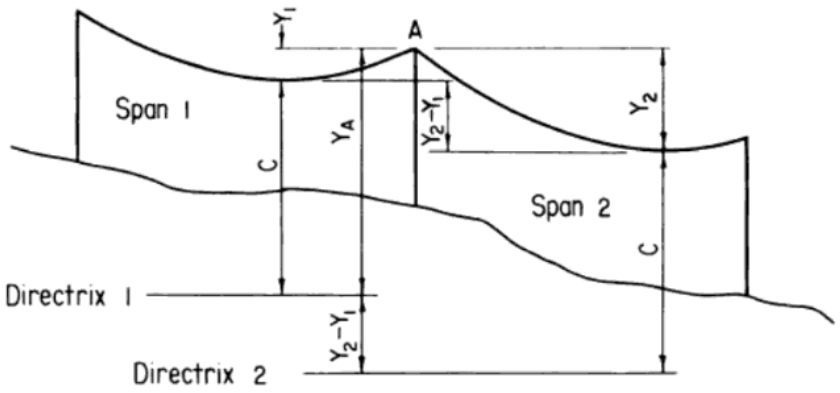


Figura 3.9: Desvio transversal da cadeia de isoladores [11]

$$H_i = H_k - w(y_2 - y_1) \tag{3.15}$$

Esta expressão corresponde também à componente horizontal da tensão a que está submetido o condutor. Isto faz com que o isolador tenha tendência a pender para um dos lados e a deixar a perpendicularidade com o terreno que se pretende, ou seja, o isolador deve estar o mais possível alinhado com o apoio. Quando o condutor é fixado às pinças de suspensão e regulado para as flechas contempladas no projeto, a diferença de tensão entre vão adjacentes irá ser tendencialmente nula, e o isolador deve estar suspenso com a condição de perpendicularidade anteriormente referida. [13]

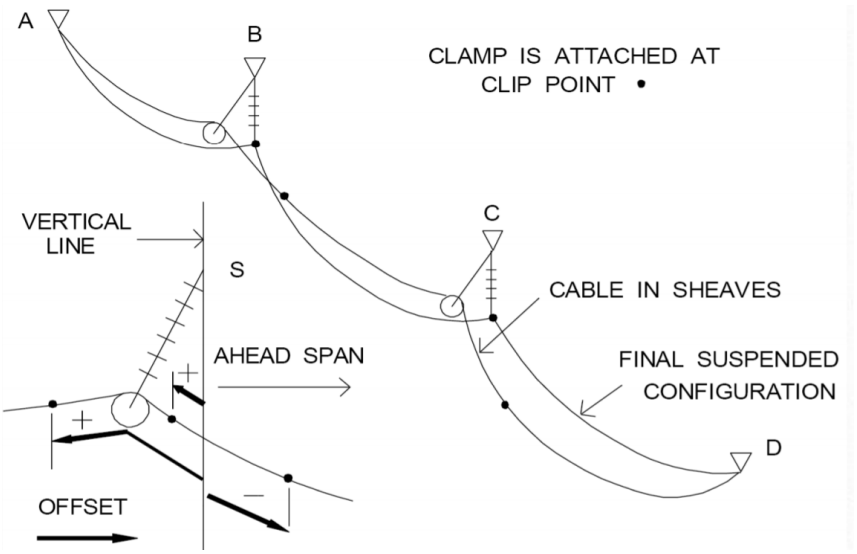


Figura 3.10: Desvio transversal da cadeia de isoladores [10]

A chave para este equilíbrio é que o somatório do comprimento do condutor entre vãos quando

suspenso em roldanas deve ser igual ao somatório do comprimento do condutor quando suspenso em pinças.

3.2.20 Distâncias regulamentares a cumprir

As distâncias mínimas a que os condutores devem estar colocados estão indicadas no RSLEAT. O regulamento prevê um conjunto de distâncias que os condutores de uma linha devem manter a outros elementos da linha ou a obstáculos, por forma a garantir a segurança de equipamentos e principalmente de pessoas. A REN, nas suas linhas, tem distâncias de segurança ainda superiores às mínimas exigidas no regulamento conforme indicado na seguinte tabela.

Tabela 3.4: Distâncias mínimas de segurança usadas nas linhas MAT pela REN. [1]

Tensão Nominal (kV)	150	220	400
Elemento	**Distâncias de Segurança (m)**		
Solo	10	12	14
Árvores	4	5	8
Edifícios	5	6	8
Estradas	11	12	16
Vias férreas electrificada	14(a)	15(a)	16(a)
Vias férreas não electrificadas	11	12	15
Outras linhas aéreas	4(a)	5(a)	7(a)
Obstáculos diversos	4	5	7

(a) Considerando o ponto de cruzamento a 200 m do apoio mais próximo

3.3 Resumo

O cálculo mecânico tem uma importância fulcral no projeto de uma linha aérea de MAT. É um processo complexo que permite garantir que são cumpridas as condições técnicas fixadas no RSLEAT e nos regulamentos da REN, no caso das linhas aéreas do sistema nacional de transporte de energia. Estes cálculos são realizados por programas computorizados. No entanto, é necessário conhecer conceitos por trás dos resultados obtidos, de forma a que o projetista tenha conhecimento para saber as alterações que devem realizadas quando as condições exigidas não são cumpridas. Particularmente, nesta dissertação, são importantes os aspetos teóricos sobre a flecha do cabo, aspeto que será amplamente explorado no capítulo seguinte no desenvolvimento da ferramenta de calculo. Pela natureza das linhas em análise, os métodos de cálculo usados têm de ser de precisão superior às linhas de classes inferiores.

Capítulo 4

Desenvolvimento da ferramenta de cálculo de flechas

Neste capítulo está retratado o processo usado para elaborar as rotinas da ferramenta de cálculo de flechas dos condutores, assim como de determinação das tensões de montagem. O desafio lançado pela PROEF contempla a criação de uma ferramenta de auxílio ao cálculo de flechas de montagem, em pinças ou em roldanas. Deve ser dada a tração a aplicar nos condutores conforme a temperatura do dia em que seja efetuada a regulação, assim como a flecha e o parâmetro da catenária. Desta forma, importa explorar o método usado para o efetuar estes cálculos partindo dos pressupostos que foram sucintamente explorados no capítulo anterior.

Em linhas MAT, devido ao tamanho dos apoios e às caraterísticas da linha, os vãos implementados são na generalidade de grande comprimento. Existe ainda a agravante de em zonas de terreno acidentado existirem grandes desníveis entre apoios consecutivos. Estas situações implicam uma dificuldade acrescida no cálculo da flecha do condutor, não sendo admissível o uso de métodos que impliquem grandes aproximações uma vez que o erro que advém dessas aproximações aumenta com o comprimento e desnível dos vãos. [7]

4.1 Metodologia a usar

Das informações que constam no projeto que chega à PROEF, importa analisar o desenho de perfil da linha onde consta a informação do parâmetro da catenária para os condutores e cabos de guarda, assim como a tração máxima admissível, e o comprimento do vão. Na memória descritiva vem a informação sobre o tipo de condutor a utilizar, através da ficha técnica do fabricante é possível obter os parâmetros do condutor que são necessários.

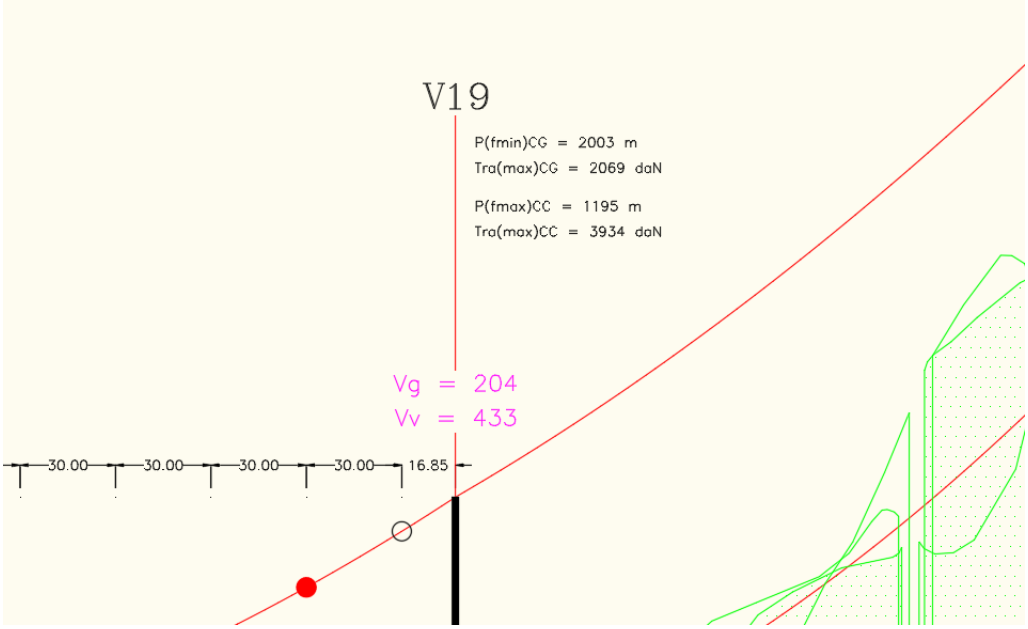


Figura 4.1: Excerto do desenho de perfil de uma linha.

$$P = \frac{t_i * \sigma}{\omega}[m] \tag{4.1}$$

Conforme disposto no capítulo anterior, o parâmetro P é calculado através da seguinte expressão:

Sendo:

- σ é a secção do cabo, em mm^2;
- t_i é a tensão mínima verificada, em daN/mm^2;
- ω é o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m.

Tendo a informação do valor de projeto do parâmetro P, e acedendo à informação técnica disponibilizada pelo fabricante do condutor, com facilidade se obtém a tração para a temperatura de referência. O valor da tração obtida é de particular relevância para a regulação do cabo durante a colocação e depende necessariamente das condições atmosféricas. Uma vez que se considera que a regulação do cabo apenas é efetuada em condições de vento muito reduzido e sem acumulação de gelo, considera-se apenas a ação que a temperatura tem sobre o condutor. Quando a temperatura diminui o condutor tem tendência a contrair. Em oposição, quando a temperatura aumenta o condutor dilata. Desta forma, o comprimento total do cabo varia com a temperatura, fazendo com que as solicitações mecânicas aos apoios sejam também variáveis. Esta variação é traduzida pelo coeficiente de dilatação térmica linear, que é uma propriedade intrínseca dos materiais usados no fabrico dos condutores. [7]

Neste sentido, é possível afirmar que o valor da tração t_i varia em sentido oposto ao da variação da temperatura. Por essa razão, a tração de montagem tem de ser indexada a uma gama de

temperaturas, geralmente em intervalos de 5º C, que será transmitida aos operadores que realizem a regulação.

A forma mais adequada de se calcular esta variação é recorrendo à chamada equação dos estados, que relaciona o efeito mecânico dos estados atmosféricos nos condutores, conhecendo os valores de um outro estado atmosférico nesse mesmo vão. Para obter as trações de montagem para as diferentes temperaturas, será tido como base o estado atmosférico de referência para o qual é fornecido o parâmetro P e posteriormente calculada a tração t_i. [7]

Posteriormente, para cada temperatura num intervalo previamente definido é calculada a tração correspondente a esse estado atmosférico. Este cálculo é realizado através da ferramenta *Solver* do *Excel*.

Cada um dos argumentos da equação que se encontram entre parêntesis corresponde a um determinado estado atmosférico de um vão. Desta forma, a única variável que irá mudar é a temperatura considerada, levando por isso a uma variação da tração correspondente. Assim, a variável que importa definir é a tração que, para uma determinada temperatura, torna a igualdade verdadeira. Ou, de forma a conseguir efetuar o cálculo no Excel, encontrar a tração que torna a soma algébrica de toda a equação igual a zero.

$$\left(\theta_i + \frac{t_{serv}}{E*\alpha} - \frac{m_i^2 * w^2 * L_{cr}^2}{24*\alpha*\sigma^2*t_i^2}\right) - \left(\theta_k + \frac{t_{serv}}{E*\alpha} - \frac{m_k^2 * w^2 * L_{cr}^2}{24*\alpha*\sigma^2*t_k^2}\right) = 0 \tag{4.2}$$

Em que:

- σ é a secção do condutor, em mm^2;
- θ_i e θ_i são as tensões mecânicas de serviço aplicadas aos condutores nos estados i e k, em daN/mm^2;
- L é o comprimento do vão, em m;
- E é o módulo de elasticidade do conduto, em daN/mm^2;
- ω é o peso próprio do condutor, em daN/m;
- α é o coeficiente de dilatação térmica do condutor, em $^oC^-1$;
- θ_i e θ_k são as temperaturas do estado i e do estado k, respetivamente, em C;
- m_i e m_k são os coeficientes de sobrecarga do estado i e do estado k, respetivamente.

Após encontrado esse valor, a operação é repetida para as outras temperaturas de acordo com o intervalo definido. Obtidos estes valores, importa determinar o parâmetro P correspondente a cada temperatura pois será necessário em cálculos posteriores. Para isso é necessário recorrer novamente à equação 4.1 e às caraterísticas técnicas do cabo. As grandezas trigonométricas terão de ser convertidas para radianos de modo cumprir os requisitos de cálculo do Excel.

Deve agora ser calculado o *offset*. Conforme referido anteriormente, durante o processo de regulação dos condutores, quando um condutor se encontra em roldanas consideradas ideais e sem atrito, particularmente terreno muito desnivelado, tende a atingir o equilíbrio num ponto em que a sua flecha é superior à calculada para pinças nos vãos inferiores, e uma flecha inferior nos vãos superiores. As roldanas tendem a inclinar em direção ao apoio com maior elevação o que

provoca uma variação na flecha medida. Desta forma, importa quantificar a diferença efetiva que haverá na flecha verificada conforme o condutor esteja suspenso em pinças ou roldanas. Para isso é utilizado o método proposto por *Winkelman* para cálculo da correção da flecha.

Este método faz uso de algumas aproximações, uma vez que quando foi proposto as ferramentas de cálculo disponíveis não permitiam calcular com facilidade operações trigonométricas hiperbólicas. Não será por isso considerado o método de cálculo de flecha proposto no artigo para a tabela de cálculo do offset uma vez que faz uso de algumas aproximações. Esta tabela será usada apenas o cálculo do fator de correção para roldanas, sendo as flechas em pinças calculadas como anteriormente descrito.

Tabela 4.1: Cálculo do *offset* e fator de correção da flecha para suspensão em roldanas. [13]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vão	Comp. do Vão	y2-y1	w(y2-y1)	Variação de Tensão	Offset DaN	Estimativa Offset (mm)	Correção da Tensão	Offset Corrigido em (mm)	Modulo de correção em (mm)	Ajuste final em (mm)	Offset final em (mm)	Somatório do Offset	Correção da flecha em Roldanas
			w(3)	$\sum$ (4)	$\frac{w^2A^4}{H_0^2}$	(5)(6)	$\frac{\sum(7)}{\sum(6)} - (5)$	(6)(8)	$\frac{(2)(8)}{SE}$	$\frac{\sum(9)+\sum(10)}{\sum(6)}(6)$	(9)+(10)+(11)	$\sum$ (12)	$\frac{(9)H_0}{8w(2)}$

Sendo:

• Os números entre parêntesis correspondentes ao número da coluna;

• y_2-y_1, a diferença entre os pontos mínimos flecha de dois vãos adjacentes no perfil de flecha máxima;

• A, comprimento do vão, em metros;

• ω é o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m;

• H_0, tensão de projeto para o cantão, em daN;

• S, secção total do cabo, em mm^2;

• E, módulo de Young final, em N/mm^2;

Nas 2 primeiras colunas estão representados dados referentes a caraterísticas da linha que constam no desenho de perfil da linha. Na coluna (3) é calculado y_2-y_1 este valor é calculado com recurso à equação 4.3:

$$y_2 - y_1 = \frac{t_i\sigma}{\omega}\left(cosh\left(\frac{A - xa}{\frac{t_i\sigma}{\omega}}\right) - cosh\left(\frac{xa}{\frac{t_i\sigma}{\omega}}\right)\right) \tag{4.3}$$

Na coluna seguinte este valor é multiplicado pelo peso do condutor, dando origem à diferença de tensão horizontal entre os dois vãos adjacentes. Esta é a diferença de tensão que faz com que o isolador não fique perpendicular quando colocado em pinças. A diferença na tensão horizontal tende a ficar mais baixa em vãos descendentes e mais elevada em vãos ascendentes. Na coluna (5), este valor é somado com o valor correspondente ao vão anterior, fazendo com que seja levado em consideração em cada vão a influência de todos os vãos anteriores. O valor considerado no primeiro vão é a tensão horizontal de referência. As operações correspondentes às colunas seguintes encontram-se indicadas na tabela 4.1.

