



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA
ELETROTÉCNICA

**Análise Técnico-Económica e Avaliação
da Sustentabilidade da Integração de
Linhas Aéreas Compactas em Redes de
Distribuição de Média Tensão: Estudo de
Caso em Mangualde**

Autor

Hélder Francisco da Silva Gouveia

Orientador

Doutor Carlos Manuel Borralho Machado Ferreira

Coimbra, junho de 2025.

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE / DEPARTMENT OF
ENGENHARIA ELETROTÉCNICA

**Análise Técnico-Económica e Avaliação da
Sustentabilidade da Integração de Linhas Aéreas
Compactas em Redes de Distribuição de Média
Tensão: Estudo de Caso em Mangualde**

**Relatório de Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletrotécnica**

**Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas
de Energia**

Autor

Hélder Francisco da Silva Gouveia

Orientador

Doutor Carlos Manuel Borralho Machado Ferreira

Coimbra, junho de 2025

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho de mestrado marca o término de uma longa e desafiante jornada. No meu caso, este percurso foi pontuado por diversos contratempos que, por motivos pessoais, resultaram em sucessivos adiamentos. Assim, gostaria de expressar publicamente a minha gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, me acompanharam ao longo deste processo.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos Engenheiros João Garcia Mendes e José Maria Figueiredo (então responsáveis pela rede de clientes da área Mondego, antiga EDP Distribuição), que autorizaram o acesso à informação relativa à obra experimental realizada em Mangualde.

Agradeço também aos elementos de comando dos Corpos de Bombeiros Voluntários de Seia, pela confiança depositada no meu trabalho.

Expresso igualmente o meu reconhecimento a todos os docentes do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, em especial ao Professor Doutor Carlos Manuel Borralho Machado Ferreira.

Agradeço à empresa Afaplan, que me permitiu dispor do tempo necessário para a conclusão deste mestrado.

Acima de tudo, manifesto a minha profunda gratidão a toda a minha família, em especial às minhas filhas, Carolina e Joana, por serem uma brisa de alegria e um sopro de felicidade na minha vida num momento tão importante, e à minha esposa Sandra, que tem estado ao meu lado nos bons e nos maus momentos que a vida me tem proporcionado, apoiando-me incondicionalmente. Amo-vos para sempre, do fundo do coração.

RESUMO

O presente Trabalho de Projeto tem como objetivo complementar a formação na área dos Sistemas de Energia Elétrica, no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, ministrado pelo Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, através da análise da tecnologia de rede compacta desenvolvida pela “Hendrix”.

Procura-se avaliar as vantagens e eventuais limitações do sistema *Spacer Cable*, tomando como caso de estudo a obra “Linha de 15 kV de interligação Mangualde I – Mangualde Gare”. À semelhança do que ocorreu nas redes de baixa tensão, onde os condutores nus foram progressivamente substituídos por cabos isolados devido aos benefícios demonstrados, admite-se que a aplicação deste princípio às redes de média tensão possa proporcionar ganhos técnicos, ambientais e económicos relevantes.

Entre os benefícios identificados destacam-se a maior segurança para a avifauna e para a floresta, uma vez que o revestimento dos cabos constitui uma barreira física que evita o contacto direto com aves e vegetação, reduzindo o risco de eletrocussões, aprisionamentos e incêndios. Adicionalmente, a redução da necessidade de podas traduz-se numa diminuição dos custos de manutenção. Este tipo de rede compacta está ainda alinhado com práticas ambientalmente sustentáveis e contribui para o aumento da durabilidade dos cabos, protegendo-os contra a corrosão e outros agentes externos.

Apesar de apresentar um custo inicial mais elevado, o sistema *Spacer Cable* poderá compensar esse investimento através da redução dos custos operacionais, da menor incidência de avarias e dos impactos ambientais reduzidos.

Palavras-Chave: Distribuição de Energia Elétrica, Inovação Tecnológica, Rede Compacta, Segurança, Sustentabilidade.

ABSTRACT

This dissertation aims to complement training in the field of Energy Systems within the scope of the Master's Degree in Automation and Communications in Energy Systems, offered by the Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, through an in-depth analysis of the "Hendrix" compact network technology.

This Project aims to complement academic training in the field of Electrical Power Systems, within the framework of the Master's Degree in Electrical Engineering offered by the Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, through an analysis of the compact network technology developed by Hendrix.

The primary objective is to evaluate the advantages and potential limitations of the Spacer Cable system, using the “15 kV Interconnection Line Mangualde I – Mangualde Gare” as a case study. In a manner analogous to developments in low-voltage networks, where bare conductors have been progressively replaced by insulated cables due to their demonstrated benefits, it is assumed that the application of this principle to medium-voltage networks may yield significant technical, environmental, and economic advantages.

Among the identified benefits are enhanced safety for both avifauna and forested areas, as the cable insulation acts as a physical barrier, preventing direct contact with birds and vegetation and thereby reducing the risks of electrocution, entrapment, and wildfires. Additionally, the reduced need for tree pruning translates into lower maintenance costs. This type of compact network is further aligned with environmentally sustainable practices and contributes to increased cable longevity by providing protection against corrosion and other external factors.

Although the Spacer Cable system entails a higher initial investment, it has the potential to offset these costs through reduced operational expenditure, lower failure rates, and diminished environmental impact.

Keywords: Compact Networks, Power Distribution, Technological Innovation, Safety, Sustainability.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE QUADROS.....	xix
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO	1
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. HISTÓRIA DA EMPRESA <i>HENDRIX</i>	3
2.1 Início da tecnologia em análise.....	3
2.2 História da empresa <i>Hendrix Wire & Cable, Inc.</i>	4
3. TECNOLOGIA <i>SPACER CABLE</i>	7
3.1 Introdução à tecnologia.....	7
3.2 Tipos de espaçadores: losangular e vertical	8
3.3 Diferença nas intervenções de poda.....	10
3.4 Interação com a avifauna e protocolo E-Redes	14
3.5 Aplicações Industriais.....	18
3.6 Análise das causas de interrupções	19
3.7 Análise Comparativa para Travessias Elétricas	20
4. ESTUDO DE CASO: OBRA “LN 15 kV DE INTERLIGAÇÃO – MANGUALDE I - MANGUALDE GARE” DESENVOLVIDA PELA EDP DISTRIBUIÇÃO.....	25
4.1 Objetivo	25
4.2 Constituição do mensageiro	26
4.3 Tecnologia do cabo isolado	27
4.4 Isolamento	29
4.4.1 Materiais – Espaçadores	30

4.4.2	Materiais - isoladores rígidos HPI 15.....	32
4.4.3	Materiais - isoladores de amarração, DEINS 15	33
4.4.4	Materiais - Braço anti balanço	34
4.5	Terras.....	34
4.6	Dimensionamento de Apoios.....	34
4.7	Travessas- Estudo de montagem	35
4.7.1	Travessas - Armação BD 35	36
4.7.2	Travessas - Armação para mensageiro.....	36
4.7.3	Travessas - Armações laterais	37
4.8	Linha de Baixa tensão e de Iluminação Pública	37
5.	ACOMPANHAMENTO TÉCNICO DA EVOLUÇÃO DA OBRA	39
5.1	Abertura de covas	39
5.2	Arvoreamento de apoios.....	40
5.3	Betonagem	41
5.4	Construção – montagem das travessas.....	42
5.5	Construção – mensageiro.....	46
5.5.1	Cabo mensageiro	46
5.5.2	Cabo <i>spacer</i> (condutores).....	47
5.5.3	Passagem de condutores.....	48
5.6	Colocação de espaçadores.....	53
5.7	Construção - Execução de amarração	54
5.8	Amarração final.....	56
5.9	Ligação de condutores.....	59
5.10	Condutores com espaçadores instalados	62
5.11	Montagem de seccionador lado B do Fojo.....	63
5.12	Montagem de seccionador lado A	63
5.13	Montagem de seccionador lado do loteamento	64
5.14	Apoios com diferente nível de tensão elétrica.....	65
6.	ANÁLISE ECONÓMICA	69
6.1	Cenário 1 – linha construída com rede compacta (<i>Spacer Cable</i>)	69
6.2	Cenário 2 – linha construída com linha aérea de média tensão convencional	72
6.3	Cenário 3 – linha construída com linha subterrânea de MT	75
7.	CONCLUSÕES	81

7.1	Principais Conclusões.....	81
7.2	Perspetivas de Trabalho Futuro	82
ANEXO I – DIMENSIONAMENTO MECÂNICO.....		87
ANEXO II – CÁLCULO MECÂNICO E ELÉTRICO DO ISOLAMENTO		91
ANEXO III – DIMENSIONAMENTO DE APOIOS		93
ANEXO IV – ESTRUTURAS		101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de Cabos 15 kV até 45 kV [6].	3
Figura 2.2: Apoio de madeira com o sistema <i>Spacer Cable</i> [6].	4
Figura 2.3: Componentes do <i>Spacer Cable</i> [6].	4
Figura 3.1: Componentes do <i>Spacer Cable</i> [6].	7
Figura 3.2: Espaçador losangular [8].	8
Figura 3.3: Espaçador vertical [8].	8
Figura 3.4: Uso de espaçadores em cruzamentos [8].	9
Figura 3.5: Diferença entre a linha tradicional e a tecnologia <i>Spacer Cable</i> [6].	10
Figura 3.6: Linha Tradicional [6].	11
Figura 3.7: Tecnologia <i>Spacer Cable</i> [6].	11
Figura 3.8: Diferença na possível recuperação das copas [8].	12
Figura 3.9: Redução e proteção das podas consideradas de interesse público [6].	12
Figura 3.10: Linha de Média Tensão – cabo nu com ninho de cegonha.	13
Figura 3.11: Linha de Média Tensão – cabo nu com ninho de cegonha.	14
Figura 3.12: Consequências do contacto direto de aves com a linha de MT.	14
Figura 3.13: Ninho de cegonha em Cíborro.	15
Figura 3.14: Ninho cegonha em Cíborro.	16
Figura 3.15: Contacto direto entre linhas, por objetos estranhos.	16
Figura 3.16: Foto da primeira ignição do incêndio de Pedrógão Grande [14].	17
Figura 3.17: Vista aérea do local do incêndio, onde a circunferência a amarelo assinala o ponto de contacto provável entre a linha e a vegetação [14].	17
Figura 3.18: Imagem recolhida por um drone dos sobreiros, onde existe uma grande proximidade entre a linha e a ramagem, da qual se terá iniciado o incêndio em Regadas [14].	18
Figura 3.19: Utilização em Zona Industrial [6].	19
Figura 3.20: Rede com cabo nu em floresta [6].	20
Figura 3.21: Rede com cabo <i>spacer</i> em floresta [6].	21
Figura 3.22: Travessia de um lago [10].	23
Figura 4.1: Cabo Mensageiro.	26
Figura 4.2: Cabo mensageiro [17].	27
Figura 4.3: Isolamento do condutor – <i>Aerial Cable</i> 15 kV [17].	27
Figura 4.4: Condutor, <i>Aerial Cable</i> 15 kV [17].	28