No que toca ao *offset* importa considerar a coluna (13), onde é apresentado o comprimento a medir em milímetros. Este é o valor que o técnico responsável pela regulação deve medir em

relação ao ponto de repouso da roldana para cravar a pinça de modo a que o isolador se encontre perfeitamente perpendicular ao solo. No método proposto por *Winkelman* é considerado que a influência da temperatura durante o processo de regulação não tem influência relevante nos resultados obtidos, sendo suficiente o cálculo para a temperatura de referência. [13]

No caso das tabelas de regulação que se pretende obter, uma vez que os valores são indicados numa amplitude de temperatura muito grande, são efetuados os cálculos especificamente para cada temperatura, conforme será explicado no presente capítulo. Foi efetuado outro melhoramento, que corresponde ao cálculo das flechas através do método hiperbólico, enquanto no método originalmente descrito por *Winkelman* eram usadas aproximações hiperbólicas. [13]

4.2 Cálculo da flecha de montagem

Nesta fase, importa efetuar o cálculo da flecha para cada temperatura considerada, dispondo para isso das respetivas trações. É usado o método hiperbólico por ser o que apresenta resultados mais aproximados da realidade. O passo que é mais determinante para a obtenção de resultados satisfatórios é o cálculo do valor x_a que corresponde à distância entre o apoio e a projeção do ponto mínimo da curva efetuado pelo condutor. Pela natureza das linhas em análise os métodos de cálculo usados têm de ser de precisão superior às linhas de classes inferiores. [7]

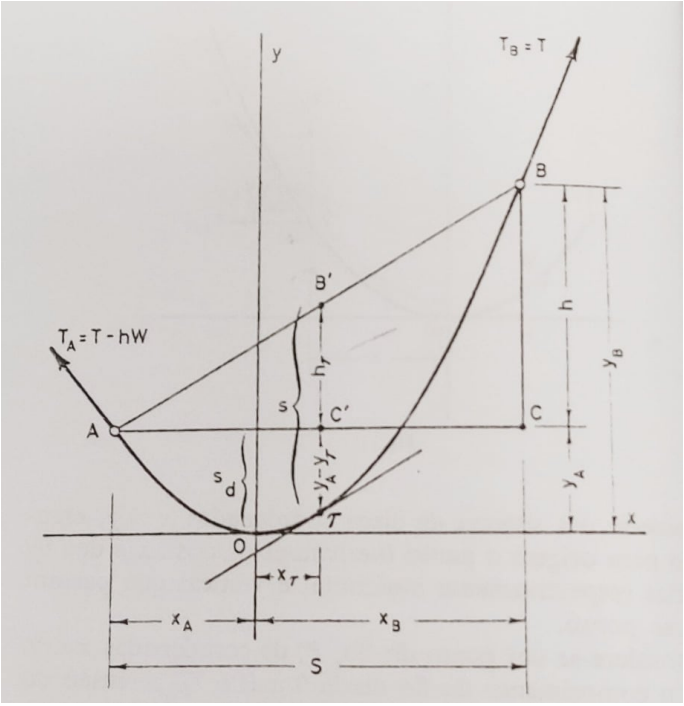


Figura 4.2: Representação gráfica da curva representativa do comportamento de um condutor segundo a catenária. [12]

Para este cálculo podem ser usados diversos métodos. Quando este problema começou a ser colocado o acesso a ferramentas de cálculo computacional era muito reduzido, e a inclusão

na fórmula de funções trigonométricas hiperbólicas correspondia a uma dificuldade acrescida no processamento dos dados, uma vez que conduzia à utilização de series complexas. Por essa razão, diversos autores desenvolveram aproximações e métodos que simplificavam o processo de cálculo. O traço comum entre todos os métodos sugeridos era a utilização de tabelas universais de forma a evitar, tanto quanto possível, a utilização de métodos iterativos. Joaquim Moura Relvas sugeriu a utilização de um método que recorria a tabelas previamente calculadas que simplificavam o processo de cálculo e melhoravam os resultados obtidos ao introduzir um fator que levava em consideração um fator de desnível. Este fator correspondia de forma simplificada ao declive entre o topo dos dois apoios em consideração. De referir que António Machado e Moura, em 1975 enquanto jovem assistente da FEUP publicou um trabalho intitulado "Novas Tabelas Universais para o Cálculo Mecânico de Condutores e Fios de Guarda de Linhas Aéreas de Transporte de Energia Elétrica", que dava continuidade às propostas e sugestões do Eng. Joaquim Moura Relvas. Este trabalho representava uma tentativa de melhoria dos métodos propostos por Giovanni Silva e James Martin. [24] [25]

As tabelas estavam organizadas por grupos, correspondendo cada grupo a um determinado fator de desnível, desde o valor nulo que correspondia a apoios de nível até o valor unitário. É possível perceber que, estando os valores dispostos em escalões, os vãos que apresentassem fatores de desnível entre escalões teriam um erro acrescido. Embora meritório, este tipo de aproximação para determinação do cálculo de flechas não é suficientemente exato. Sucede que, particularmente em situações de vãos de elevado comprimento, e em terreno acidentado, bastante comuns em linhas MAT, os resultados obtidos por esses métodos não são satisfatórios para a exigência atual. [12]

Embora muitos dos autores que exploraram este tema sugiram o uso deste tipo de métodos, com os meios de cálculo atualmente disponíveis é mais indicado o uso de métodos exatos. Embora o método adotado não seja exatamente o proposto pelo Eng. Joaquim Moura Relvas, ou Giovanni Silva, os seus estudos sobre o tema, nomeadamente a dedução das expressões físicas fundamentais, são vitais para esta resolução e compreensão das variáveis em questão. De destacar o método de cálculo do comprimento x_a em que são propostas por diversos metodos de cálculo. [12]

Após análise de cada uma das alternativas apontadas conclui-se que o método que apresenta resultados mais satisfatórios é o proposto na equação (4.3). O método consta do artigo de *Winkelman* que é ainda hoje a base para o estudo do comportamento dos condutores. O método proposto no artigo está na base da ferramenta de cálculo PLS-CADD, pelo que como seria de esperar é este o que apresenta resultados mais próximos dos que estão a ser usados para comparação e validação. [13]

$$x_a = \frac{A}{2} - \frac{t_i * \sigma}{\omega} cosh\left(\frac{\frac{h}{2}}{\frac{t_i*\sigma}{\omega} * senh\frac{\frac{L}{2}}{\frac{t_i*\sigma}{\omega}}}\right)[m] \tag{4.4}$$

Sendo:

- A, distância entre apoios, em metros;

• h, a diferença de altura entre os apoios dos condutores, em metros;

Após obtidos estes dados, estão reunidas as condições para o càlculo da flecha do condutor segundo a equação (4.4) de acordo com o método proposto por *Winkelman*. Neste passo, a forma de proceder ao cálculo é unânime entre a bibliografia consultada.

$$f = \frac{t_i * \sigma}{\omega} \left(cosh \left(\frac{x_a}{\frac{t_i * \sigma}{\omega}} \right) - 1 \right) [m] \tag{4.5}$$

Sendo:

• σ, a secção do cabo, em mm^2;

• t_i, a tensão mínima verificada, em daN/mm^2;

• ω, o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m.

O valor da flecha é então obtido usando o valor do parâmetro P, correspondente à temperatura. Como era esperado, para um determinado vão, com o aumento da temperatura, o parâmetro da linha diminui, e a flecha tende a aumentar. Estes valores devem constar numa ficha entregue aos responsáveis pelo processo de regulação dos condutores.

4.2.1 Exemplo número de cálculo da flecha de montagem

A linha da Falagueira é uma linha de 400kV que usa condutores do tipo ACSR 595 Zambeze. As caraterísticas deste cabo estão descritas na tabela 4.1 de acordo com as informações fornecidas pela Cabelte, empresa responsável pelo fornecimento dos condutores.

Tabela 4.2: Características técnicas do cabo ACSR 595 Zambeze da Cabelte

ACSR 595 Zambeze	
Secção nominal do cabo (mm^2)	595
Secção total do cabo (mm^2)	594,97
Peso do cabo, com massa de protecção (kg/m)	1,769
Modúlo de Young final (N/mm^2)	61 500
Coeficiente de dilatação linear (1/^{o}C 10^-6)	21,2
Carga de ruptura mínima (daN)	11 967

Tabela 4.3: Características do vão em análise

Vão (m)	489.36
Desnível (m)	15.37
Parâmetro (m)	1500
Condutor	ACSR 595

A primeira operação a efetuar é o cálculo do valor de x_a, tendo por base a equação (4.3):

$$x_a = \frac{489.36}{2} - 1500cosh\left(\frac{\frac{15.37}{2}}{1500senh\left(\frac{\frac{489.36}{2}}{1500}\right)}\right) = 244.75[m] \tag{4.6}$$

Estando determinada a distância x_a, estão agora reunidos todos os dados necessários para o cálculo da flecha em pinças, é usada para esse cálculo a expressão (4.4) tal que:

$$f_p = 1500\left(cosh\left(\frac{244.75}{1500}\right) - 1\right) = 20.01[m] \tag{4.7}$$

Para o cálculo do fator de correção para roldanas e do *offset* é necessária informação de todo o cantão e não apenas do vão em análise. Esta informação encontra-se na tabela (4.4), e é, então, usada na folha de cálculo que se encontra representada na figura (4.3).

Tabela 4.4: Caraterísticas do cantão em análise

Vão	Comprimento do vão (m)	Desnível (m)
7-8	348.92	-14.15
8-9	301.95	-4.35
9-10	372.56	-16.15
10-11	413.13	1.85
11-12	384.8	-8.72
12-13	489.36	15.37

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7 8													0,00	
	348,92	-14,15			0,00	0,592	0,00	-51,45	-30,47	-0,491	0,046	-30,92		-0,16
8 9			-14,11	-24,97									-30,92	
	301,95	-4,35			-24,97	0,384	-9,58	-26,48	-10,16	-0,219	0,030	-10,35		-0,06
9 10			-4,38	-7,76									-41,27	
	372,56	-16,15			-32,73	0,721	-23,59	-18,72	-13,50	-0,191	0,056	-13,63		-0,07
10 11			-16,46	-29,12									-54,90	
	413,13	1,85			-61,85	0,983	-60,80	10,40	10,22	0,117	0,076	10,42		0,05
11 12			1,93	3,42									-44,49	
	384,8	-8,72			-58,43	0,794	-46,41	6,98	5,54	0,073	0,061	5,68		0,03
12 13			-9,33	-16,51									-38,81	
	489,36	15,37			-74,93	1,634	-122,43	23,48	38,37	0,314	0,126	38,81		0,15
			16,94	29,97									0,00	
					-44,96									

Figura 4.3: Cálculo do *offset* e fator de correção da flecha para suspensão em roldanas num cantão.

Conforme calculado, a flecha, quando o condutor se encontra em roldanas, sofre uma variação de 0.15 metros.

$$f_r = 20.01 + 0.15 = 20.16[m] \tag{4.8}$$

No caso do vão em análise, o valor do *offset* é de aproximadamente 39mm. Sendo este valor positivo, a distância deve ser medida em direção ao vão inicial do cantão conforme o demonstrado na figura 3.10.

Os valores, quer da flecha para roldanas, quer do *offset*, devem ser obtidos para cada uma das temperaturas consideradas na folha de regulação. Uma vez que os métodos usados para estes cálculos usam aproximações, é sempre efetuado o cálculo para pinças, usando o valor do parâmetro fornecido em projeto, e posteriormente feitas as correções. Desta forma, para cada apoio, é necessário efetuar um cálculo conforme o disposto na figura 4.4 para cada uma das temperaturas consideradas, pelo que este processo será automatizado na ferramenta desenvolvida. É válido considerar a temperatura uniforme em cada cantão pois a regulação deve ser feita num espaço de tempo que garanta que a variação de temperatura não é significativa. [13]

Uma vez obtida a flecha para o estado atmosférico de referência, importa determinar os valores para diferentes temperaturas que se possam verificar no dia em que for efetuada a montagem. De forma a simplificar o procedimento entregue aos técnicos responsáveis pela regulação, é considerada a temperatura em intervalos de 5°C. Para o cálculo da tração correspondente ao parâmetro de referência importa considerar o peso do cabo por unidade de comprimento. Esta grandeza deve ser apresentada em DaN/m, pelo que os dados fornecidos pelo fabricante devem ser convertidos tendo em conta a aceleração gravítica. [7]

$$H = P * \omega[daN] \tag{4.9}$$

Sendo:

- H, tração a aplicar ao cabo, em daN;
- P, parâmetro da curva, em metros;
- ω, peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m.

De modo a determinar a tração que irá ser designada de H, é usada a expressão (4.1):

Desta forma, a tração é dada por:

$$H = 1500 * 1.769 = 2655[daN] \tag{4.10}$$

Como anteriormente referido, a variação da temperatura tem influência no comprimento do condutor, tendo por isso influência na tração exercida nos apoios e consequentemente na flecha que se verifica.

Para determinar o novo valor de tração, recorre-se à equação dos estados atmosféricos. Esta equação relaciona a tensão mecânica dos condutores num qualquer estado atmosférico, conhecendo o seu valor em outro estado atmosférico do mesmo vão. Como exemplo, será calculada a tensão para o caso de a temperatura no dia de regulação ser de 25°C. Para isso é usada a equação (3.7) que se encontra programada no *Excel*, conforme ilustrado na figura (4.4). O valor do parâmetro *m* é unitário uma vez que não se considera a influência do vento. A regulação dos condutores

é efetuada apenas em dias de ausência de vento significativo. Para efetuar este cálculo é usado o vão equivalente do cantão em análise, que neste caso toma o valor de 398.20 metros, sendo usada a expressão (3.6) para chegar a este valor.

i	Nova	k	Referencia	Tração de Referencia
θ	25	θ	15	2655
t	4,3268	tmax (daN/mm2)	4,464	Traçao Nova
α	0,0000212	α	0,0000212	2573
E	6150	E (daN/mm2)	6150	
m	1	m	1	
ω	1,769	ω (daN/m)	1,769	
Lmedio	398,2	Lmedio	398,2	
σ	594,7	σ (mm2)	594,7	
Tr	2573	Tr	1622	
Resultado		Resultado		
-89,10918809		-89,10918813		

Figura 4.4: Interface da ferramenta de cálculo de mudança de estado atmosférico de forma manual

Usando a ferramenta *Solver* do *Excel*, foi determinada a tração para a nova temperatura atmosférica, que é de 2573 daN. Como era esperado, o aumento da temperatura considerada provocou uma diminuição na tração do condutor.

Partindo do valor calculado, é possível obter o respetivo parâmetro da curva e repetir o cálculo anteriormente exposto, de forma a obter a respetiva flecha em pinças e roldanas, assim como o *off-set*. Para chegar aos restantes valores, terá de ser repetido este processo para todas as temperaturas pretendidas.

4.3 Funcionamento da ferramenta de cálculo

A ferramenta de cálculo efetuada dispõe da capacidade de armazenar as caraterísticas dos cabos condutores ou de guarda. Os dados relativos aos cabos estão numa folha do Excel facilmente acessível e alterável, conforme mostrado na figura 4.5. É importante que os dados sejam facilmente alteráveis pois, para a mesma referência de cabo, dependendo do fabricante, podem existir pequenas diferenças nos valores que são importantes na fase de cálculo. Por essa razão os dados são armazenados numa folha de *Excel* adjacente à principal.

Para importar os dados do cabo pretendido na ferramenta de cálculo basta aceder à lista e selecionar a referência correspondente, conforme ilustrado na figura 4.6.

Posteriormente, deve ser indicado qual o vão inicial e vão final do cantão. O número do vão inicial deve ser inferior ao do vão final. Deve também ser indicado o parâmetro de referência da catenária. Este valor consta no desenho de perfil da linha. Após preenchidas estas informações deve ser selecionado o objeto com a indicação "atualizar".

Este objeto tem uma macro atribuída que faz com que na folha surjam apenas os campos correspondentes aos vãos indicados. Isto facilita a verificação dos dados, de modo a não haver repetição nem enganos no preenchimento dos mesmos. Todos os campos que têm de ser preenchidos para efetuar o cálculo encontram-se sombreados a verde, de modo a facilitar a sua identificação.

Designação	N.Comercial	Secção	Peso (daN/m)	Mod.Elasticidade	Coef.Dilatação
AAAC 570	Aster 570	570,24	1,544	53980	0,000023
ACSR 325	Bear	326,12	1,215	79500	0,0000178
ACSR 153	Dorking	152,81	0,717	104500	0,0000153
ACSR 130	Guinea	127,24	0,596	104500	0,0000153
ACSR 260	Panther	261,20	0,955	78155	0,00001773
AACSR147,1	Pastel147,1	147,11	0,548	83970	0,0000181
ACSR 374	Tejo	373,90	1,584	91630	0,00001575
ACSR 595	Zambeze	594,97	1,7695	61500	0,0000212
ACSR 485	Zebra	484,48	1,612	68000	0,0000193
ACSR/AW 517	RAIL AW	517,39	1,532	61937	0,0000213

Figura 4.5: Forma de armazenamento dos dados relativos aos cabos condutores e de guarda

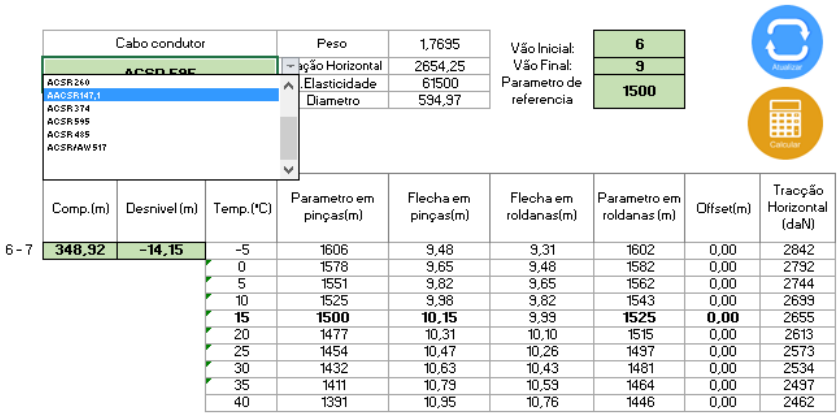


Figura 4.6: Forma de seleção dos dados relativos aos cabos condutores e de guarda

De seguida, devem ser preenchidos os campos correspondentes a cada vão. Deve ser indicado o comprimento do vão e o respetivo desnível. Também estas informações constam no perfil da linha, ou são fornecidas nos relatórios topográficos no caso de haver uma alteração ao projeto inicial. Uma vez preenchidos todos os dados, basta selecionar o objeto com a indicação "calcular" e são efetuados todos os cálculos necessários e apresentados os valores nas tabelas de regulação.