Figura 4.5: Cabo <i>Aerial Cable</i> 15 kV.....	29
Figura 4.6: Bobinas do cabo <i>Aerial Cable</i> 15 kV.....	29
Figura 4.7: Espaçador [17].	31
Figura 4.8: Espaçador RTL-15 [17].....	31
Figura 4.9: Isolador rígido HPI 15 [17].	32
Figura 4.10: Isolador rígido HPI 15, com filaça [17].	33
Figura 4.11: Isolador de amarração DEINS 15 [17].....	33
Figura 4.12: Braço anti balanço [17].....	34
Figura 4.13: Estudo, Montagem das ferragens.	35
Figura 4.14: Estudo, Montagem das ferragens.....	35
Figura 4.15: Estudo, Montagem das ferragens.....	35
Figura 4.16: Estudo, Montagem das ferragens.....	35
Figura 4.17: Estudo, Montagem das ferragens.....	35
Figura 4.18: Estudo, Montagem das ferragens.....	36
Figura 4.19: Estudo, Montagem das ferragens.....	36
Figura 4.20: Estudo, Montagem das ferragens.....	36
Figura 4.21: Estudo, Montagem das ferragens.....	36
Figura 4.22: Armação para mensageiro.	37
Figura 4.23: Armação para mensageiro.	37
Figura 4.24: Armação Lateral.	37
Figura 4.25: Armação Lateral.	37
Figura 4.26: Dois níveis de tensão no mesmo apoio.	38
Figura 5.1: Local para abertura de cova.....	39
Figura 5.2: Início de abertura de cova.	39
Figura 5.3: Continuação de abertura de cova.....	39
Figura 5.4: Abertura de cova concluída.....	39
Figura 5.5: Abertura de cova com sinalização.....	40
Figura 5.6: Pormenor da prumagem.	40
Figura 5.7: Arvoramento apoio com auxílio grua.....	40
Figura 5.8: Arvoramento apoio com auxílio grua.....	40
Figura 5.9: Arvoramento apoio com auxílio grua.....	41
Figura 5.10: Arvoramento apoio com auxílio grua.....	41

Figura 5.11: Arvoreamento apoio, já na cova.....	41
Figura 5.12: Arvoreamento apoio, com espiagem.....	41
Figura 5.13: Betonagem.	42
Figura 5.14: Betonagem.	42
Figura 5.15: Betonagem.	42
Figura 5.16: Betonagem.	42
Figura 5.17: Travessas Montagem – Amarração.	43
Figura 5.18: Travessas Montagem.	43
Figura 5.19: Travessas Montagem HRFSC.....	43
Figura 5.20: Travessas Montagem HRFSC.....	43
Figura 5.21: Travessas de Montagem.	44
Figura 5.22: Travessas Montagem.	44
Figura 5.23: Travessas de Montagem.	44
Figura 5.24: Travessas de Montagem BD 35.	44
Figura 5.25: Travessas de Montagem BD 35.	44
Figura 5.26: Travessas de Montagem BD 35.	44
Figura 5.27: Travessas de Montagem BD 35.	45
Figura 5.28: Travessas de Montagem BD 35.	45
Figura 5.29: Travessas de Montagem BD 35.	45
Figura 5.30: Travessas Montagem BD 35.....	45
Figura 5.31: Travessas Montagem BD 35.....	45
Figura 5.32: Travessas Montagem BD 35.....	45
Figura 5.33: Travessas Montagem BD 35.....	45
Figura 5.34: Travessas Montagem BD 35.....	45
Figura 5.35: Montagem armação Lateral.	46
Figura 5.36: Montagem armação Lateral.	46
Figura 5.37: Colocação do cabo mensageiro.....	46
Figura 5.38: Colocação do cabo mensageiro.....	46
Figura 5.39: Colocação do cabo mensageiro.	47
Figura 5.40: Colocação do cabo mensageiro.....	47
Figura 5.41: Colocação de bobines de cabo.....	47
Figura 5.42: Característica do cabo.	47
Figura 5.43: Colocação de bobines de cabo.....	48

Figura 5.44: Colocação do cabo na bobine.....	48
Figura 5.45: Início da passagem cabos.	48
Figura 5.46: Sequência da passagem cabos.	48
Figura 5.47: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.48: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.49: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.50: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.51: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.52: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.53: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.54: Sequência da passagem cabos.	49
Figura 5.55: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.56: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.57: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.58: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.59: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.60: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.61: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.62: Sequência da passagem cabos.	50
Figura 5.63: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.64: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.65: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.66: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.67: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.68: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.69: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.70: Sequência da passagem cabos.	51
Figura 5.71: Sequência da passagem cabos.	52
Figura 5.72: Sequência da passagem cabos.	52
Figura 5.73: Sequência da passagem cabos.	52
Figura 5.74: Sequência da passagem cabos.	52
Figura 5.75: Sequência da passagem cabos.	52