Todos os passos necessários à obtenção dos valores que constam na tabela de regulação correm na respetiva folha de cálculo e com o auxílio de várias macros. Todos estes processos estão preparados para funcionar com cantões entre 1 e 29 vãos. Um cantão dificilmente excede os 15 vãos, pois, quanto mais elevado o número de vãos, mais difícil é o processo de regulação, até um certo ponto em que é a obtenção da verticalidade das cadeias é muito difícil obter. [7]

Numa primeira fase é calculado o vão equivalente, tendo por base a fórmula apresentada no capítulo anterior, utilizando com os valores dos comprimentos dos vãos introduzidos. O valor resultante é posteriormente utilizado para o cálculo das trações para os diferentes estados atmosféricos. Dentro de um mesmo cantão, a tração horizontal quando o condutor se encontra em pinças é igual para uma determinada temperatura. Desta forma, de modo a agilizar o processo de cálculo, basta efetuar o cálculo uma vez para o conjunto das temperaturas necessárias. Este cálculo é efetuado, conforme explicado no subcapítulo anterior, com recurso à ferramenta *solver* do *Excel*. Este

processo deve ser executado 10 vezes, correspondente aos 10 níveis de temperatura considerados.

Agora obtidas as trações horizontais correspondentes a cada temperatura, é possível obter o parâmetro da catenária. O parâmetro será então usado para o cálculo da distância x_a a e posteriormente para obter a flecha do condutor em pinças. Apenas nesta fase pode começar a ser calculado a correção a efetuar para a colocação do condutor em roldanas. Para isso, é usado o método que foi explicado anteriormente de cálculo de *offset* e correção de flechas em roldanas. Considerando que os valores da correção e do *offset* dependem da flecha e consequentemente do parâmetro da catenária, é efetuado o cálculo para todo o cantão, para cada gama de temperatura, em cada iteração. Sendo, por isso, uma vez mais, necessário repetir o processo 10 vezes.

Durante o preenchimento da tabela de cálculo do *offset* e fator de correção, é necessário o cálculo de vários somatórios. Este processo foi também realizado com o auxílio de macros do *Excel* de modo a ser adaptável consoante o número de vãos em análise. Todas os outros cálculos efetuados para obter a tabela de correção de flecha e *offset* são efetuados com recurso a uma *macro* do *Excel*. Os códigos utilizados em cada macro estão presentes no anexo A.

Após efetuado este cálculo, o valor obtido na coluna 14 correspondente ao fator de correção de flecha, é somado ao valor da flecha em pinças e colocado na tabela de regulação. O valor correspondente ao *offset* consta na coluna 13 e é colocado diretamente na coluna correspondente da tabela de regulação.

Uma vez obtidos estes valores, importa calcular o parâmetro da catenária a que corresponde a flecha corrigida. Para isso, é efetuado o procedimento oposto ao executado para obtenção da flecha em pinças. Uma vez disponível a flecha corrigida, é usada a ferramenta *solver* para calcular qual a tração a que corresponde essa flecha. Este valor deve constar na tabela de regulação pois será utilizado pelos responsáveis pelo processo de regulação para efetuar cálculos no terreno, conforme será explicado no capítulo 7.

Nesta fase já se encontram disponíveis todas informações necessárias na tabela de regulação, estando a informação pronta para ser entregue aos responsáveis pelo processo de colocação e regulação do cabo condutor.

4.4 Resumo

Na figura 4.7 encontra-se representado um fluxograma que resume os processos de cálculo descritos e que são efetuados em *background*.

A ferramenta funciona de forma simples para o utilizador, na medida em que todos os processos de cálculo ocorrem de forma autónoma. O método de operação está explicado no fluxograma da figura 4.8. e representa os passos que o utilizador deve efetuar para obter a tabela de regulação para o cantão em análise.

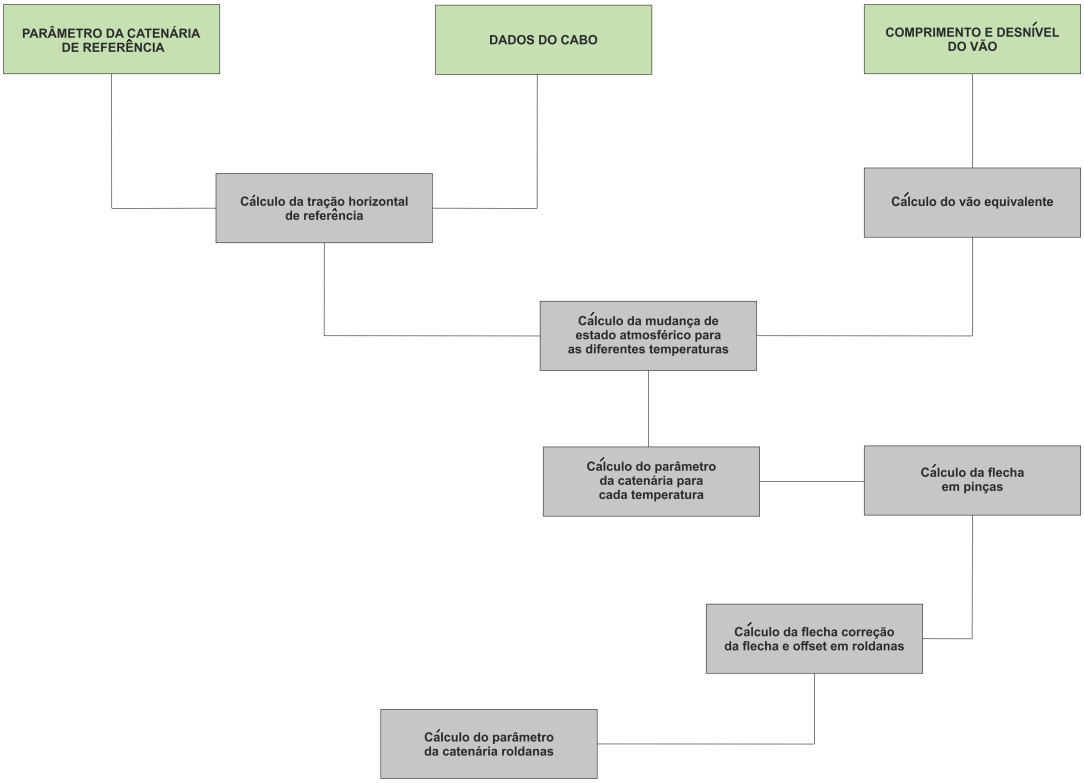


Figura 4.7: Fluxograma dos cálculos efetuados.

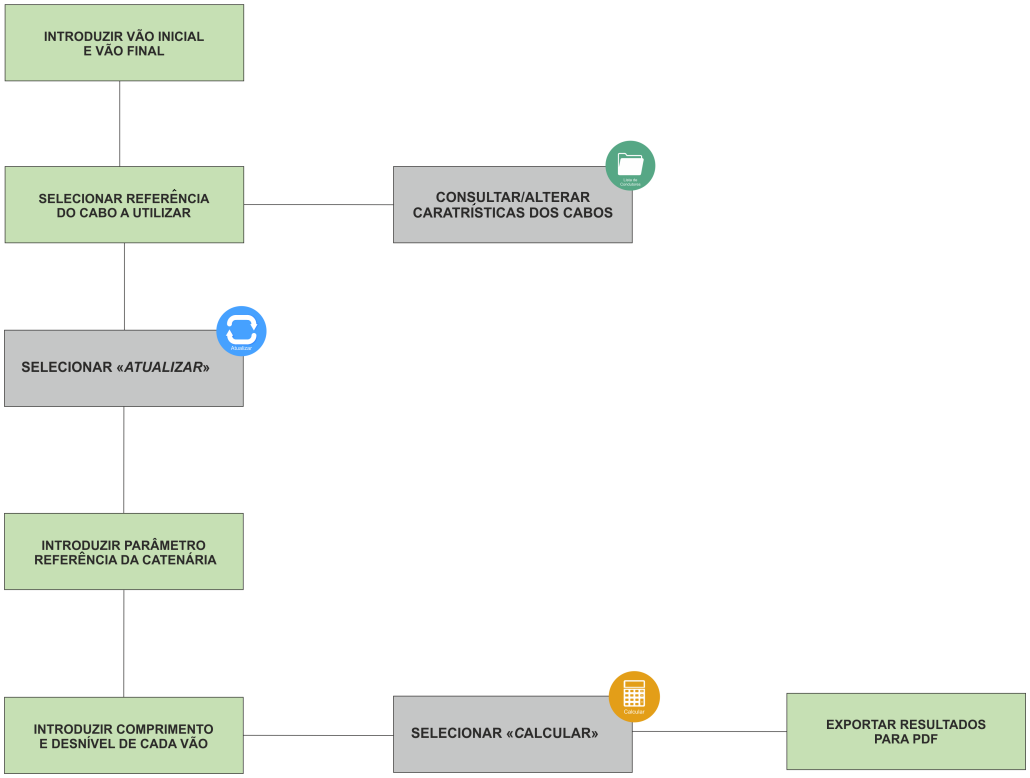


Figura 4.8: Fluxograma do método de operação da ferramenta de cálculo.

Capítulo 5

Comparação e análise de resultados

Após a obtenção dos valores, importa aferir a sua exatidão. A maneira mais fidedigna dos valores serem comprovados seria a sua utilização durante um processo de regulação real. Por razões expectáveis, relacionadas com os prazos de execução das obras e o custo económico que esse teste teria, não é possível ser efetuado. Desta forma, a solução encontrada para validar os resultados obtidos é a comparação com folhas de regulação de obras previamente realizadas, provenientes de programas de simulação, mais especificamente no PLS-CADD. Segundo as informações disponibilizadas pela empresa responsável pelo desenvolvimento deste software, o método usado para efetuar os cálculos de *offset* e flechas segue os prossupostos apresentados por *Winkelman*, não sendo apresentada mais nenhuma informação sobre a forma de cálculo. Neste seguimento, no presente capítulo, serão comparados os dados obtidos na ferramenta de cálculo efetuada e os dados que provêm do software, considerando esses como os valores corretos. Não se espera que sejam obtidos valores exatamente iguais. O procedimento de cálculo, embora baseado no mesmo método, não é certamente o mesmo. A empresa responsável pelo desenvolvimento do *software*, por razões de propriedade intelectual, não revela qual o algoritmo de cálculo. Em versões recentes, era anunciada uma nova funcionalidade em versão de teste que permitia um método melhorado em relação ao proposto por *Winkelman*. [26] Não dispondo da informação relativa ao método e valores usados, nunca é possível atingir exatamente os mesmo valores.

Os valores devem, no entanto, ter o mesmo comportamento e estar dentro de um intervalo de variação pequeno e que não ultrapasse, em caso algum, as margens de erro admitidas para as respetivas grandezas.

5.1 Análise do caso 1

O cantão em análise corresponde a um caso real de uma linha previamente executada da qual as folhas de regulação estão disponíveis. Corresponde a uma linha MAT de 400kV, com condutores do tipo Zambeze. A análise tem de ser feita na globalidade do cantão uma vez que os valores de flecha em roldanas e *offset* dependem dos vãos adjacentes.

O cantão analisado tem um vão médio próximo dos 400 metros, e está implementado numa zona com desníveis pouco acentuados, conforme é possível verificar nos desníveis apresentados. O número de vãos está dentro dos valores usuais numa linha desta classe.

Na figura 5.1 encontra-se representada a tabela de comparação de resultados: a verde estão os valores que constam na folha de regulação usada na obra executada; e sem sombreado estão os valores obtidos na ferramenta de cálculo.

Comp.(m)	Desnível (m)	Temp. ºC	Parametro em pinças(m)	Parametro em pinças (m) REN	Flecha em pinças(m)	Flecha em pinças(m) REN	Flecha em roldanas	Flecha em roldanas(m) REN	Parametro em roldanas (m)	Parametro em roldanas (m) REN	Offset(cm)	Offset(cm) REN	Tracção Horizontal (daN)	Tracção Horizontal (daN)
348,92	**-14,15**	-5	1606	1606	9,48	9,50	9,31	9,35	1636	1631	0,0	0,0	2842	2842
		0	1578	1578	9,65	9,66	9,48	9,51	1606	1603	0,0	0,0	2792	2792
		5	1551	1550	9,82	9,83	9,65	9,67	1578	1576	0,0	0,0	2744	2744
		10	1525	1524	9,98	10,00	9,82	9,84	1551	1550	0,0	0,0	2699	2698
7-8		**15**	**1500**	**1500**	**10,15**	**10,17**	**9,99**	**10,00**	1525	**1525**	0,0	**0,0**	2655	**2655**
		20	1477	1476	10,31	10,33	10,10	10,15	1508	1502	0,0	0,0	2613	2613
		25	1454	1453	10,47	10,49	10,26	10,31	1484	1479	0,0	0,0	2573	2572
		30	1432	1432	10,63	10,65	10,43	10,46	1461	1458	0,0	0,0	2535	2534
		35	1412	1411	10,79	10,81	10,59	10,61	1439	1437	0,0	0,0	2498	2497
		40	1392	1391	10,94	10,96	10,76	10,76	1415	1417	0,0	0,0	2462	2462
301,95	**-4,35**	-5	1606	1606	7,10	7,10	7,03	7,02	1621	1625	2,7	2,5	2842	2842
		0	1578	1578	7,23	7,23	7,16	7,14	1592	1597	2,8	2,6	2792	2792
		5	1551	1550	7,35	7,36	7,29	7,26	1564	1570	2,9	2,7	2744	2744
		10	1525	1524	7,48	7,48	7,42	7,39	1538	1544	3,0	2,9	2699	2698
		15	**1500**	**1500**	**7,60**	**7,61**	**7,54**	**7,51**	1513	**1520**	3,0	**3,0**	2655	**2655**
8-9		20	1477	1476	7,72	7,73	7,64	7,62	1492	1496	3,1	3,2	2613	2613
		25	1454	1453	7,84	7,85	7,76	7,74	1469	1474	3,2	3,3	2573	2572
		30	1432	1432	7,96	7,97	7,88	7,86	1447	1452	3,2	3,4	2535	2534
		35	1412	1411	8,08	8,09	8,00	7,97	1425	1431	3,3	3,6	2498	2497
		40	1392	1391	8,20	8,20	8,13	8,08	1403	1411	3,4	3,7	2462	2462
372,56	**-16,15**	-5	1606	1606	10,81	10,83	10,74	10,80	1616	1610	3,8	3,8	2842	2842
		0	1578	1578	11,00	11,02	10,93	10,99	1588	1582	3,8	4,0	2792	2792
		5	1551	1550	11,19	11,22	11,13	11,18	1560	1555	3,9	4,2	2744	2744
		10	1525	1524	11,38	11,41	11,32	11,37	1534	1529	4,3	4,4	2699	2698
		15	**1500**	**1500**	**11,57**	**11,60**	**11,51**	**11,56**	1509	**1504**	4,4	**4,6**	2655	**2655**
9-10		20	1477	1476	11,76	11,78	11,67	11,74	1488	1481	4,7	4,8	2613	2613
		25	1454	1453	11,94	11,97	11,86	11,93	1465	1458	4,9	5,0	2573	2572
		30	1432	1432	12,12	12,15	12,04	12,11	1442	1437	5,0	5,3	2535	2534
		35	1412	1411	12,30	12,33	12,22	12,29	1421	1416	5,1	5,5	2498	2497
		40	1392	1391	12,48	12,50	12,40	12,46	1400	1396	5,3	5,7	2462	2462
413,13	**1,85**	-5	1606	1606	13,30	13,31	13,35	13,34	1600	1602	4,5	4,3	2842	2842
		0	1578	1578	13,54	13,54	13,59	13,58	1572	1574	4,8	4,5	2792	2792
		5	1551	1550	13,78	13,78	13,83	13,82	1545	1547	5,1	4,7	2744	2744
		10	1525	1524	14,01	14,02	14,06	14,05	1520	1521	5,2	5,0	2699	2698
		15	**1500**	**1500**	**14,24**	**14,25**	**14,29**	**14,29**	1496	**1496**	5,3	**5,2**	2655	**2655**
10-11		20	1477	1476	14,47	14,48	14,53	14,52	1471	1472	5,4	5,5	2613	2613
		25	1454	1453	14,70	14,70	14,76	14,74	1448	1450	5,5	5,7	2573	2572
		30	1432	1432	14,92	14,93	14,98	14,97	1427	1428	6,0	6,0	2535	2534
		35	1412	1411	15,14	15,15	15,20	15,19	1406	1407	6,2	6,3	2498	2497
		40	1392	1391	15,36	15,37	15,41	15,41	1387	1387	6,6	6,5	2462	2462
384,8	**-8,72**	-5	1606	1606	11,54	11,54	11,57	11,59	1602	1600	3,9	3,6	2842	2842
		0	1578	1578	11,74	11,75	11,77	11,79	1574	1572	4,0	3,8	2792	2792
		5	1551	1550	11,95	11,96	11,98	12,00	1547	1545	4,1	4,0	2744	2744
		10	1525	1524	12,15	12,16	12,18	12,21	1522	1519	4,2	4,2	2699	2698
		15	**1500**	**1500**	**12,35**	**12,36**	**12,38**	**12,41**	1497	**1494**	4,3	**4,4**	2655	**2655**
11-12		20	1477	1476	12,55	12,56	12,58	12,61	1473	1470	4,3	4,6	2613	2613
		25	1454	1453	12,74	12,76	12,78	12,81	1450	1448	4,7	4,8	2573	2572
		30	1432	1432	12,94	12,95	12,97	13,00	1429	1426	4,8	5,1	2535	2534
		35	1412	1411	13,13	13,14	13,16	13,20	1408	1405	4,9	5,3	2498	2497
		40	1392	1391	13,32	13,33	13,35	13,39	1388	1385	5,1	5,5	2462	2462
489,36	**15,37**	-5	1606	1606	18,69	18,69	18,84	18,81	1593	1595	3,0	2,8	2842	2842
		0	1578	1578	19,02	19,02	19,17	19,15	1566	1567	3,2	2,9	2792	2792
		5	1551	1550	19,35	19,36	19,50	19,49	1539	1540	3,5	3,1	2744	2744
		10	1525	1524	19,68	19,69	19,83	19,82	1514	1514	3,6	3,2	2699	2698
		15	**1500**	**1500**	**20,01**	**20,01**	**20,15**	**20,16**	1490	**1489**	3,7	**3,4**	2655	**2655**
12-13		20	1477	1476	20,33	20,34	20,51	20,48	1463	1466	3,7	3,6	2613	2613
		25	1454	1453	20,65	20,65	20,83	20,81	1441	1443	3,8	3,8	2573	2572
		30	1432	1432	20,96	20,97	21,14	21,13	1420	1421	3,9	4,0	2535	2534
		35	1412	1411	21,27	21,28	21,45	21,45	1400	1400	4,1	4,2	2498	2497
		40	1392	1391	21,58	21,59	21,74	21,76	1381	1380	4,3	4,4	2462	2462

Figura 5.1: Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada.