Figura 5.76: Sequência da passagem cabos.	52
Figura 5.77: Sequência da passagem cabos.	52
Figura 5.78: Sequência da passagem cabos.	52
Figura 5.79: Sequência da passagem cabos.	53
Figura 5.80: Sequência da passagem cabos.	53
Figura 5.81: Sequência da colocação espaçadores.	53
Figura 5.82: Sequência da colocação espaçadores.	53
Figura 5.83: Sequência da colocação espaçadores.	54
Figura 5.84: Sequência da colocação espaçadores.	54
Figura 5.85: Sequência da colocação espaçadores.	54
Figura 5.86: Sequência da colocação espaçadores.	54
Figura 5.87: Sequência da colocação espaçadores.	54
Figura 5.88: Sequência da colocação espaçadores.	54
Figura 5.89: Execução de amarração.....	55
Figura 5.90: Execução de amarração.....	55
Figura 5.91: Execução de amarração.....	55
Figura 5.92: Execução de amarração.....	55
Figura 5.93: Execução de amarração.....	55
Figura 5.94: Execução de amarração	55
Figura 5.95: Execução de amarração.....	55
Figura 5.96: Execução de amarração.....	55
Figura 5.97: Amarração.....	56
Figura 5.98: Amarração.....	56
Figura 5.99: Amarração.....	56
Figura 5.100: Amarração.....	56
Figura 5.101: Amarração.....	56
Figura 5.102: Amarração.....	56
Figura 5.103: Amarração.....	57
Figura 5.104: Amarração.....	57
Figura 5.105: Amarração.....	57
Figura 5.106: Amarração.....	57
Figura 5.107: Amarração.....	57
Figura 5.108: Amarração.....	57

Figura 5.109: Amarração.....	57
Figura 5.110: Amarração.....	57
Figura 5.111: Amarração.....	58
Figura 5.112: Amarração.....	58
Figura 5.113: Amarração.....	58
Figura 5.114: Amarração.....	58
Figura 5.115: Amarração.....	58
Figura 5.116: Amarração.....	58
Figura 5.117: Amarração.....	58
Figura 5.118: Amarração.....	58
Figura 5.119: Amarração.....	59
Figura 5.120: Amarração.....	59
Figura 5.121: Amarração.....	59
Figura 5.122: Amarração.....	59
Figura 5.123: Amarração.....	59
Figura 5.124: Amarração.....	59
Figura 5.125: Ligação de condutores.	60
Figura 5.126: Ligação de condutores	60
Figura 5.127: Ligação de condutores.	60
Figura 5.128: Ligação de condutores.	60
Figura 5.129: Ligação de condutores.	60
Figura 5.130: Ligação de condutores.	60
Figura 5.131: Ligação de condutores.	60
Figura 5.132: Ligação de condutores.	60
Figura 5.133: Ligação de condutores.	61
Figura 5.134: Ligação de condutores.	61
Figura 5.135: Ligação de condutores.	61
Figura 5.136: Ligação de condutores.	61
Figura 5.137: Ligação de condutores.	61
Figura 5.138: Ligação de condutores.	61
Figura 5.139: Ligação de condutores.	61
Figura 5.140: Ligação de condutores.	61

Figura 5.141: Condutores com espaçadores.	62
Figura 5.142: Condutores com espaçadores.	62
Figura 5.143: Condutores com espaçadores.	62
Figura 5.144: Condutores com espaçadores.	62
Figura 5.145: Condutores com espaçadores.	62
Figura 5.146: Condutores com espaçadores.	62
Figura 5.147: Condutores com espaçadores.	63
Figura 5.148: Condutores com espaçadores.	63
Figura 5.149: Condutores com espaçadores.	63
Figura 5.150: Condutores com espaçadores.	63
Figura 5.151: Seccionador lado B.	63
Figura 5.152: Seccionador lado B.	63
Figura 5.153: Seccionador lado A.....	64
Figura 5.154: Seccionador lado A.....	64
Figura 5.155: Seccionador lado A.....	64
Figura 5.156: Seccionador lado A.....	64
Figura 5.157: Seccionador lado A.....	64
Figura 5.158: Seccionador lado A.....	64
Figura 5.159: Seccionador loteamento	65
Figura 5.160: Seccionador loteamento	65
Figura 5.161: Seccionador loteamento	65
Figura 5.162: Seccionador loteamento	65
Figura 5.163: Seccionador loteamento	65
Figura 5.164: Seccionador loteamento	65
Figura 5.165: Seccionador loteamento	65
Figura 5.166: Seccionador loteamento	65
Figura 5.167: Apoios MT com rede BT.	66
Figura 5.168: Apoios MT com rede BT.	66
Figura 5.169: Apoios MT com rede BT.	66
Figura 5.170: Apoios MT com rede BT.	66
Figura 5.171: Apoios MT com rede BT.	66
Figura 5.172: Apoios MT com rede BT.	66
Figura 5.173: Apoios MT com rede BT.	67

Figura 5.174: Apoios MT com rede BT.	67
Figura AIII.1: Piquetagem e numeração dos apoios [17].	94
Figura AIII.2: Projeto em SIT [17].	96
Figura AIII.3: Detalhe em SIT [17].	97
Figura AIII.4: Fundações de apoio 1600/540 14 [17].	98
Figura AIII.5: Fundações de apoio 600/250 14 [17].	99

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 3:1: Resultados de serviço durante 3 anos no sistema de distribuição aérea [10].	19
Tabela 4:1: Características do espaçador RTL-15 [17].	32
Tabela 6:1: Estudo de investimento rede compacta (<i>Spacer Cable</i>).	70
Tabela 6:2: Estudo de investimento linha aérea MT convencional.	73
Tabela 6:3: Estudo de investimento linha subterrânea de MT.	76
Tabela 6:4: Estudo de investimento.	78
Tabela 6:5: Quadro resumo comparação cenários.	78
Tabela 6:6: Quadro resumo comparação cenários.	79
Tabela AI:1: Cálculo mecânico tensor [17].	88
Tabela AI:2: Tabela de flechas de montagem (m) [17].	90
Tabela AI:3: Tração de montagem (daN) [17].	90
Tabela AI:4: Flechas máximas (50C°) [17].	90
Tabela AIII:1: Força do vento sobre o conjunto (daN/m) [17].	93

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

Sigla/Acrónimo	Significado
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
DEINS 15	Isolador de Amarração tipo DEINS para 15 kV
E-Redes	Distribuição de Energia Elétrica em Portugal (antiga EDP Distribuição)
EDP	Energias de Portugal
HPI 15	Isolador Rígido tipo HPI para 15 kV
IP	Iluminação Pública
MT	Média Tensão
ROI	<i>Return on Investment</i> (Retorno sobre o Investimento)
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
RSLET	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas
TIE	Tempo de Interrupção Equivalente
XLPE	<i>Cross-linked Polyethylene</i> (Polietileno Reticulado)
ZPE	Zona de Proteção Especial

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
c	Coeficiente de forma
E	Módulo de elasticidade
q	Pressão dinâmica do vento
s	Área de superfície batida pelo vento (m ²)
T_i	Temperatura no estado i
T_k	Temperatura no estado k
w	Peso específico próprio
A	Coeficiente de redução ou dilatação linear
Σ	Secção real do condutor (mm ²)

1. INTRODUÇÃO

O presente Trabalho de Projeto, intitulado *Análise Técnico-Económica e Avaliação da Sustentabilidade da Integração de Linhas Aéreas Compactas em Redes de Distribuição de Média Tensão: Estudo de Caso em Mangualde*, foi desenvolvido no âmbito da obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica, na especialização em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, no ano letivo 2023/2024.

1.1 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, a recorrência de incêndios rurais em Portugal, com impactos devastadores e perda de vidas humanas, tem gerado um crescente sentimento de insegurança nas populações que vivem próximas a zonas florestais densas e mal geridas [1].

Neste contexto, várias instituições especializadas analisaram as causas destes incêndios, muitos deles com origem em infraestruturas elétricas, propondo medidas preventivas e melhorias técnicas [2]. Com base nestas análises, esta investigação pretende contribuir para o desenvolvimento de soluções eficazes de mitigação do risco de incêndio, promovendo maior segurança de pessoas e bens, bem como a preservação do meio ambiente.

As redes elétricas aéreas convencionais, especialmente com condutores nus, apresentam um risco acrescido em ambientes com vegetação seca e densa, principalmente, quando não é assegurada a devida manutenção. Neste cenário, a utilização de redes compactas com condutores revestidos surge como uma alternativa viável, permitindo reduzir significativamente a probabilidade de ignição e a propagação do fogo, além de responder a exigências crescentes em termos de segurança ambiental e fiabilidade da rede [3].

1.2 OBJETIVO

Este trabalho visa avaliar as vantagens e desvantagens da tecnologia *Spacer Cable*, com foco na aplicação realizada na obra “Linha de 15 kV de interligação Mangualde I – Mangualde Gare”. Partindo da experiência já consolidada em redes de baixa tensão, onde a substituição de condutores nus por condutores revestidos tem demonstrado múltiplos benefícios, pretende-se analisar se esta abordagem pode ser estendida com sucesso às redes de média tensão.

A análise inclui aspetos técnicos, económicos, ambientais e operacionais, procurando demonstrar o potencial desta solução para aumentar a resiliência da rede elétrica em

zonas de risco e promover a sustentabilidade das infraestruturas de distribuição de energia.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O relatório encontra-se estruturado em sete capítulos, concebidos para proporcionar uma análise pormenorizada e sistemática da tecnologia *Spacer Cable* e da sua aplicação prática:

Capítulo 1 — Introdução: contextualiza o tema, apresentando a motivação do estudo, os objetivos definidos e a organização metodológica do relatório do Trabalho de Projeto;

Capítulo 2 — História da Empresa Hendrix: traça a origem da tecnologia em análise e o percurso histórico da empresa Hendrix, responsável pelo desenvolvimento do sistema *Spacer Cable*;

Capítulo 3 — Tecnologia *Spacer Cable*: explora os princípios técnicos subjacentes à tecnologia *Spacer Cable*, evidenciando as suas vantagens funcionais e os impactos ambientais e operacionais associados;

Capítulo 4 — Estudo de Caso: pormenoriza a implementação da obra “LN 15 kV Mangualde I – Mangualde Gare”, incluindo especificações técnicas, seleção de materiais e procedimentos construtivos;

Capítulo 5 — Acompanhamento Técnico da Evolução da Obra: apresenta uma sistematização fotográfica do progresso da obra, documentando as fases críticas da execução e evidenciando o cumprimento dos critérios técnicos;

Capítulo 6 — Análise Económica: realiza uma análise comparativa dos custos associados às diferentes soluções de rede — compacta, aérea convencional e subterrânea —, com enfoque na viabilidade financeira;

Capítulo 7 — Conclusões: sintetiza os resultados alcançados, discute as limitações do estudo e propõe diretrizes para futuras investigações e aplicações práticas.