No que toca ao parâmetro calculado para pinças basta analisar um vão. Os parâmetros são iguais para todos os vãos, quando se encontram em pinças, pois é considerado que não há uma influência da pinça no cabo em termos de tração horizontal. Os valores obtidos na ferramenta de cálculo são muito próximos dos indicados na tabela de regulação original. As pequenas diferenças existentes podem resultar de diferenças dos valores assumidos para as caraterísticas dos cabos. Nos cálculos efetuados apenas foi efetuado o arredondamento na apresentação do resultado final, de acordo com o seu significado físico. Adicionalmente, o método utilizado pelo *Excel* para determinar os estados atmosféricos para as diferentes temperaturas, recorrendo ao *Solver*, pode também acrescentar algum erro ao cálculo, embora neste caso seja visivelmente negligenciável.

Comparando os resultados obtidos para a flecha em pinças, é possível verificar que os valores obtidos são muito semelhantes aos que constam na tabela de regulação. O erro relativo entre os valores analisados é bastante pequeno para as grandezas em questão. Para a maioria dos valores é inferior a 2 cm, o que, pela forma como é medida a flecha, conforme será explicado no capítulo seguinte, é uma margem perfeitamente aceitável e inteiramente dentro do expectável. Era de esperar que os valores que tivessem um erro mais pequeno fossem os relativos ao parâmetro de referência por ser o que tem menos aproximações induzidas nos cálculos de mudança de estado atmosférico. No entanto, os valores correspondentes às restantes temperaturas têm erros semelhantes, o que leva a assumir que as diferenças existentes se devem efetivamente aos dados do cabo condutor. Na ficha técnica do fabricante e nas tabelas de referência da REN, em certos casos, constam valores ligeiramente diferentes, o que em termos práticos não tem importância mas na fase de cálculo pode levar a que existam ligeiras diferenças.

Importa agora analisar os resultados referentes à flecha em roldanas. Este valor é obtido adicionando um fator de correção cuja fórmula de cálculo foi amplamente explorada nos capítulos anteriores. Tem por base o valor da flecha em pinças em que posteriormente é adicionado o fator de correção. Desta forma, as diferenças anteriormente analisadas irão influenciar as grandezas agora referidas. Como é possível verificar, os valores obtidos são bastante próximos dos valores referentes à tabela de regulação usada para comparação. No vão 12-13, por ser o que tem maior comprimento e desnível, poderiam surgir diferenças mais acentuadas, no entanto não se verificou. Apresenta diferenças na ordem dos 2 cm, que é um valor muito baixo para este tipo de grandeza. O vão em que as diferenças são maiores, na ordem dos 6 cm é o vão 9-10, que corresponde a um local em que há mudança da tendência de inclinação do terreno. O desnível é negativo nos 2 vãos anteriores, passando a ser positivo no vão seguinte. Este tipo de variação, uma vez que os valores dependem de todos os vãos adjacentes, introduz dificuldades na obtenção dos valores do fator de correção. Ainda assim, os valores obtidos, se considerarmos como corretos os referentes à tabela de regulação, são aceitáveis tendo em conta a forma como é efetuada a medição.

No que se refere aos valores do parâmetro da catenária na situação de roldanas, pela forma como são obtidos, é expectável que existam diferenças de acordo com as existentes nos dois parâmetros anteriores. Isto acontece porque, para encontrar o valor do parâmetro da catenária em situação de roldanas, é estimado qual o parâmetro que torna a flecha em roldanas no valor obtido. Assim, os dois valores estão diretamente ligados, havendo uma diferença no valor da flecha.

Irá necessariamente haver uma variação no parâmetro correspondente. Como já foi analisado anteriormente, os valores obtidos para a flecha em situação de roldanas são aceitáveis, sendo, por consequência, os valores do parâmetro da catenária também aceitáveis.

Considerando agora os valores referentes ao *offset*, importa analisar as diferenças encontradas. Esta grandeza está expressa em cm, e corresponde a uma distância anteriormente explicada e que terá de ser medida pelo responsável da regulação no apoio considerado. Essa medição é efetuada, com recurso a uma fita métrica, segundo as indicações vindas do operador do teodolito que indica o ponto de perpendicularidade, sendo efetuada utilizando uma escada presa no braço do apoio, de modo a que seja possível descer ao nível da roldana. Pelo procedimento em questão, não faz sentido discutir diferenças de poucos milímetros, pois muito dificilmente é aplicado esse tipo de rigor no terreno. Importa, no entanto, fornecer aos técnicos de regulação os melhores valores possíveis. Nesse sentido, será feita uma comparação entre os valores obtidos na ferramenta de cálculo e os que constam na tabela de regulação analisada. Geralmente, no primeiro vão, o valor do *offset* é muito pequeno, ou mesmo nulo. Isto acontece pela proximidade de um apoio de amarração onde se inicia o cantão e pela fórmula como é calculado este valor. Fazendo uso de somatórios em que o valor do desnível do vão anterior se assume como um fator relevante, e não havendo um vão anterior, os valores tendem a ser muito pequenos. Pode suceder, no entanto, que no caso do cantão se encontrar num terreno particularmente difícil, em que existam grandes vãos e desníveis acentuados, exista logo no primeiro vão um *offset* não desprezável.

Analisando os valores obtidos, é possível verificar que a diferença encontrada *offset* é de poucos milímetros, o que tendo em conta as caraterísticas do cantão é perfeitamente aceitável. Não sendo este um cantão particularmente desafiante para este tipo de cálculo, existem algumas situações de desnível, e particularmente de mudança da tendência de desnível do terreno que podiam configurar problema e originar diferenças mais significativas. Neste cantão não houve nenhuma situação de variação da tendência do desnível suficientemente acentuada que provocasse uma alteração no sinal do *offset*, no entanto, esta situação pode ocorrer em determinadas configurações do terreno particularmente acentuadas, podendo inclusivamente haver uma mudança de sinal num apoio, conforme o estado atmosférico. Conforme é verificável, o valor do *offset* tem tendência a aumentar com o aumento da temperatura. Esta situação é expectável uma vez que o condutor tem tendência a dilatar, fazendo assim com que as medidas de comprimento aumentem. Tanto na tendência de variação dentro de cada vão, como na variação entre os sucessivos vãos, os valores obtidos seguem a variação dos que constam na tabela de regulação usada para comparação. Particularmente neste caso, os valores encontrados na ferramenta de cálculo estão bastante próximos, havendo uma diferença de no máximo 4mm. Para as grandezas em questão, para a influência que têm na globalidade e para a forma como são efetuadas as medidas e marcações, é pouco relevante. Considera-se, desta forma, que os valores encontrados são satisfatórios.

Importa finalmente comparar os valores obtidos para a tração horizontal. Este valor é derivado dos dados dos condutores e do parâmetro de referência da catenária, sendo ajustado para as diferentes temperaturas. Não assume um papel de particular relevância no processo de regulação, é usado para efetuar o tensionamento durante o processo de passagem dos condutores. A tração

usada para rebocar o condutor deve ser de 60% do valor correspondente à temperatura que estiver a ser considerada. Nesta grandeza os valores obtidos devem ser o mais próximos possível dos indicados na tabela de regulação. Pela análise dos resultados obtidos, que basta ser efetuada num vão, pois será igual para todos os outros, é possível verificar que os valores encontrados são muito próximos, sendo que as pequenas diferenças que se verificam se podem dever a diferenças nos parâmetros do cabo usado, conforme explicado anteriormente. Para as grandezas em questão, e pela forma como são usadas, uma diferença de 1daN é absolutamente negligenciável.

No anexo B consta a comparação de resultados deste mesmo cantão, mas respeitante ao cabo de guarda. O cabo de guarda utilizado é do tipo *Dorking* e os vãos que constituem o cantão são os mesmos do cabo condutor. Existem diferenças no desnível indicado em cada apoio que correspondem a compensações que são feitas no relatório topográfico para compensar o comprimento das cadeias de isoladores.

Os resultados obtidos tal como para o cabo condutor, são bastante próximos. Como era esperado, as flechas obtidas são inferiores às do cabo condutor, e os valores de *offset*, sendo este um cabo mais leve, são também inferiores.

Conclui-se, assim, que para o caso do cantão analisado a ferramenta de cálculo apresenta resultados aceitáveis e dentro do esperado. De seguida será analisado um cantão com situações mais desafiantes para a ferramenta de cálculo.

5.2 Análise do caso 2

Uma vez mais, o cantão em análise corresponde a um caso real de uma linha previamente executada, da qual as folhas de regulação estão disponíveis. Corresponde igualmente a uma linha MAT de 400kV, com condutores do tipo *Zambeze*. O cantão analisado tem um vão equivalente de 373 metros, e tem vãos com um fator de desnível que é interessante analisar, como é o caso do vão 58-59. O número de vãos está dentro dos valores usuais numa linha desta classe.

Na figura 5.2 encontra-se representada a tabela de comparação de resultados: a verde estão os valores que constam na folha de regulação usada na obra executada; e sem sombreado estão os valores obtidos na ferramenta de cálculo.

Conforme já tinha sucedido no cantão analisado anteriormente, os valores calculados referentes ao parâmetro em pinças e tração horizontal têm valores muito próximos dos que constam na tabela de regulação usada para comparação. Não se justifica por isso uma nova análise mais detalhada para este cantão.

Analisando agora os valores obtidos para a flecha em pinças, é possível verificar que os valores são próximos dos que constam na tabela de regulação. O vão onde a diferença é maior, cerca de 5cm, é o 58-59, que pelas suas caraterísticas de desnível e comprimento, será o mais interessante de analisar. Estas diferenças, ainda que pouco relevantes no contexto pratico, devem-se à forma usada para calcular o ponto da projeção na horizontal da cota mínima da catenária descrita pelo cabo condutor. Conforme foi amplamente explorado em capítulos anteriores, um dos fatores que levou a que vários autores propusessem diversas formas de cálculo de flecha residia na dificuldade

Comp.(m)	Desnivel (m)	Temp.(ºC)	Parametro em pinças(m)	Parametro em pinças (m) REN	Flecha em pinças(m)	Flecha em pinças(m) REN	Flecha em roldanas(m)	Flecha em roldanas(m) REN	Parametro em roldanas (m)	Parametro em roldanas (m) REN	Offset(cm)	Offset(cm) REN	Tracção Horizontal (daN)	Tracção Horizontal (daN)
316,62	**-21,63**	-5	1620	1620	7,74	7,76	7,46	7,51	1680	1674	0,0	0,0	2867	2867
		0	1588	1588	7,89	7,92	7,62	7,66	1644	1642	0,0	0,0	2810	2810
		5	1557	1557	8,05	8,07	7,78	7,80	1611	1611	0,0	0,0	2756	2756
		10	1528	1528	8,20	8,23	7,94	7,95	1578	1582	0,0	0,0	2704	2704
57 - 58		**15**	**1500**	**1500**	**8,35**	**8,38**	**8,10**	**8,09**	1548	**1555**	0,0	**0,0**	2655	**2655**
		20	1474	1473	8,50	8,53	8,17	8,23	1535	1528	0,0	0,0	2608	2608
		25	1449	1448	8,65	8,68	8,32	8,36	1506	1503	0,0	0,0	2564	2563
		30	1425	1424	8,80	8,83	8,47	8,50	1479	1479	0,0	0,0	2521	2520
		35	1402	1401	8,94	8,98	8,62	8,64	1453	1456	0,0	0,0	2480	2479
		40	1379	1379	9,09	9,12	8,80	8,77	1425	1434	0,0	0,0	2441	2440
388,28	**-39,43**	-5	1620	1620	11,75	11,71	11,50	11,60	1656	1635	4,1	4,0	2867	2867
		0	1588	1588	11,99	11,95	11,74	11,83	1621	1603	4,1	4,2	2810	2810
		5	1557	1557	12,23	12,18	11,98	12,06	1589	1572	4,2	4,4	2756	2756
		10	1528	1528	12,46	12,42	12,22	12,29	1558	1543	4,3	4,6	2704	2704
58 - 59		**15**	**1500**	**1500**	**12,69**	**12,64**	**12,46**	**12,51**	1529	**1516**	4,3	**4,9**	2655	**2655**
		20	1474	1473	12,92	12,87	12,61	12,74	1510	1489	4,4	5,1	2608	2608
		25	1449	1448	13,15	13,10	12,84	12,96	1483	1464	4,5	5,3	2564	2563
		30	1425	1424	13,37	13,32	13,07	13,18	1457	1440	4,6	5,6	2521	2520
		35	1402	1401	13,59	13,54	13,30	13,39	1432	1417	4,7	5,8	2480	2479
		40	1379	1379	13,81	13,76	13,54	13,60	1407	1395	4,8	6,1	2441	2440
437,85	**-13,56**	-5	1620	1620	14,81	14,82	14,86	14,89	1614	1613	8,2	6,0	2867	2867
		0	1588	1588	15,11	15,13	15,16	15,19	1583	1581	8,3	6,3	2810	2810
		5	1557	1557	15,41	15,43	15,46	15,50	1552	1550	8,4	6,6	2756	2756
		10	1528	1528	15,70	15,72	15,75	15,80	1524	1520	8,6	7,0	2704	2704
59 - 60		**15**	**1500**	**1500**	**15,99**	**16,01**	**16,04**	**16,09**	1496	**1493**	8,7	**7,3**	2655	**2655**
		20	1474	1473	16,28	16,30	16,34	16,39	1468	1466	8,9	7,7	2608	2608
		25	1449	1448	16,56	16,59	16,62	16,67	1444	1441	9,1	8,1	2564	2563
		30	1425	1424	16,85	16,87	16,90	16,96	1420	1416	9,2	8,4	2521	2520
		35	1402	1401	17,12	17,15	17,18	17,25	1397	1393	9,4	8,8	2480	2479
		40	1379	1379	17,40	17,43	17,45	17,52	1375	1371	9,6	9,2	2441	2440
281,55	**-2,11**	-5	1620	1620	6,12	6,12	6,19	6,14	1600	1614	6,1	4,6	2867	2867
		0	1588	1588	6,24	6,25	6,32	6,27	1569	1582	6,2	4,8	2810	2810
		5	1557	1557	6,37	6,37	6,44	6,39	1540	1552	6,3	5,1	2756	2756
		10	1528	1528	6,49	6,49	6,56	6,51	1512	1523	6,4	5,3	2704	2704
60 - 61		**15**	**1500**	**1500**	**6,61**	**6,61**	**6,68**	**6,63**	1485	**1495**	6,5	**5,6**	2655	**2655**
		20	1474	1473	6,73	6,73	6,82	6,75	1454	1468	6,6	5,8	2608	2608
		25	1449	1448	6,84	6,85	6,93	6,87	1430	1443	6,7	6,1	2564	2563
		30	1425	1424	6,96	6,97	7,05	6,99	1407	1419	6,9	6,4	2521	2520
		35	1402	1401	7,08	7,08	7,16	7,10	1385	1396	7,0	6,7	2480	2479
		40	1379	1379	7,19	7,19	7,27	7,22	1365	1374	7,1	6,9	2441	2440
389,21	**5,34**	-5	1620	1620	11,71	11,71	11,86	11,77	1598	1610	6,5	4,3	2867	2867
		0	1588	1588	11,94	11,94	12,10	12,01	1567	1578	6,6	4,5	2810	2810
		5	1557	1557	12,18	12,18	12,33	12,25	1538	1547	6,8	4,7	2756	2756
		10	1528	1528	12,41	12,41	12,56	12,49	1510	1518	6,9	5,0	2704	2704
61 - 62		**15**	**1500**	**1500**	**12,64**	**12,64**	**12,79**	**12,72**	1483	**1491**	7,1	**5,2**	2655	**2655**
		20	1474	1473	12,87	12,87	13,06	12,96	1452	1464	7,2	5,5	2608	2608
		25	1449	1448	13,09	13,10	13,28	13,18	1428	1439	7,8	5,7	2564	2563
		30	1425	1424	13,31	13,32	13,50	13,41	1405	1414	8,0	6,0	2521	2520
		35	1402	1401	13,53	13,54	13,72	13,64	1383	1391	8,2	6,3	2480	2479
		40	1379	1379	13,75	13,76	13,92	13,86	1363	1369	8,5	6,5	2441	2440
377,14	**-1,83**	-5	1620	1620	10,99	10,99	11,10	11,04	1604	1613	3,4	3,0	2867	2867
		0	1588	1588	11,21	11,21	11,32	11,26	1573	1581	3,4	3,1	2810	2810
		5	1557	1557	11,43	11,43	11,54	11,48	1543	1550	3,5	3,3	2756	2756
		10	1528	1528	11,65	11,65	11,75	11,71	1515	1521	3,6	3,4	2704	2704
62 - 63		**15**	**1500**	**1500**	**11,86**	**11,87**	**11,97**	**11,92**	1488	**1493**	3,6	**3,6**	2655	**2655**
		20	1474	1473	12,08	12,08	12,21	12,14	1458	1466	3,7	3,7	2608	2608
		25	1449	1448	12,29	12,29	12,42	12,35	1433	1441	3,8	3,9	2564	2563
		30	1425	1424	12,50	12,51	12,63	12,57	1410	1417	3,8	4,1	2521	2520
		35	1402	1401	12,70	12,71	12,83	12,78	1388	1394	3,9	4,3	2480	2479
		40	1379	1379	12,91	12,92	13,02	12,98	1367	1372	4,0	4,5	2441	2440
357,32	**-19,53**	-5	1620	1620	9,86	9,88	9,97	9,99	1602	1601	1,8	2,1	2867	2867
		0	1588	1588	10,06	10,08	10,16	10,20	1571	1569	1,9	2,2	2810	2810
		5	1557	1557	10,25	10,28	10,36	10,40	1541	1538	1,9	2,3	2756	2756
		10	1528	1528	10,45	10,47	10,55	10,60	1513	1509	1,9	2,4	2704	2704
63 - 64		**15**	**1500**	**1500**	**10,64**	**10,67**	**10,74**	**10,80**	1486	**1481**	2,0	**2,5**	2655	**2655**
		20	1474	1473	10,83	10,86	10,97	11,00	1456	1455	2,0	2,6	2608	2608
		25	1449	1448	11,02	11,05	11,15	11,19	1432	1430	2,0	2,7	2564	2563
		30	1425	1424	11,21	11,24	11,34	11,39	1408	1405	2,1	2,8	2521	2520
		35	1402	1401	11,39	11,43	11,52	11,58	1386	1382	2,1	3,0	2480	2479
		40	1379	1379	11,58	11,61	11,69	11,77	1366	1360	2,2	3,1	2441	2440

Figura 5.2: Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada.

de calcular este ponto em situações em que o fator de desnível fosse elevado, sendo esse fator uma relação entre o comprimento e o desnível.

Relativamente à flecha em roldanas, analisando os valores obtidos verifica-se que existe uma proximidade com os valores que constam na tabela de regulação. As diferenças existentes residem nos mesmos pressupostos explicados na análise do cantão anterior. Sendo um cantão mais longo, é de esperar que as diferenças encontradas sejam um pouco superiores, algo que se verifica, mas de forma pouco acentuada. O vão onde existem maiores diferenças é novamente o 58-59 pelas caraterísticas anteriormente explicadas. Uma vez que existem diferenças na flecha calculada para pinças e este é um dos dados usados para o cálculo dos parâmetros em roldanas, era expectável que existisse neste vão a maior diferença, não se tratando ainda assim de uma diferença que inviabilize os cálculos efetuados. Outro vão que merece uma análise cuidada é o 61-62 que, por ser um vão de desnível positivo, em que os vãos adjacentes têm desnível negativo, representa uma possível dificuldade no cálculo. As diferenças aqui obtidas são semelhantes às do vão 58-59.

No que se refere aos valores obtidos para o parâmetro da catenária em roldanas, por ser uma extrapolação dos valores obtidos para a flecha, as diferenças existentes acompanham as que se verificam para os valores da flecha. Analisando finalmente os resultados obtidos para o *offset*, é possível verificar que existem algumas diferenças, não sendo, no entanto, muito elevadas. Neste caso, o erro aumenta no vão seguinte ao 58-59, o que é um comportamento expectável. Torna a aumentar o vão 61-62 onde existe uma variação na tendência do desnível. Pelos resultados aqui obtidos, é percetível que os pontos de maior dificuldade de cálculo são os vão adjacentes a vãos de grande fator de desnível e situações em que exista uma mudança do tipo de terreno. Conforme será explorado adiante, estas diferenças não inviabilizam os resultados obtidos, apenas mostram que a forma de cálculo usada no PLS-CADD tem diferenças relativamente à usada na ferramenta de cálculo.

5.3 Análise do caso 3

Na figura 5.3 consta a comparação de resultados de um cantão que pelas suas caraterísticas será dos mais desafiantes para a ferramenta de cálculo. É um cantão de 13 vãos, com vão equivalente de 480 metros, numa linha de 400kV onde foi instalado um cabo condutor do tipo Zambeze.

Os resultados obtidos para o parâmetro de referência da catenária e tração horizontal seguem os prossupostos explicados nos casos anteriores, e estão bastante próximos dos indicados na folha de regulação usada para comparação. Mais importante é analisar os resultados obtidos para a flecha em pinças. Como é possível verificar, os resultados obtidos são muito próximos em todos os vãos que compõem o cantão. De salientar é o vão 42-43, que tem um comprimento bastante superior aos até agora analisados, com 742 metros. A flecha obtida difere da apresentada na tabela de regulação em apenas 1 cm, o que mostra que mesmo para vãos de grande comprimento e com um desnível considerável a ferramenta retorna valores muito próximos aos usados para comparação. Em todos os outros vãos a flecha obtida é também muito próxima, conforme já tinha sucedido nos outros casos analisados. Em relação à flecha em roldanas, este é um vão particularmente desafiante pela configuração do terreno e distribuição dos apoios. Existem vãos de grande comprimento e grande amplitude de variação do nível do terreno, o que torna o cálculo do *offset* e fator de correção

da flecha para roldanas particularmente complicado. À medida que o índice do vão aumenta, é esperado haver uma maior diferença nos resultados obtidos pois as diferenças existentes no método de cálculo vão acumulando. Na flecha em roldanas, que resulta da adição de um fator de correção à flecha em pinças, os valores obtidos os valores obtidos diferem mais dos que constam na tabela utilizada. A tendência de variação dos valores é semelhante e resulta das caraterísticas da linha. As maiores diferenças obtidas são de 15cm o que configura uma variação de menos de 1% entre valores. Em grande parte dos valores a diferença é bastante inferior, na ordem os 5 cm. O parâmetro referente à situação em roldanas é extrapolado através dos valores da flecha, por essa razão as diferenças seguem o mesmo padrão.

Analisando, por fim, os valores do *offset*, é possível verificar que, uma vez, mais os valores se encontram próximos. O vão 42-43 tem um grande comprimento e um desnível positivo acentuado. Tendo os vãos adjacentes desníveis negativos, este tipo de situação configura um ponto de mudança na tendência de variação do *offset*. Este efeito verifica-se no vão seguinte, aumentando o *offset* em 20 cm. Comparando os resultados óbtidos com os da tabela de regulação, é possível verificar que existe nos vãos a jusante do 42-43 uma inversão do sinal da diferença entre os resultados obtidos, passado a ferramenta de cálculo a retornar valores inferiores aos que constam na tabela de regulação, enquanto nos vãos a montante os valores retornados eram superiores. Os valores obtidos para este cantão são globalmente aceitáveis e dentro do esperado, sendo este o cantão mais desafiante dos disponíveis para comparação.

Comp.(m)	Desnivel (m)	Temp.(ºC)	Parametro em pinças(m)	Parametro em pinças (m) REN	Flecha em pinças(m)	Flecha em pinças(m) REN	Flecha em roldanas(m)	Flecha em roldanas(m) REN	Parametro em roldanas (m)	Parametro em roldanas (m) REN	Offset(cm)	Offset(cm) REN	Tracção Horizontal (daN)	Tracção Horizontal (daN)	
526,43	**19,27**	-5	1573	1573	22,09	22,08	22,66	22,65	1533	1534	0,0	0,0	2784	2785	
		0	1554	1554	22,36	22,35	22,93	22,94	1516	1515	0,0	0,0	2750	2751	
		5	1535	1536	22,63	22,63	23,19	23,23	1498	1496	0,0	0,0	2717	2718	
		10	1517	1518	22,90	22,90	23,46	23,51	1482	1478	0,0	0,0	2685	2686	
34 - 35		**15**	**1500**	**1500**	**23,17**	**23,17**	**23,72**	**23,79**	1466	**1461**	0,0	**0,0**	2654	**2655**	
		20	1483	1483	23,43	23,43	24,16	24,07	1439	1444	0,0	0,0	2624	2625	
		25	1467	1467	23,70	23,70	24,41	24,35	1424	1427	0,0	0,0	2595	2596	
		30	1451	1451	23,96	23,96	24,67	24,63	1410	1412	0,0	0,0	2567	2568	
		35	1435	1435	24,22	24,22	24,92	24,90	1395	1396	0,0	0,0	2540	2540	
		40	1421	1420	24,47	24,48	25,11	25,17	1385	1381	0,0	0,0	2514	2514	
457,17	**29,62**	-5	1573	1573	16,65	16,67	16,89	16,79	1551	1562	-14,7	-14,1	2784	2785	
		0	1554	1554	16,86	16,87	17,10	17,00	1533	1543	-14,8	-14,6	2750	2751	
		5	1535	1536	17,06	17,08	17,30	17,21	1515	1524	-15,0	-15,0	2717	2718	
		10	1517	1518	17,27	17,28	17,50	17,41	1498	1506	-15,2	-15,5	2685	2686	
35 - 36		**15**	**1500**	**1500**	**17,47**	**17,49**	**17,70**	**17,62**	1481	**1489**	-15,3	**-16,0**	2654	**2655**	
		20	1483	1483	17,67	17,69	17,97	17,82	1458	1472	-15,5	-16,5	2624	2625	
		25	1467	1467	17,87	17,89	18,16	18,02	1443	1456	-15,7	-17,0	2595	2596	
		30	1451	1451	18,06	18,08	18,36	18,22	1428	1440	-15,9	-17,5	2567	2568	
		35	1435	1435	18,26	18,28	18,55	18,42	1413	1425	-16,1	-18,1	2540	2540	
		40	1421	1420	18,45	18,47	18,72	18,61	1401	1410	-16,3	-18,6	2514	2514	
455,51	**20,76**	-5	1573	1573	16,53	16,53	16,47	16,37	1579	1589	-20,0	-17,0	2784	2785	
		0	1554	1554	16,73	16,73	16,67	16,57	1560	1570	-20,2	-17,5	2750	2751	
		5	1535	1536	16,94	16,94	16,88	16,77	1541	1551	-20,4	-18,1	2717	2718	
		10	1517	1518	17,14	17,14	17,08	16,97	1523	1533	-20,6	-18,6	2685	2686	
36 - 37		**15**	**1500**	**1500**	**17,34**	**17,34**	**17,28**	**17,16**	1505	**1516**	-20,9	**-19,2**	2654	**2655**	
		20	1483	1483	17,54	17,54	17,46	17,35	1490	1499	-21,1	-19,7	2624	2625	
		25	1467	1467	17,73	17,74	17,66	17,55	1473	1482	-21,4	-20,3	2595	2596	
		30	1451	1451	17,93	17,93	17,85	17,74	1457	1467	-21,6	-20,9	2567	2568	
		35	1435	1435	18,12	18,13	18,05	17,92	1441	1451	-21,9	-21,4	2540	2540	
		40	1421	1420	18,31	18,32	18,24	18,11	1426	1436	-22,2	-22,0	2514	2514	
333,2	**7,15**	-5	1573	1573	8,83	8,83	8,69	8,62	1599	1612	-15,9	-13,8	2784	2785	
		0	1554	1554	8,94	8,94	8,80	8,72	1579	1593	-16,0	-14,2	2750	2751	
		5	1535	1536	9,05	9,05	8,91	8,83	1560	1574	-16,2	-14,6	2717	2718	
		10	1517	1518	9,16	9,16	9,02	8,93	1541	1556	-16,4	-15,0	2685	2686	
37 - 38		**15**	**1500**	**1500**	**9,26**	**9,26**	**9,13**	**9,03**	1523	**1539**	-16,6	**-15,4**	2654	**2655**	
		20	1483	1483	9,37	9,37	9,19	9,13	1512	1522	-16,8	-15,8	2624	2625	
		25	1467	1467	9,47	9,48	9,29	9,23	1495	1506	-17,0	-16,3	2595	2596	
		30	1451	1451	9,58	9,58	9,40	9,32	1478	1490	-17,2	-16,7	2567	2568	
		35	1435	1435	9,68	9,68	9,51	9,42	1462	1475	-17,4	-17,1	2540	2540	
		40	1421	1420	9,78	9,79	9,62	9,52	1444	1460	-17,6	-17,5	2514	2514	
288,1	**-0,32**	-5	1573	1573	6,60	6,60	6,46	6,42	1606	1618	-13,9	-10,4	2784	2785	
		0	1554	1554	6,68	6,68	6,55	6,49	1586	1599	-14,0	-10,7	2750	2751	
		5	1535	1536	6,76	6,76	6,63	6,57	1566	1580	-14,2	-10,9	2717	2718	
		10	1517	1518	6,84	6,84	6,71	6,65	1547	1562	-14,3	-11,2	2685	2686	
38 - 39		**15**	**1500**	**1500**	**6,92**	**6,92**	**6,79**	**6,72**	1529	**1545**	-14,5	**-11,5**	2654	**2655**	
		20	1483	1483	7,00	7,00	6,83	6,79	1520	1528	-14,6	-11,7	2624	2625	
		25	1467	1467	7,08	7,08	6,91	6,87	1503	1512	-14,8	-12,0	2595	2596	
		30	1451	1451	7,16	7,16	6,99	6,94	1486	1496	-15,0	-12,3	2567	2568	
		35	1435	1435	7,23	7,23	7,07	7,01	1469	1481	-15,2	-12,6	2540	2540	
		40	1421	1420	7,31	7,31	7,16	7,08	1451	1466	-15,4	-12,8	2514	2514	
287,32	**-18,78**	-5	1573	1573	6,56	6,58	6,42	6,45	1606	1605	-12,2	-7,7	2784	2785	
		0	1554	1554	6,64	6,66	6,51	6,53	1586	1586	-12,3	-7,8	2750	2751	
		5	1535	1536	6,72	6,74	6,59	6,60	1566	1567	-12,5	-8,0	2717	2718	
		10	1517	1518	6,80	6,82	6,67	6,68	1547	1550	-12,6	-8,2	2685	2686	
39 - 40		**15**	**1500**	**1500**	**6,88**	**6,90**	**6,75**	**6,75**	1528	**1532**	-12,8	**-8,4**	2654	**2655**	
		20	1483	1483	6,96	6,98	6,79	6,83	1520	1516	-12,9	-8,5	2624	2625	
		25	1467	1467	7,04	7,06	6,87	6,90	1502	1499	-13,1	-8,7	2595	2596	
		30	1451	1451	7,11	7,13	6,95	6,98	1485	1484	-13,2	-8,9	2567	2568	
		35	1435	1435	7,19	7,21	7,03	7,05	1469	1469	-13,4	-9,0	2540	2540	
		40	1421	1420	7,27	7,29	7,12	7,12	1450	1454	-13,5	-9,2	2514	2514	

Figura 5.3a: Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada.