As figuras que não apresentam referência bibliográfica explícita resultam de registos fotográficos obtidos durante o acompanhamento técnico da obra ou foram desenvolvidas no decurso da elaboração do presente trabalho. Em determinados casos, as imagens foram obtidas em colaboração com membros da equipa técnica envolvida na execução da obra, configurando, assim, material de coautoria.

2. HISTÓRIA DA EMPRESA HENDRIX

2.1 Início da tecnologia em análise

O sistema *Spacer Cable* baseia-se na utilização de condutores isolados, mantidos afastados por espaçadores, fixados a intervalos regulares num cabo mensageiro neutro autoportante, que simultaneamente suporta mecanicamente a linha e funciona como condutor de retorno. Esta configuração compacta permite reduzir o corredor de servidão, revelando-se especialmente vantajosa em locais com limitações espaciais ou com requisitos ambientais rigorosos.

A empresa *Hendrix* foi responsável pelo desenvolvimento da tecnologia utilizada na obra “Linhas Aéreas de Média Tensão Isolada com *Spacer Cable*”, realizada em Mangualde. Importa salientar que, nos Estados Unidos da América, os apoios utilizados são, predominantemente, em madeira, ao passo que em Portugal se recorre, maioritariamente, a apoios de betão [4]. Esta diferença substancial no tipo de suportes inviabiliza a aplicação direta dos critérios de dimensionamento norte-americanos à realidade portuguesa, pelo que os mesmos não serão abordados neste estudo.

A sustentação mecânica da rede compacta é assegurada pelo cabo mensageiro, que é fixado aos postes através de braços metálicos. Os cabos de fase, revestidos, são suportados por espaçadores poliméricos em formato losangular, colocados ao longo dos vãos. Estes espaçadores têm como função manter a separação elétrica entre as fases, garantindo simultaneamente a compactação da rede em configuração triangular. Assim, o esforço mecânico principal recai sobre o cabo mensageiro, já que os condutores cobertos, devido ao reduzido espaçamento entre espaçadores, requerem trações de montagem significativamente inferiores [5]. Nas Figuras 2.1 a 2.3, mostra-se o tipo de cabos, a montagem em apoios de madeira e os componentes utilizados pela tecnologia *Spacer Cable*, respetivamente [6].

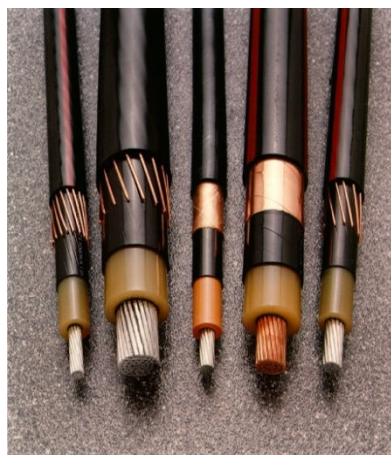


Figura 2.1: Tipos de Cabos 15 kV até 45 kV [6].

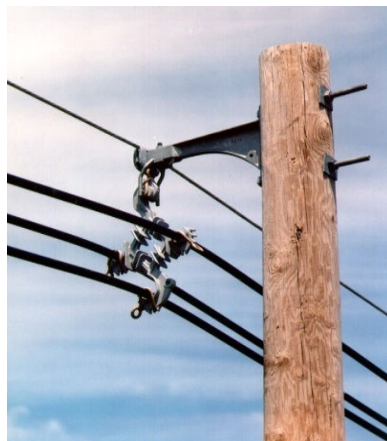


Figura 2.2: Apoio de madeira com o sistema *Spacer Cable* [6].



Figura 2.3: Componentes do *Spacer Cable* [6].

2.2 História da empresa *Hendrix Wire & Cable, Inc.*

A *Hendrix Wire & Cable, Inc.* foi fundada em 1951 por Bill Hendrix, com o objetivo inicial de desenvolver e comercializar um sistema de distribuição de energia inovador, baseado em espaçadores de cabos. Este sistema foi concebido como resposta aos problemas de fiabilidade enfrentados pelas companhias elétricas, nomeadamente interrupções causadas por fenómenos naturais ou interações com vegetação e animais [6].

O *Spacer Cable System*, concebido por *Hendrix*, demonstrou ser particularmente eficaz na mitigação de interrupções causadas por intempéries, reduzindo também a necessidade de podas regulares. A robustez do sistema permitiu a sua aplicação em ambientes agressivos e zonas de difícil acesso, onde a instalação de linhas convencionais seria inviável ou dispendiosa [7]. O desenvolvimento do sistema assentou numa lógica de engenharia orientada para a continuidade de serviço, promovendo uma maior resiliência face a ocorrências ambientais imprevistas.

A primeira aplicação experimental da tecnologia *Spacer Cable* ocorreu nos Estados Unidos da América, sendo rapidamente adotada por diversas entidades gestoras de redes elétricas, face à sua eficácia na melhoria da continuidade de serviço e na redução dos custos de manutenção associados a avarias provocadas por curtos-circuitos e por queda de ramos sobre os condutores. Ao longo das décadas subsequentes, a tecnologia foi sendo progressivamente aperfeiçoada nos seus domínios mecânico, elétrico e ambiental, permitindo a sua adaptação a diferentes classes de tensão, nomeadamente 15 kV, 25 kV e 35 kV.