291,75	**-16,68**	-5	1573	1573	6,76	6,78	6,70	6,72	1588	1588	-8,7	-5,7	2784	2785
		0	1554	1554	6,85	6,86	6,79	6,80	1568	1569	-8,8	-5,8	2750	2751
		5	1535	1536	6,93	6,94	6,87	6,88	1549	1550	-8,9	-5,9	2717	2718
		10	1517	1518	7,01	7,03	6,95	6,96	1530	1532	-9,0	-6,0	2685	2686
40 - 41		**15**	**1500**	**1500**	**7,09**	**7,11**	**7,04**	**7,04**	1512	**1515**	-9,1	**-6,1**	2654	**2655**
		20	1483	1483	7,18	7,19	7,10	7,12	1499	1499	-9,2	-6,2	2624	2625
		25	1467	1467	7,26	7,27	7,18	7,20	1482	1482	-9,3	-6,3	2595	2596
		30	1451	1451	7,33	7,35	7,26	7,27	1466	1467	-9,4	-6,4	2567	2568
		35	1435	1435	7,41	7,43	7,34	7,35	1450	1451	-9,6	-6,5	2540	2540
		40	1421	1420	7,49	7,51	7,42	7,42	1434	1437	-9,7	-6,5	2514	2514
417,96	**-6,07**	-5	1573	1573	13,90	13,90	13,91	13,92	1571	1571	-8,1	-4,9	2784	2785
		0	1554	1554	14,07	14,07	14,09	14,09	1552	1553	-8,2	-4,9	2750	2751
		5	1535	1536	14,24	14,24	14,26	14,26	1534	1534	-8,3	-5,0	2717	2718
		10	1517	1518	14,41	14,41	14,43	14,43	1516	1516	-8,4	-5,0	2685	2686
41 - 42		**15**	**1500**	**1500**	**14,58**	**14,58**	**14,59**	**14,60**	1498	**1499**	-8,5	**-5,1**	2654	**2655**
		20	1483	1483	14,74	14,75	14,76	14,76	1481	1482	-8,6	-5,1	2624	2625
		25	1467	1467	14,91	14,92	14,93	14,93	1465	1465	-8,7	-5,1	2595	2596
		30	1451	1451	15,07	15,08	15,09	15,09	1449	1450	-8,8	-5,2	2567	2568
		35	1435	1435	15,24	15,24	15,25	15,25	1434	1434	-8,9	-5,2	2540	2540
		40	1421	1420	15,40	15,40	15,41	15,41	1419	1419	-9,0	-5,2	2514	2514
742,16	**38,33**	-5	1573	1573	44,03	44,02	44,43	44,53	1566	1556	-8,3	-5,4	2784	2785
		0	1554	1554	44,58	44,56	45,01	45,09	1547	1536	-8,4	-5,4	2750	2751
		5	1535	1536	45,12	45,11	45,58	45,66	1525	1517	-8,5	-5,5	2717	2718
		10	1517	1518	45,66	45,65	46,14	46,22	1489	1499	-8,6	-5,5	2685	2686
42 - 43		**15**	**1500**	**1500**	**46,20**	**46,19**	**46,72**	**46,78**	1477	**1481**	-8,7	**-5,5**	2654	**2655**
		20	1483	1483	46,73	46,72	47,29	47,33	1458	1464	-8,8	-5,6	2624	2625
		25	1467	1467	47,26	47,26	47,85	47,89	1439	1447	-8,9	-5,6	2595	2596
		30	1451	1451	47,78	47,78	48,39	48,44	1426	1431	-9,0	-5,6	2567	2568
		35	1435	1435	48,30	48,30	48,89	48,98	1410	1416	-9,2	-5,6	2540	2540
		40	1421	1420	48,82	48,82	49,46	49,52	1397	1400	-9,3	-5,6	2514	2514
390,58	**-6,43**	-5	1573	1573	12,13	12,14	11,91	11,90	1603	1605	-21,6	-22,8	2784	2785
		0	1554	1554	12,28	12,29	12,06	12,04	1582	1586	-21,8	-23,7	2750	2751
		5	1535	1536	12,43	12,44	12,22	12,18	1563	1568	-22,0	-24,5	2717	2718
		10	1517	1518	12,58	12,58	12,37	12,32	1544	1550	-22,3	-25,5	2685	2686
43 - 44		**15**	**1500**	**1500**	**12,73**	**12,73**	**12,51**	**12,46**	1525	**1533**	-22,5	**-26,4**	2654	**2655**
		20	1483	1483	12,87	12,88	12,59	12,60	1516	1516	-22,8	-27,3	2624	2625
		25	1467	1467	13,02	13,02	12,74	12,74	1499	1499	-23,1	-28,3	2595	2596
		30	1451	1451	13,16	13,17	12,89	12,87	1482	1484	-23,3	-29,3	2567	2568
		35	1435	1435	13,30	13,31	13,03	13,01	1465	1468	-23,6	-30,2	2540	2540
		40	1421	1420	13,44	13,45	13,19	13,14	1447	1453	-23,9	-31,3	2514	2514
385,1	**-7,78**	-5	1573	1573	11,79	11,80	11,62	11,61	1596	1598	-16,9	-18,4	2784	2785
		0	1554	1554	11,94	11,94	11,77	11,75	1576	1579	-17,1	-19,1	2750	2751
		5	1535	1536	12,09	12,09	11,92	11,89	1557	1561	-17,3	-19,8	2717	2718
		10	1517	1518	12,23	12,23	12,06	12,03	1538	1543	-17,5	-20,5	2685	2686
44 - 45		**15**	**1500**	**1500**	**12,37**	**12,38**	**12,21**	**12,17**	1520	**1526**	-17,7	**-21,3**	2654	**2655**
		20	1483	1483	12,51	12,52	12,30	12,30	1509	1509	-17,9	-22,0	2624	2625
		25	1467	1467	12,65	12,66	12,44	12,44	1492	1492	-18,1	-22,8	2595	2596
		30	1451	1451	12,79	12,80	12,58	12,57	1475	1477	-18,3	-23,6	2567	2568
		35	1435	1435	12,93	12,94	12,72	12,71	1459	1461	-18,5	-24,4	2540	2540
		40	1421	1420	13,07	13,08	12,88	12,84	1441	1447	-18,8	-25,2	2514	2514
532,5	**16,1**	-5	1573	1573	22,60	22,59	22,38	22,33	1589	1591	-13,4	-15,1	2784	2785
		0	1554	1554	22,88	22,87	22,66	22,61	1569	1572	-13,5	-15,6	2750	2751
		5	1535	1536	23,16	23,15	22,94	22,88	1550	1554	-13,7	-16,2	2717	2718
		10	1517	1518	23,43	23,43	23,22	23,15	1531	1536	-13,8	-16,8	2685	2686
45 - 46		**15**	**1500**	**1500**	**23,71**	**23,70**	**23,50**	**23,42**	1513	**1518**	-14,0	**-17,4**	2654	**2655**
		20	1483	1483	23,98	23,97	23,70	23,68	1500	1501	-14,2	-18,0	2624	2625
		25	1467	1467	24,25	24,25	23,97	23,95	1483	1485	-14,3	-18,7	2595	2596
		30	1451	1451	24,51	24,51	24,24	24,21	1467	1469	-14,5	-19,3	2567	2568
		35	1435	1435	24,78	24,78	24,51	24,47	1451	1453	-14,7	-19,9	2540	2540
		40	1421	1420	25,04	25,04	24,80	24,72	1434	1438	-14,9	-20,6	2514	2514
442,66	**42,85**	-5	1573	1573	15,62	15,66	15,31	15,20	1604	1621	-7,5	-9,3	2784	2785
		0	1554	1554	15,81	15,86	15,51	15,38	1584	1602	-7,6	-9,6	2750	2751
		5	1535	1536	16,00	16,05	15,71	15,56	1564	1584	-7,7	-10,0	2717	2718
		10	1517	1518	16,20	16,24	15,90	15,74	1545	1566	-7,8	-10,3	2685	2686
46 - 47		**15**	**1500**	**1500**	**16,38**	**16,43**	**16,09**	**15,92**	1527	**1549**	-7,9	**-10,7**	2654	**2655**
		20	1483	1483	16,57	16,62	16,19	16,09	1518	1532	-7,9	-11,1	2624	2625
		25	1467	1467	16,76	16,81	16,38	16,27	1500	1515	-8,0	-11,5	2595	2596
		30	1451	1451	16,94	17,00	16,57	16,44	1484	1500	-8,1	-11,9	2567	2568
		35	1435	1435	17,12	17,18	16,75	16,61	1467	1485	-8,2	-12,2	2540	2540
		40	1421	1420	17,31	17,36	16,97	16,78	1449	1470	-8,3	-12,6	2514	2514

Figura 5.3b: Comparação de resultados obtidos na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada.

5.4 Tolerâncias admitidas no processo de regulação

Após a fixação dos cabos às pinças de suspensão, o afastamento máximo entre a flecha teórica que consta na tabela de regulação e a flecha medida, não deverá exceder a tolerância de -2,5% e +1,5%, sendo que a diferença poderá, no máximo, tomar valores de -1,5 metros e + 0,5 metros, respetivamente. A diferença de flechas entre cabos num vão não deve exceder uma tolerância de 0,5%. No caso de dois condutores dispostos em feixe esta tolerância é limitada ao valor máximo de 6 centímetros. Quanto à verticalidade das cadeias de isoladores é admitido um desvio máximo das cadeias, em relação à vertical, para a temperatura de montagem, de 8 centímetros. [27]

5.5 Conclusões da análise de resultados

Os valores do *offset*, parâmetro da catenária e flecha em situação roldanas não podem ser analisadas isoladamente. Nos cálculos referentes à situação em que o condutor se encontra em pinças, os valores encontrados devem ser próximos dos que constam na tabela de regulação usada para comparação. Isto acontece porque para obter estes valores, são usados dados que embora possam ter ligeiras variações, conduzem a resultados semelhantes. Ainda assim, um ponto crucial que já foi referido anteriormente é o cálculo da distância a que se encontra a projeção horizontal do ponto mínimo da catenária. Sendo o PSL-CADD baseado no mesmo método que a ferramenta de cálculo desenvolvida, os valores devem ser semelhantes. No final da colocação e regulação dos condutores, a flecha tem de estar nos valores definidos no projeto de forma a não comprometer a segurança dos objetos e pessoas nas redondezas.

No que se refere aos valores em roldanas dá-se outro caso: os valores do *offset*, parâmetro da catenária e flecha em situação roldanas não podem ser analisadas isoladamente. Os valores das flechas e *offset* variam em conjunto, podendo haver várias combinações de valores que levam a que no final a perpendicularidade dos seja garantida, ou se encontre dentro dos valores regulamentares. Não podem por isso ser analisados os valores de um ponto de vista estritamente numérico em que, caso exista diferença relativamente aos valores dados na tabela de regulação usada para comparação, essa diferença seja tida em conta como um erro que afete o resultado final pretendido. Deve por isso ser comparado especialmente a maneira como variam os valores conforme as condições do vão e dos vãos adjacentes, sendo esse um bom indicador de confiabilidade dos valores encontrados, uma vez que, como referido anteriormente, não será possível aplicar os valores encontrados num caso real ainda em construção para validação.

Capítulo 6

Processo de regulação dos condutores

Os valores calculados na ferramenta realizada anteriormente assumem um papel de grande importância na fase de passagem e regulação dos condutores. De modo a compreender de que forma são utilizados, o grau de precisão necessária, e as vicissitudes das manobras técnicas que escapam muitas vezes ao estudo teórico, importa explorar o procedimento tipo de uma obra. Neste capítulo estão descritos os principais passos, desde a colocação dos condutores até serem definitivamente cravados aos isoladores na posição final que deve permanecer inalterada durante toda a sua vida útil.

6.1 Espiamento dos apoios

Previamente a ser executada a passagem dos cabos de guia e reboque, deve ser efetuado o espiamento dos apoios em que a operação seja necessária. Todos os apoios que na fase de montagem e regulação de condutores possam ficar sujeitos a esforços superiores aos de trabalho na sua posição definitiva, deverão ser espiados. O espiamento dos postes corresponde à amarração de espias, cabos de aço destinados a serem submetidos a esforços de tração, na direção oposta aos esforços a suportar. As espias devem ser fixadas em maciços de betão ou em pontos ancorados no solo. Na figura 6.1 encontra-se representado como é efetuado esse espiamento, sendo que no caso da imagem foi apenas efetuado entre os braços e o fuste.

Na generalidade, os apoios que têm esta necessidade são os que ficam sujeitos a esforços de montagem que os colocam em situação de desequilíbrio de esforços. Esta situação decorre em apoios de amarração quando esta não seja feita ao mesmo tempo nos dois lados do poste. Em apoios de fim de linha, que por quaisquer circunstâncias fiquem provisoriamente sujeitos a esforços desequilibrados, pode também ser necessario. Isto pode suceder igualmente em apoios de linha dupla onde se irá fazer unicamente a amarração de uma linha. Outra situação em que é necessário o espiamento é para apoios que na fase de montagem fiquem, provisoriamente, a fazer de poste fim de linha. Para apoios que durante a montagem sejam sujeitos a pontos de esticamento de linhas, é também necessário efetuar manobras de espiamento.



Figura 6.1: Apoio de amarração com os cabos de guia a serem passados em roldanas.

6.2 Desenrolamento de condutores

Os condutores chegam ao terreno em bobinas cujo peso pode ser superior a uma tonelada, pelo que o seu manuseamento e transporte obedece a diversos procedimentos de segurança. [28] Nas operações de desenrolamento de condutores de linhas aéreas MAT podem estar em jogo esforços significativos, Desta forma, na seleção de ferramentas e equipamentos, devem ser consideradas algumas regras de segurança. O coeficiente de segurança de equipamentos e ferramentas em relação à carga máxima de trabalho deve ser no mínimo igual a 3 e os estropos, cabos destinados à movimentação e elevação de cargas devem ser de aço e devem ter no mínimo um diâmetro de 16 mm. O desenrolamento de cabos será efetuado recorrendo a equipamento de desenrolamento em tração mecânica e feito de forma a evitar o contacto do cabo com superfícies que lhe possam causar danos. As máquinas de desenrolamento, um sistema de guincho e freio, assim como os cavaletes das bobinas devem estar estabilizados com calços ou através de dispositivos hidráulicos. O sistema típico de guincho e freio encontra-se representado na figura 6.2. [29]

A colocação das máquinas, sempre que possível, deve ser tal que a sua distância ao apoio seja maior ou igual a 4 vezes a altura do poste e devem existir ligações à terra dos equipamentos e dos

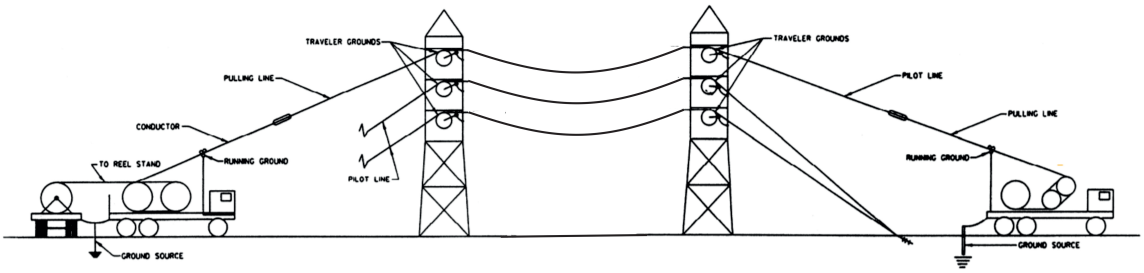


Figura 6.2: Conjunto de guincho e freio [10]

cabos à saída e entrada das máquinas de desenrolamento. Durante a operação de desenrolamento deve ser mantida uma adequada vigilância ao comportamento dos cabos nos vãos, especialmente sobre os obstáculos como por exemplo cruzamento de estradas ou zonas habitacionais. Deve existir uma comunicação permanente via rádio entre as equipas que coordenam estas operações e os operadores em cada um dos apoios durante todo o processo. É utilizada uma sucessão de vários tipos de guias até ser possível rebocar o condutor. Inicialmente, é passado um fio de nylon de 6 mm, que posteriormente rebocará uma corda de nylon de 12 mm. Esta, seguidamente, irá puxar uma corda *tesmec*. Esta corda será, por sua vez, usada para rebocar a corda de nylon de 12 mm. Posteriormente, a corda *tesmec* será usada para rebocar o cabo tensor de aço de 13 mm. Por fim, será então passado o cabo tensor de 20 mm que será usado para rebocar o condutor. Depois de preparadas as manobras nas cadeias de amarração, procede-se à regulação dos cabos por cantão. [30]

Na figura 6.3 é possível observar uma roldana colocada num apoio de amarração durante a passagem dos condutores.

6.3 Regulação

O processo de regulação consiste na fixação e montagem de cabos condutores e de guarda, obedecendo aos valores definidos durante a fase de projeto. No final do processo os condutores devem apresentar uma flecha efetiva cujo valor que deve estar contido num intervalo entre 1.5% inferior e 2.5% superior à flecha calculada.

A regulação mecânica dos condutores será feita pela medição das flechas dos condutores em roldanas. De modo a auxiliar este processo é fornecido um conjunto de tabelas de regulação que indicam os valores que devem ser medidos de acordo com a temperatura de montagem. É fornecido o parâmetro da catenária para pinças e para roldanas, assim como a tração horizontal que se deve verificar para cada temperatura. Consta também os valores da flecha para cada caso e o respetivo *offset*. Se o cantão a regular for apenas de um vão, efetua-se a regulação entre os dois postes. Se o cantão tem mais do que um vão, deverá ser escolhido o vão maior para efetuar a regulação e ser feita a verificação em outro vão previamente escolhido. A temperatura a considerar para efeitos de regulação é determinada por um termómetro adequado. Este deve estar suspenso



Figura 6.3: Roldana colocada num apoio de amarração durante a passagem dos condutores

livremente no apoio a alguns metros do solo. Deve evitar-se regular os condutores nas horas do dia em que ocorram variações bruscas da temperatura. Se houver uma variação de temperatura ambiente superior a 5^{o}C durante o processo de regulação, deve ser executada para o valor da flecha correspondente à nova temperatura. De modo a compensar o alongamento inelástico dos condutores após a regulação, as flechas de montagem a utilizar deverão ser as que correspondem à temperatura ambiente afetada de uma correção de temperatura, habitualmente é considerada como sendo 5^{o}C mais baixa. A regulação só pode acontecer nos dias em que a intensidade do vento não desvie os cabos do plano vertical. Normalmente o vão mais perto do equipamento de tração chega mais rápido à flecha, contudo, as manobras de regulação de cabos só terminam quando nos vãos de regulação e de confirmação as flechas estejam dentro das tolerâncias. [30]

6.3.1 Ângulo de visada

O método usado para aferir a flecha é baseado no ângulo de visada. Esta medida corresponde ao ângulo que o eixo ótico do teodolito, tangente à catenária, faz com a vertical, conforme ilustrado na figura 6.4. O teodolito pode ser colocado no centro geométrico do apoio ou junto a uma das pernas. O ângulo é fixado e os cabos ficam na flecha quando a linha de visada é tangente ao

cabo no ponto T. O responsável pelo procedimento de regulação dispõe de uma calculadora programável onde introduz a informação que consta na tabela de regulação, assim como a localização do teodolito. Com essa informação obtém então o ângulo que deve ser medido pelo teodolito e que garante que a flecha se encontra com os valores projetados. Existe uma comunicação constante entre os colaboradores da regulação que se encontram em cada apoio e o chefe de equipa de amarração uma comunicação via rádio. O responsável pela de regulação dará indicação para que os colaboradores puxem ou arreiem com os *pulllifts* até o condutor se encontrar na posição desejada. A parte inferior do cabo deve estar alinhada no reticulo horizontal do teodolito, no ponto de interseção da catenária. [29]

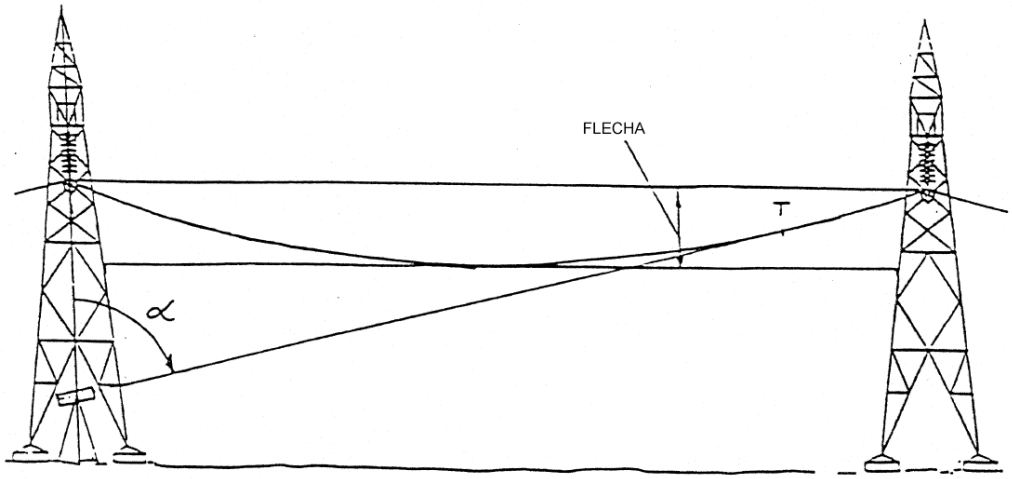


Figura 6.4: Conjunto de guincho e freio [10]

6.3.2 Marcação do Offset

Uma vez atingida a flecha pretendida, importa proceder à marcação do *offset*. Para isso, o operador do teodolito coloca o instrumento na zona lateral ou central ao poste, de forma a que seja possível indicar ao operador que se encontra no apoio os pontos de verticalidade da roldana em relação ao apoio. Na figura 6.5 é possível observar que medidas estão em consideração neste processo. O trabalhador desce na escada até ao nível da roldana e marca os condutores, nos pontos indicados pelo operador do teodolito. A partir desta marca, será medida e marcada a distância do *offset* considerada na tabela de regulação. No local sinalizado serão na fase seguinte cravados os acessórios das cadeias.

6.4 Fixação dos condutores

Após os condutores se encontrarem na condição de regulação pretendida, importa que a fixação seja feita de forma definitiva e sem afetar a flecha. [29]

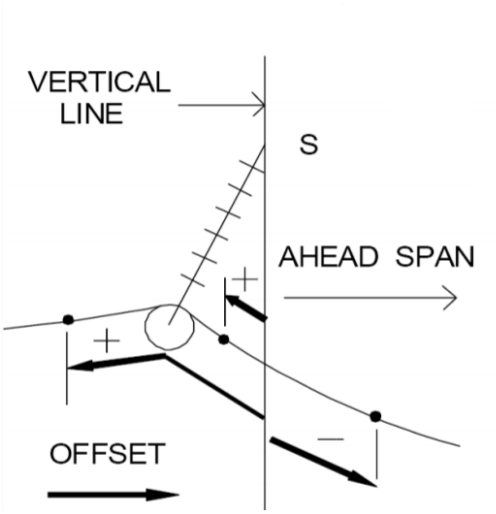


Figura 6.5: Representação das medidas consideradas durante a marcação do Offset[10]

Para efetuar a operação de fixação é utilizado um *pulllifts* de 3000 kg, um mordente para cabo com forra adequada para não danificar o condutor, e as ferramentas de medida. Os *pulllifts* são fixados por estropos entre a estrutura do apoio e os mordentes de suspensão. Na imagem 6.4 é possível verificar um procedimento deste tipo. De realçar que é visível que o condutor, entre o apoio e o mordente, se encontra praticamente sem tensão de modo a que possa ser cortado e manuseado durante o processo de fixação definitiva. O peso da cesta onde se encontram os técnicos está a ser suportado pelos estropos.



Figura 6.6: Processo de cravação dos condutores obra.

São então acionados os *pulllifts* até suspender os cabos de forma a que roldana possa ser arreada. Depois de concluída esta operação o cabo pode ser cortado, no caso de ser um isolador de amarração, e colocados manguitos e as varetas responsáveis por cravar o condutor aos isoladores. Na figura 6.7 consta um pormenor dos procedimentos usados pelos técnicos durante a manobra de cravação.



Figura 6.7: Pormenor de medição em obra da dimensão da vareta após ser cravado o condutor

Resta apenas, caso esteja previsto, a colocação dos amortecedores nos cabos, respeitando as distâncias e binários de aperto. Após a conclusão da amarração, será feita uma verificação da regulação para, caso seja necessário, ser retificada com a régua da ferragem que permite um pequeno ajustamento. [30]

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente capítulo tem como finalidade expor as principais conclusões retiradas da pesquisa e do estudo realizados no decurso desta dissertação. São também apresentados possíveis desenvolvimentos futuros, que melhorem os resultados obtidos, e tendo a dissertação sido efetuada em ambiente empresarial, melhorias que facilitem o trabalho efetuado no terreno.

7.1 Conclusões

Com os métodos computacionais atualmente disponíveis, grande parte do cálculo mecânico de linhas é efetuado de forma automática. No entanto, é imperativo que um engenheiro eletrotécnico que trabalhe com linhas tenha conhecimento dos fundamentos subjacentes ao cálculo mecânico e elementos constituintes do sistema. Por essa razão a presente dissertação começa por expor esses fundamentos de forma a suportar os conceitos posteriormente explorados.

O desafio lançado pela PROEF consistia no desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo que permitisse de forma expedita obter as tabelas de regulação que são entregues na obra de modo a guiar o processo de regulação dos condutores. Nestas tabelas devem constar, para cada vão, os valores da flecha do cabo em pinças, que é o estado final que será verificado durante os processos finais de verificação e fiscalização. Adicionalmente, devem constar outras informações que são necessárias durante o processo de regulação. A flecha para situação de roldanas, respetivos parâmetros da catenária, *offset* usado durante a marcação do local de fixação das cadeias e tração horizontal a ser aplicada no reboque dos cabos. Devem constar nas tabelas de regulação os valores conforme a temperatura que se verifique no dia em que for efetuada a regulação.

Durante a pesquisa efetuada para desenvolver a ferramenta de cálculo foram avaliadas diversas formas de obter a flecha do condutor. Por se tratar de linhas MAT, é exigido que seja utilizado o método hiperbólico, o método disponível que utiliza menos aproximações e por isso retrata de forma mais realista o comportamento do cabo. O estudo deste método remonta a meados do século XX, quando os engenheiros responsáveis por projetar linhas verificaram que os valores obtidos recorrendo a aproximações parabólicas retornavam valores que se distanciavam demasiado dos verificados quando a linha era implantada, particularmente em terreno muito acidentado. Por

essa razão diversos autores propuseram métodos que melhorassem os resultados obtidos tendo em consideração o desnível existente dentro de cada cantão. O método seguido nesta dissertação é o proposto por *Winkelman* em 1959, por ser o autor de referência no cálculo do *offset* e compensação da flecha em roldanas.

O método de cálculo da compensação da flecha em roldanas e respetivo *offset* é um tema pouco explorado academicamente, sendo o artigo de *Winkelman* ainda hoje uma clara a referência nesta área. Um dos passos cruciais no cálculo de flechas em terreno muito desnivelado é a obtenção correta do ponto mínimo da catenária descrita pelo cabo. Uma pequena variação desta grandeza leva a um erro considerável na flecha obtida. Durante o processo de passagem dos condutores, quando um condutor se encontra em roldanas consideradas ideais, sem atrito, e em terreno muito desnivelado, tende a atingir o equilíbrio num ponto em que a sua flecha é superior à calculada para pinças nos vãos inferiores, e uma flecha inferior nos vãos superiores. Devido a este efeito é necessário calcular o valor da flecha para a situação de suspensão em roldanas e o respetivo *offset*. É igualmente necessário obter o parâmetro da catenária correspondente à suspensão em roldanas, uma vez que será esse o valor utilizado para efetuar o cálculo que dita o ângulo que o teodolito terá de medir por forma a garantir a flecha correta, conforme explicado no capítulo 6. Estando o condutor em roldanas, o *offset* corresponde à distância que terá de ser medida entre o ponto de perpendicularidade nesse estado e o local em que deve ser marcado o ponto de fixação da cadeia de isoladores, por forma a garantir a perpendicularidade da cadeia em relação ao solo. Os valores do *offset*, parâmetro da catenária e da flecha em situação roldanas não podem ser analisadas isoladamente, uma vez que dependem de todos os vãos adjacentes na totalidade do cantão.

Por razões expectáveis, relacionadas com os prazos de execução das obras e o custo económico, não é possível nesta fase serem testados numa linha em construção os valores obtidos. A solução encontrada para validar os resultados obtidos foi a comparação com folhas de regulação de obras previamente realizadas, provenientes de programas de simulação, mais especificamente no PLS-CADD. Não era expectável que fossem obtidos exatamente os mesmos valores, no entanto, sendo o procedimento de cálculo baseado no mesmo método, os valores deve ser próximos e seguir os mesmos padrões de variação. A diferença entre os valores não configura necessariamente um erro caso esses valores sejam aplicados na linha, uma vez que os valores são encadeados em todos os vãos do cantão. Pode, por isso, haver mais do que uma solução para atingir a perpendicularidade desejada nas cadeias e garantir a flecha correta em pinças.

Relativamente à flecha em pinças, os valores obtidos foram muito próximos para todas as situações analisadas, mesmo nas mais desafiantes onde existia um desnível acentuado, sendo por isso válido assumir que o método usado é muito similar ao do PLS-CADD. Em relação aos restantes parâmetros, os valores obtidos são próximos, sempre dentro das tolerâncias admitidas pela REN e com um comportamento semelhante. Por essa razão, considera-se que os valores obtidos pela ferramenta de cálculo estão corretos e são válidos.

A situação que se verificou mais desafiante para a ferramenta desenvolvida corresponde a pontos onde exista uma diferença acentuada na tendência de variação do nível do terreno nos vãos adjacentes. Em certos casos, nesta situação dá-se a mudança de sinal do *offset*, o que corresponde

a efetuar a marcação da distância para o lado oposto do apoio. Ainda assim, nesta situação os resultados obtidos seguem o padrão de comportamento dos usados para comparação.

Foi ainda explorado o processo de regulação dos condutores pela importância que tem no âmbito geral deste trabalho. Durante a dissertação tive oportunidade de contactar com técnicos de obra responsáveis pela regulação dos condutores de forma a perceber o modo como eram utilizados os valores das tabelas de regulação. O processo de regulação é um trabalho realizado por uma equipa altamente especializada e onde a experiência tem um papel de extrema importância.

Em suma, a ferramenta de cálculo desenvolvida permite a obtenção das tabelas de regulação para cada cantão de forma fácil e rápida conforme o desafio lançado no início da dissertação.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

O contacto com o responsável pela equipa de regulação permitiu perceber que uma das etapas que poderia ser otimizada é a marcação da perpendicularidade quando o condutor se encontra suspenso em roldanas. Nesta etapa é necessário usar o teodolito de forma a indicar ao colaborador que se encontra no topo do apoio qual o ponto de perpendicularidade e daí efetuar a medição do *offset*. De forma agilizar este processo, o *offset* poderia ser calculado de forma a ser marcado não em relação ao ponto de perpendicularidade, mas sim em relação ao vértice da roldana conforme ilustrado na figura 7.1. Esta compensação na distância de offset permitia que não fosse necessária a utilização do teodolito na marcação.

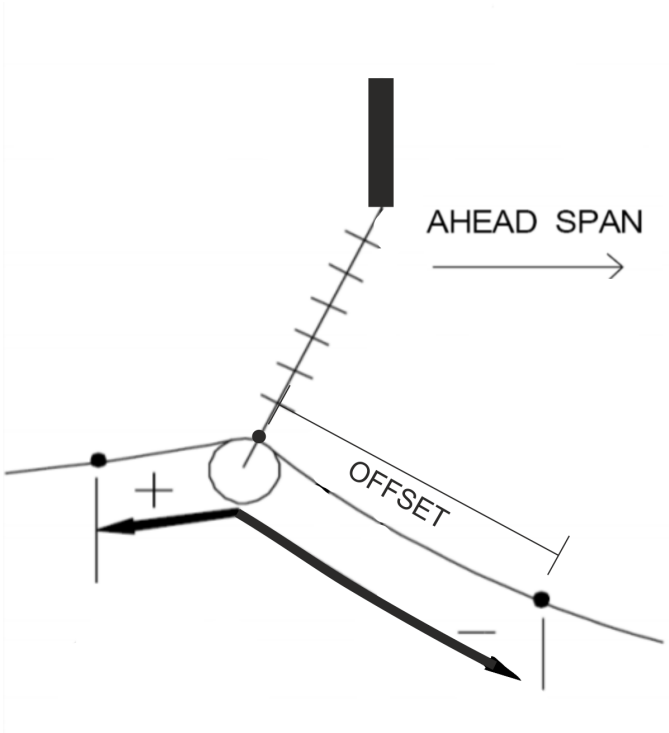


Figura 7.1: Método sugerido para nova forma de marcar offset. [10]

Anexo A

Códigos desenvolvidos na ferramenta de cálculo.

Neste anexo constam os códigos desenvolvidos no Excel para efetuar os cálculos referentes ao *offset* e correção da flecha em roldanas, assim como alguns cálculos auxiliares.

A.1 Códigos desenvolvidos na ferramenta de cálculos

```
Sub Estados()

Dim i As Integer
Dim u As Integer
 i = 11
u = 11
 Do While u > 0

    SolverOk SetCell:="$AE$" & i, MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$AH$" & i, Engine _
        :=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
 SolverSolve True
    i = 1 + i
    u = u - 1
    Application.Calculation = xlAutomatic
Loop


End Sub
```

Figura A.1: Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para auxiliar o cálculo dos diferentes estados atmosféricos através do *Solver*.

```
Sub offset()
'
' apagar1 Macro
'
' Atalho por teclado: Ctrl
'

b = 0
u = Range("Z13").Value
p = Range("Z13").Value
sumg = 0
sumf = 0
sumj = 0
sumh = 0
e = 0
cump = 12
cump2 = 16
cump3 = 12
cump5 = 12
cump6 = 12
k = 12
m = 0
i = 24
r = 0

u = Range("Z13").Value
p = Range("Z13").Value


Do While u > 0
    Cells(i, 49).Value = Range("B" & cump).Value
    Cells(i, 50).Value = Range("C" & cump).Value
    Cells(i, 51).Value = Range("F" & cump5).Value

    a = (Range("B" & cump).Value / ((Range("F" & cump5).Value * 2))
    * (Range("F" & cump5).Value - (Range("C" & cump).Value / 4)))
    Cells(i, 52).Value = a
    b = (1 * (Range("F3").Value) * ((Range("B" & cump).Value) - a)
    * ((Range("B" & cump).Value) - a) / ((Range("F4").Value) * 2)) -
    (((Range("F3").Value) * (a * a)) / (2 * (Range("F4").Value)))
```

Figura A.2a: Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para efetuar os cálculos do *offset* e correção de flechas para roldanas.

```
    d = b * (Range("F3").Value)
     Cells(i, 53).Value = b
     Cells(i, 54).Value = d
     Cells(i, 55).Value = e
       f = (Range("F3").Value) * (Range("F3").Value) * Range("B" & cump).Value *
       Range("B" & cump).Value
       * Range("B" & cump).Value * 1000 / (12 * Range("F4").Value *
       Range("F4").Value * Range("F4").Value)
       Cells(i, 56).Value = f
       g = f * e
       Cells(i, 57).Value = g
       sumg = sumg + g
       sumf = sumf + f
       Cells(21, 57).Value = sumg
       Cells(21, 56).Value = sumf
        e = e + d
    cump = cump + 11
    cump2 = cump2 + 11
    cump3 = cump3 + 1
    cump5 = cump5 + 11
     u = u - 1
    i = i + 2
     Application.Calculation = xlAutomatic
Loop
i = 24
p = Range("Z13").Value
Do While p > 0
g = (sumg / sumf) - Range("BC" & i).Value
Cells(i, 58).Value = g
h = g * Range("BD" & i).Value
sumh = sumh + h
Cells(21, 59).Value = sumh
Cells(i, 59).Value = h
j = (Range("AW" & i).Value) * (Range("BF" & i).Value * 1000) / ((Range("F5").Value)
* (Range("F6").Value))
sumj = sumj + j
Cells(i, 60).Value = j
Cells(21, 60).Value = sumj
i = i + 2
p = p - 1
Loop
 i = 24
q = Range("Z13").Value
Do While q > 0
l = (-(sumj + sumh) / (sumf)) * Range("BD" & i).Value
Cells(i, 61).Value = l
r = r + m
Cells(i, 63).Value = -r
m = Range("BG" & i).Value + Range("BH" & i).Value + Range("BI" & i).Value
Cells(i, 62).Value = m

u = ((Range("F4").Value) * Range("BG" & i).Value) / (800 * (Range("F3").Value) *
Range("AW" & i).Value)
Cells(i, 64).Value = u
i = i + 2
q = q - 1
Loop
s = Range("Z13").Value
o = 24
Do While s > 0 'ciclo 1
r = (Range("F" & k).Value) + (Range("BL" & o).Value)
v = ((Range("BK" & o).Value) / 10)
Cells(k, 7).Value = r
Cells(k, 25).Value = v
  s = s - 1
k = k + 11
  o = o + 2
```

Figura A.2b: Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para efetuar os cálculos do *offset* e correção de flechas para roldanas.

```
Sub Vaoequivalente()

Dim i As Integer
Dim u As Integer
Dim a As Long
Dim b As Long
Dim c As Long
 b = 0
 c = 0
 i = 12
u = Range("Z13").Value
 Do While u > 0

 a = (Range("M" & i).Value)
    i = 11 + i
    u = u - 1
    b = a * a * a + b
    c = a + c
     Application.Calculation = xlAutomatic
Loop

  Cells(12, 44).Value = Sqr(b / c)

End Sub
```

Figura A.3: Código referente à macro desenvolvida no *Excel* para efetuar os cálculos do vão equivalente.

Anexo B

Análise de resultados

Depois de analisados pormenorizadamente os resultados de alguns cantões no capítulo V, serão aqui expostos novos resultados, de diferentes linhas, que servem como complemento à validação dos resultados obtidos na ferramenta de cálculo desenvolvida. Em cada caso serão analisados os pontos de maior interesse e que desafios colocam à ferramenta de cálculo.

B.1 Análise dos resultados para cabo de guarda do tipo Dorking

Na figura B1 constam os resultados obtidos para o cantão 1 analisado no capítulo V, mas referente ao cabo de guarda.

Os resultados são satisfatórios uma vez que são bastante próximos dos dados usados para comparação. O cabo de guarda tem um diâmetro e peso inferior ao condutor sendo por isso submetido a tensão mecânica inferior. Estando os cabos de guarda localizados no topo da linha, as flechas são particularmente importantes para garantir o distanciamento mínimo que deve existir entre os cabos.

B.2 Análise dos resultados para cabo de condutor do tipo Bear

No presente anexo consta a comparação de resultados referentes a uma linha de 150kV com cabo condutor do tipo Bear. O tipo de terreno em que está implantada é similar aos casos anteriormente analisados, assim como o vão equivalente.

Os resultados obtidos constam na figura B2. Analisando os valores referentes *offset* verifica-se que seguem a tendência de variação dos que constam na tabela de regulação usada para comparação. Sendo valores reduzidos, na ordem dos 2 milímetros, têm pouca relevância na aplicação no terreno dado que o método de marcação do ponto de perpendicularidade não tem tanta precisão. Importa, no entanto, garantir que a ferramenta tem sensibilidade para retornar valores de pequena escala. No respeitante aos restantes parâmetros obtidos os valores são muito próximos dos da tabela de regulação. As pequenas diferenças que se verificam devem-se às variações nas caraterísticas técnicas do cabo condutor conforme anteriormente referido.