Durante a década de 1990, o sistema iniciou o seu processo de internacionalização, com implementações em países como o Brasil, o Canadá e a Austrália, tendo mais recentemente sido introduzido em vários países europeus. Esta expansão foi acompanhada por um contínuo desenvolvimento tecnológico, sustentado pelos avanços nos materiais poliméricos, nas técnicas de extrusão e na consolidação do enquadramento normativo internacional, com particular ênfase nas normas IEC e IEEE aplicáveis a redes de média tensão [6].

Com o amadurecimento da tecnologia, os benefícios operacionais tornaram-se evidentes: a redução dos custos de exploração, a melhoria dos indicadores de continuidade de serviço e a viabilidade técnica de instalação de vãos significativamente mais longos, mesmo em ambientes complexos. Estes fatores contribuíram decisivamente para a ampla adoção da tecnologia nos Estados Unidos da América e para a sua posterior disseminação em outros contextos, como o europeu, onde começou a ser implementada com as adaptações necessárias às condições técnicas, regulamentares e ambientais locais.

3. TECNOLOGIA *SPACER CABLE*

3.1 Introdução à tecnologia

A tecnologia *Spacer Cable* apresenta um conceito altamente fiável para a distribuição de energia elétrica em Média Tensão (MT). Os seus condutores são protegidos por uma camada espessa de isolamento, sem blindagem eletrostática, e são sustentados por um cabo de alta resistência — o cabo mensageiro. A separação elétrica entre as fases é assegurada por espaçadores de isolamento, instalados a cada dez metros ao longo dos vãos. A composição típica do sistema *Spacer Cable* inclui [6]:

- Três condutores de fase, sustentados por espaçadores e apoiados no cabo mensageiro;
- Elevada resistência mecânica, capaz de suportar condições climáticas severas;
- Capacidade de evitar falhas por contacto entre fases ou entre fase e solo, árvores ou animais.
- Esta configuração permite uma instalação mais compacta e segura, especialmente adequada para áreas urbanas, industriais ou florestais com limitações de espaço e risco de contacto com a vegetação.

Conforme se pode constatar através da Figura 3.1, o sistema *Spacer Cable* é constituído por um conjunto de elementos fundamentais à instalação de linhas aéreas compactas, cuja interação assegura a integridade elétrica e mecânica do sistema.

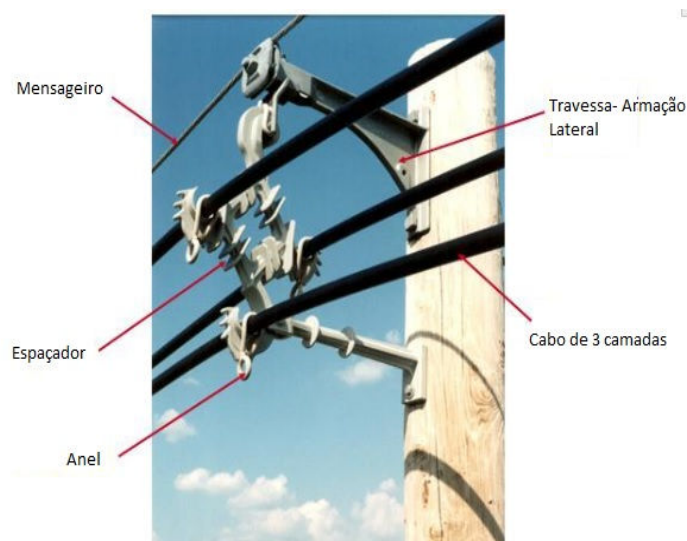


Figura 3.1: Componentes do *Spacer Cable* [6].

3.2 Tipos de espaçadores: losangular e vertical

O espaçador losangular, fabricado em material polimérico, tem como principal função garantir a sustentação dos condutores ao longo do vão, impedindo a sua queda em caso de rotura. Este modelo é utilizado em vãos lineares, mantendo os cabos dispostos em triângulo, conforme se pode observar na Figura 3.2 [8].

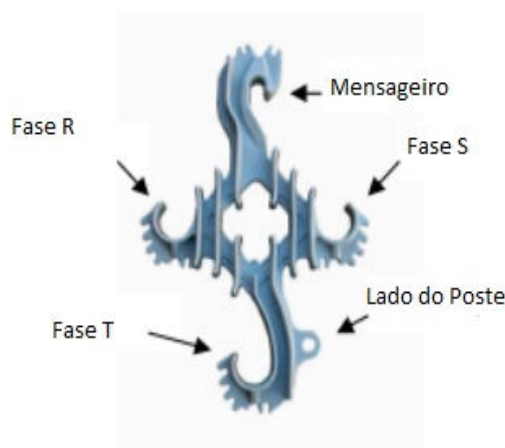


Figura 3.2: Espaçador losangular [8].

O espaçador vertical, também polimérico, é utilizado em cruzamentos ou mudanças de direção, onde é necessário manter a estabilidade dos condutores em diferentes configurações geométricas, conforme se mostra na Figura 3.3 [8].