Comp.(m)	Desnivel (m)	Temp.(ºC)	Parametro em pinças(m)	Parametro em pinças (m) REN	Flecha em pinças(m)	Flecha em pinças(m) REN	Flecha em roldanas(m)	Flecha em roldanas(m) REN	Parametro em roldanas (m)	Parametro em roldanas (m) REN	Offset(cm)	Offset(cm) REN	Tracção Horizontal (daN)	Tracção Horizontal (daN)
348,92	**-11,24**	-5	1922	1922	7,92	7,93	7,81	7,83	1949	1946	0,0	0,0	1378	1378
		0	1890	1889	8,06	8,06	7,95	7,96	1915	1914	0,0	0,0	1355	1355
		5	1859	1858	8,19	8,20	8,09	8,09	1883	1882	0,0	0,0	1332	1332
		10	1829	1829	8,33	8,33	8,22	8,22	1852	1853	0,0	0,0	1311	1311
7 - 8		**15**	**1800**	**1800**	**8,46**	**8,46**	**8,36**	**8,35**	**1822**	**1825**	**0,0**	**0,0**	**1290**	**1290**
		20	1772	1772	8,59	8,60	8,46	8,48	1800	1797	0,0	0,0	1271	1271
		25	1746	1746	8,72	8,73	8,59	8,61	1773	1770	0,0	0,0	1252	1252
		30	1720	1720	8,85	8,86	8,72	8,74	1746	1744	0,0	0,0	1233	1233
		35	1695	1695	8,98	8,99	8,85	8,86	1720	1720	0,0	0,0	1216	1216
		40	1672	1671	9,11	9,12	8,99	8,99	1693	1696	0,0	0,0	1198	1198
301,95	**-4,35**	-5	1922	1922	5,93	5,93	5,88	5,87	1937	1941	1,4	1,5	1378	1378
		0	1890	1889	6,03	6,04	5,99	5,98	1904	1909	1,5	1,6	1355	1355
		5	1859	1858	6,13	6,14	6,09	6,07	1872	1877	1,5	1,6	1332	1332
		10	1829	1829	6,23	6,24	6,19	6,17	1842	1848	1,6	1,7	1311	1311
8 - 9		**15**	**1800**	**1800**	**6,33**	**6,34**	**6,29**	**6,27**	**1812**	**1820**	**1,6**	**1,8**	**1290**	**1290**
		20	1772	1772	6,43	6,43	6,38	6,36	1788	1792	1,6	1,9	1271	1271
		25	1746	1746	6,53	6,53	6,48	6,46	1761	1765	1,7	1,9	1252	1252
		30	1720	1720	6,63	6,63	6,57	6,56	1735	1739	1,7	2,0	1233	1233
		35	1695	1695	6,73	6,73	6,67	6,65	1709	1715	1,7	2,1	1216	1216
		40	1672	1671	6,82	6,82	6,77	6,74	1684	1691	1,8	2,2	1198	1198
372,56	**-16,15**	-5	1922	1922	9,03	9,04	8,98	9,02	1933	1926	2,1	2,4	1378	1378
		0	1890	1889	9,18	9,20	9,14	9,18	1900	1893	2,1	2,5	1355	1355
		5	1859	1858	9,34	9,35	9,29	9,33	1868	1862	2,1	2,6	1332	1332
		10	1829	1829	9,49	9,50	9,44	9,48	1838	1833	2,3	2,7	1311	1311
9 - 10		**15**	**1800**	**1800**	**9,64**	**9,66**	**9,60**	**9,63**	**1809**	**1804**	**2,4**	**2,8**	**1290**	**1290**
		20	1772	1772	9,79	9,81	9,73	9,78	1784	1777	2,6	2,9	1271	1271
		25	1746	1746	9,94	9,96	9,88	9,93	1756	1750	2,7	3,0	1252	1252
		30	1720	1720	10,09	10,11	10,03	10,08	1730	1724	2,7	3,1	1233	1233
		35	1695	1695	10,24	10,25	10,18	10,23	1705	1700	2,8	3,2	1216	1216
		40	1672	1671	10,38	10,40	10,33	10,37	1680	1676	2,9	3,4	1198	1198
413,13	**2,46**	-5	1922	1922	11,11	11,11	11,14	11,13	1917	1919	2,5	2,6	1378	1378
		0	1890	1889	11,30	11,30	11,33	11,32	1884	1886	2,7	2,7	1355	1355
		5	1859	1858	11,49	11,49	11,52	11,51	1853	1855	2,9	2,9	1332	1332
		10	1829	1829	11,68	11,68	11,71	11,70	1824	1826	2,9	3,0	1311	1311
10 - 11		**15**	**1800**	**1800**	**11,87**	**11,87**	**11,90**	**11,89**	**1795**	**1797**	**3,0**	**3,1**	**1290**	**1290**
		20	1772	1772	12,05	12,05	12,09	12,07	1766	1769	3,0	3,3	1271	1271
		25	1746	1746	12,24	12,24	12,28	12,26	1740	1743	3,1	3,4	1252	1252
		30	1720	1720	12,42	12,42	12,46	12,44	1715	1717	3,3	3,5	1233	1233
		35	1695	1695	12,60	12,60	12,64	12,62	1690	1692	3,5	3,7	1216	1216
		40	1672	1671	12,78	12,78	12,81	12,81	1667	1668	3,7	3,8	1198	1198
384,8	**-9,33**	-5	1922	1922	9,63	9,64	9,65	9,67	1919	1917	2,2	2,2	1378	1378
		0	1890	1889	9,80	9,81	9,82	9,84	1887	1884	2,2	2,4	1355	1355
		5	1859	1858	9,96	9,97	9,98	10,00	1856	1853	2,3	2,5	1332	1332
		10	1829	1829	10,13	10,13	10,14	10,16	1826	1823	2,3	2,6	1311	1311
11 - 12		**15**	**1800**	**1800**	**10,29**	**10,29**	**10,30**	**10,33**	**1797**	**1795**	**2,4**	**2,7**	**1290**	**1290**
		20	1772	1772	10,45	10,46	10,47	10,49	1769	1767	2,4	2,8	1271	1271
		25	1746	1746	10,61	10,62	10,63	10,65	1743	1740	2,6	2,9	1252	1252
		30	1720	1720	10,77	10,78	10,79	10,81	1717	1714	2,7	3,0	1233	1233
		35	1695	1695	10,92	10,93	10,94	10,97	1693	1690	2,7	3,2	1216	1216
		40	1672	1671	11,08	11,09	11,10	11,13	1669	1666	2,8	3,3	1198	1198
489,36	**12,46**	-5	1922	1922	15,60	15,66	15,70	15,74	1910	1912	1,7	1,7	1378	1378
		0	1890	1889	15,87	15,93	15,97	16,02	1878	1879	1,8	1,8	1355	1355
		5	1859	1858	16,13	16,20	16,23	16,29	1847	1848	2,0	1,9	1332	1332
		10	1829	1829	16,40	16,46	16,50	16,55	1818	1818	2,1	2,0	1311	1311
12 - 13		**15**	**1800**	**1800**	**16,66**	**16,72**	**16,76**	**16,82**	**1790**	**1790**	**2,1**	**2,1**	**1290**	**1290**
		20	1772	1772	16,92	16,98	17,05	17,08	1759	1762	2,1	2,2	1271	1271
		25	1746	1746	17,18	17,25	17,31	17,35	1733	1735	2,2	2,3	1252	1252
		30	1720	1720	17,44	17,51	17,56	17,62	1708	1709	2,2	2,4	1233	1233
		35	1695	1695	17,69	17,76	17,81	17,87	1684	1685	2,4	2,5	1216	1216
		40	1672	1671	17,95	18,02	18,06	18,13	1662	1661	2,5	2,6	1198	1198

Figura B.1: Comparação de resultados obtidos para cabo de guarda na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada.

Comp.(m)	Desnivel (m)	Temp.(ºC)	Parametro em pinças(m)	Parametro em pinças (m) REN	Flecha em pinças(m)	Flecha em pinças(m) REN	Flecha em roldanas(m)	Flecha em roldanas(m) REN	Parametro em roldanas (m)	Parametro em roldanas (m) REN	Offset(cm)	Offset(cm) REN	Tracção Horizontal (daN)	Tracção Horizontal (daN)
348,92	**-14,15**	-5	1947	1947	11,74	11,74	11,73	11,74	1948	1947	0,0	0,0	2336	2342
		0	1910	1910	11,96	11,97	11,96	11,97	1911	1909	0,0	0,0	2292	2297
		5	1875	1875	12,19	12,19	12,18	12,20	1876	1874	0,0	0,0	2250	2255
		10	1841	1841	12,41	12,42	12,41	12,42	1842	1840	0,0	0,0	2209	2214
4 - 5		**15**	**1809**	**1809**	**12,64**	**12,64**	**12,63**	**12,64**	1810	**1808**	0,0	**0,0**	2171	**2175**
		20	1778	1778	12,85	12,86	12,85	12,86	1779	1777	0,0	0,0	2134	2138
		25	1749	1748	13,07	13,07	13,07	13,08	1750	1748	0,0	0,0	2098	2103
		30	1720	1720	13,29	13,29	13,28	13,30	1721	1719	0,0	0,0	2064	2069
		35	1693	1693	13,50	13,51	13,50	13,51	1694	1692	0,0	0,0	2032	2036
		40	1667	1667	13,71	13,72	13,71	13,72	1668	1666	0,0	0,0	2000	2005
301,95	**-4,35**	-5	1947	1947	10,18	10,18	10,19	10,16	1946	1950	0,0	-0,1	2336	2342
		0	1910	1910	10,38	10,38	10,38	10,36	1909	1912	0,0	-0,1	2292	2297
		5	1875	1875	10,57	10,57	10,58	10,56	1874	1878	0,0	-0,1	2250	2255
		10	1841	1841	10,76	10,77	10,77	10,75	1840	1844	0,0	-0,1	2209	2214
5 - 6		**15**	**1809**	**1809**	**10,96**	**10,96**	**10,96**	**10,94**	1808	**1811**	0,0	**-0,1**	2171	**2175**
		20	1778	1778	11,15	11,15	11,16	11,13	1777	1781	0,0	-0,1	2134	2138
		25	1749	1748	11,34	11,34	11,34	11,32	1747	1751	0,0	-0,1	2098	2103
		30	1720	1720	11,52	11,53	11,53	11,51	1719	1722	-0,1	-0,1	2064	2069
		35	1693	1693	11,71	11,71	11,72	11,69	1692	1695	-0,1	-0,2	2032	2036
		40	1667	1667	11,89	11,89	11,90	11,87	1666	1670	-0,1	-0,2	2000	2005
372,56	**-16,15**	-5	1947	1947	12,79	12,79	12,75	12,79	1952	1947	0,0	0,1	2336	2342
		0	1910	1910	13,04	13,04	13,00	13,04	1915	1910	0,0	0,1	2292	2297
		5	1875	1875	13,28	13,28	13,25	13,28	1879	1875	0,0	0,1	2250	2255
		10	1841	1841	13,52	13,53	13,49	13,53	1845	1841	0,0	0,2	2209	2214
6 - 7		**15**	**1809**	**1809**	**13,77**	**13,77**	**13,74**	**13,77**	1813	**1808**	0,0	**0,2**	2171	**2175**
		20	1778	1778	14,01	14,01	13,97	14,01	1783	1778	0,0	0,2	2134	2138
		25	1749	1748	14,24	14,25	14,20	14,25	1753	1748	0,1	0,2	2098	2103
		30	1720	1720	14,48	14,48	14,44	14,49	1725	1720	0,1	0,2	2064	2069
		35	1693	1693	14,71	14,72	14,67	14,72	1697	1692	0,1	0,2	2032	2036
		40	1667	1667	14,94	14,95	14,91	14,95	1671	1667	0,1	0,2	2000	2005
413,13	**1,85**	-5	1947	1947	9,84	9,84	9,84	9,85	1946	1944	0,0	0,1	2336	2342
		0	1910	1910	10,03	10,03	10,03	10,05	1909	1907	0,0	0,1	2292	2297
		5	1875	1875	10,22	10,22	10,22	10,23	1874	1872	0,0	0,1	2250	2255
		10	1841	1841	10,40	10,41	10,41	10,42	1840	1838	0,0	0,1	2209	2214
7 - 8		**15**	**1809**	**1809**	**10,59**	**10,59**	**10,59**	**10,61**	1808	**1806**	0,0	**0,1**	2171	**2175**
		20	1778	1778	10,77	10,78	10,78	10,79	1777	1775	0,0	0,1	2134	2138
		25	1749	1748	10,95	10,96	10,96	10,98	1748	1746	0,0	0,1	2098	2103
		30	1720	1720	11,14	11,14	11,14	11,16	1719	1717	0,0	0,1	2064	2069
		35	1693	1693	11,31	11,32	11,32	11,34	1692	1690	0,0	0,1	2032	2036
		40	1667	1667	11,49	11,50	11,50	11,51	1666	1664	0,0	0,1	2000	2005
384,8	**-8,72**	-5	1947	1947	8,92	8,92	8,95	8,92	1940	1949	0,0	-0,1	2336	2342
		0	1910	1910	9,09	9,10	9,13	9,09	1903	1912	0,0	-0,1	2292	2297
		5	1875	1875	9,27	9,27	9,30	9,26	1869	1877	0,0	-0,1	2250	2255
		10	1841	1841	9,44	9,44	9,47	9,43	1835	1843	0,0	-0,1	2209	2214
8 - 9		**15**	**1809**	**1809**	**9,60**	**9,61**	**9,63**	**9,60**	1803	**1810**	0,0	**-0,2**	2171	**2175**
		20	1778	1778	9,77	9,78	9,81	9,77	1771	1780	0,0	-0,2	2134	2138
		25	1749	1748	9,94	9,94	9,98	9,93	1742	1750	0,0	-0,2	2098	2103
		30	1720	1720	10,10	10,11	10,14	10,10	1714	1722	-0,1	-0,2	2064	2069
		35	1693	1693	10,26	10,27	10,30	10,26	1687	1695	-0,1	-0,2	2032	2036
		40	1667	1667	10,42	10,43	10,46	10,42	1661	1385	-0,1	-0,2	2000	2005

Figura B.2: Comparação de resultados obtidos para cabo condutor na ferramenta de cálculo e dados utilizados numa folha de regulação de uma obra realizada.

Referências

[1] REN. Linhas da RNT projetos de linhas aéreas de MAT. 2016.

[2] Vera Mónica Silva. *Automatização do Projeto de Linhas Elétricas: Criação de Modelo Matemático para Minimização de Custos*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.

[3] REN. Especificação Técnica Isoladores De Compósito. 2007.

[4] Electrical4U. Types of Insulators in Transmission Lines | Electrical4u. (acedido a última vez em 10-01-2020). URL: https://www.electrical4u.com/types-of-electrical-insulator-overhead-insulator/.

[5] Huadong Cable. Aluminium Conductor Steel Reinforced Huadong. (acedido a última vez em 10-11-2019). URL: http://www.hdcoverheadconductor.com/acsr-conductor/.

[6] Helder Leite. *Elaboração de Projectos de Linhas Aéreas*. Tese de doutoramento, 2008.

[7] Paulo Roberto Labegalini, Jose Ayrton Labegalini, Rubens Dario Fuchs, e Marcio Tadeu Almeida. Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão. 1992.

[8] Electricalunits. Sag calculation in overhead line | Electricalunits.com. (acedido a última vez em 21-11-2019). URL: http://www.electricalunits.com/sag-calculation-overhead-line/.

[9] Japhet D. Sakala. Improved calculation of sag for a conductor supported at unequal heights. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 2008.

[10] Leonard L. Grigsby. *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*. 2013.

[11] Alice Araújo. Projeto de uma Linha de Alta Tensão. 2019.

[12] Joaquim Albuquerque de Moura Relvas. Contribuição para o estudo mecânico de condutores de linhas aéreas de transporte de energia elétrica. *Publicado nos nº10 e 11, Revista Eletricidade*, 1972.

[13] Paul Winkelman. Sag-Tension Computations, Measurements of Bonneville Power Admistration. 1959.

[14] REN. REN em linha com o desenvolvimento sustentável. 2003.

[15] REN. Regras de Segurança junto a Instalações de Muito Alta Tensão e Alta Tensão. 2010.

[16] Aeroporto da Portela e Limitações em Altura. Circular de informação aeronáutica. 2003.

[17] José Rui Ferreira. Sistemas Eléctricos de Energia, Linhas de Transmissão. 2004.

[18] Vasco Coucello. Regulamento de Segurança de Linhas Electricas, 1991.

[19] Helder Leite. Tecnicas de Alta Tensão, Coordenação de isolamento. *Seminário Avançado em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica - SALTEE*, páginas 1–14, 1996.

[20] João Falcão. Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a norma EN50341-1. 2009.

[21] CABELT. Cabos Nús para Linhas Aéreas. (acedido a última vez em 10-10-2019). URL: http://svrweb.cabelte.pt/pt-pt/produtos{_}servicos/Cabos{_}energia/Nus{_}para{_}linhas{_}aereas.

[22] EDP Distribuição. Guia técnico de terras - DRE-C11-040/N. 2010.

[23] REN. Instrução operacional de ligações à terra. páginas 5–6, 2015.

[24] António Machado e Moura. Novas Tabelas Universais para o Cálculo Mecânico de Condutores e Fios de Guarda de Linhas Aéreas de Transporte de Energia Elétrica, 1975.

[25] James Martin. Sag Calculations by the Use of Martin's Tables, 1961.

[26] Teresa Hand-Campbell. PLSCADD Advanced Training and User Group Meeting July 15th. páginas 1–44, 2009.

[27] REN. Especificação técnica. Montagem de Linhas. páginas 0–31, 2007.

[28] REN. Instrução Operacional-Transporte de bobinas. páginas 3–5, 2015.

[29] REN. Instrução Operacional-Regulação de cabos. páginas 1–9, 2015.

[30] REN. Instrução Operacional-Fixação de cabos. páginas 1–2, 2015.