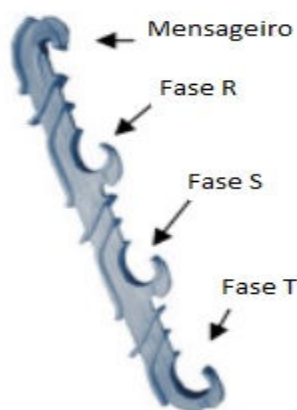


Figura 3.3: Espaçador vertical [8].

Os espaçadores losangulares e verticais constituem duas soluções diferenciadas para o posicionamento dos condutores em linhas aéreas isoladas, cada uma com características técnicas específicas que as tornam mais adequadas consoante o enquadramento geométrico e funcional da instalação. Os espaçadores losangulares, com configuração fixa em triângulo equilátero, são a solução preferencial para a maioria dos vãos retilíneos entre apoios. Fabricados em materiais poliméricos de elevada resistência mecânica e estabilidade ambiental, estes elementos asseguram o distanciamento adequado entre fases, prevenindo contactos acidentais e reduzindo significativamente o risco de curto-circuito.

A sua geometria contribui também para a minimização dos efeitos de galope induzidos pelo vento, conferindo estabilidade adicional à linha em condições climáticas adversas. De instalação simples e custo reduzido, são geralmente utilizados em vãos até 150 metros, onde as solicitações mecânicas são simétricas e bem distribuídas.

Em contraste, os espaçadores verticais oferecem maior versatilidade geométrica, sendo especialmente concebidos para situações singulares como cruzamentos com outras infraestruturas, mudanças de direção ou ligações a postos de transformação. A estrutura vertical em material compósito permite acomodar ângulos de deflexão variáveis e absorver esforços multidirecionais, assegurando a estabilidade da linha em pontos onde a geometria do traçado é irregular. Embora apresentem um custo unitário superior e exigências de instalação mais rigorosas, a sua aplicação é tecnicamente imprescindível em segmentos críticos, onde a utilização de espaçadores convencionais não garantiria a integridade da instalação [8].

Em contexto de projeto, a configuração mais eficaz resulta da combinação estratégica de ambos os tipos de espaçadores: os losangulares são predominantemente utilizados nos vãos retilíneos, enquanto os verticais são aplicados pontualmente em locais que exigem maior adaptabilidade geométrica. Esta abordagem integrada permite otimizar o desempenho técnico e económico da linha, assegurando simultaneamente a fiabilidade elétrica e a robustez mecânica da solução implementada. A seleção adequada deve, portanto, ser realizada com base numa análise detalhada das características de cada troço, garantindo a conformidade com os requisitos operacionais e regulamentares aplicáveis.

Na figura 3.4, é possível observar-se exemplos de aplicação de ambos os espaçadores acima mencionados.



Figura 3.4: Uso de espaçadores em cruzamentos [8].

A aplicação adequada destes espaçadores assegura a separação entre fases e evita curtos-circuitos, mesmo em condições de forte ação do vento ou contacto com objetos externos.

3.3 Diferença nas intervenções de poda

As redes *Spacer Cable* oferecem uma vantagem significativa em relação às redes convencionais com cabo nu no que respeita à gestão da vegetação. A menor distância de segurança exigida entre os cabos e a vegetação permite reduzir drasticamente a área sujeita a poda. Este aspeto é particularmente relevante em zonas de proteção ambiental ou parques naturais, onde a intervenção humana deve ser minimizada.

As figuras comparativas (Figuras 3.5 a 3.8), demonstram claramente a diferença de impacto entre os dois sistemas: enquanto as linhas convencionais exigem cortes profundos nas copas das árvores, a rede *Spacer Cable* permite uma silvicultura de conservação menos intrusiva, promovendo a sustentabilidade do ecossistema e a preservação de espécies autóctones de elevado valor ecológico como o sobreiro, emblemática da flora nacional.

Além disso, esta abordagem reduz custos operacionais e o risco de ignição por contacto com ramos, contribuindo para a prevenção de incêndios florestais [3].

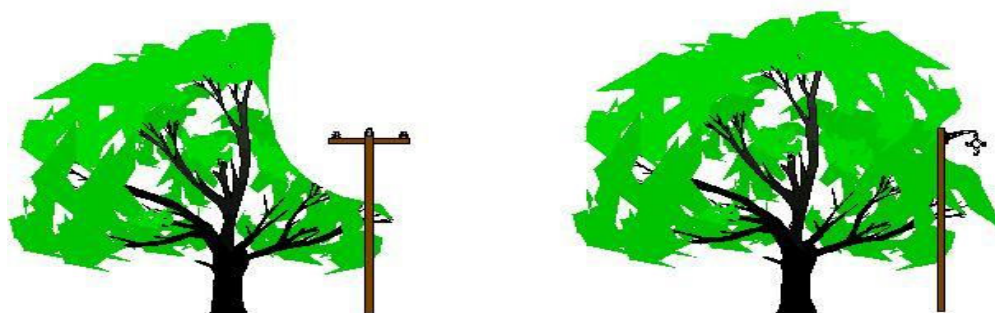


Figura 3.5: Diferença entre a linha tradicional e a tecnologia *Spacer Cable* [6].

Na Figura 3.5, observa-se que a rede spacer cable exige uma área livre inferior, enquanto a rede de linha nua impõe a necessidade de intervenções mais drásticas, como podas e decotes, para garantir o seu funcionamento adequado.



Figura 3.6: Linha Tradicional [6].



Figura 3.7: Tecnologia *Spacer Cable* [6].

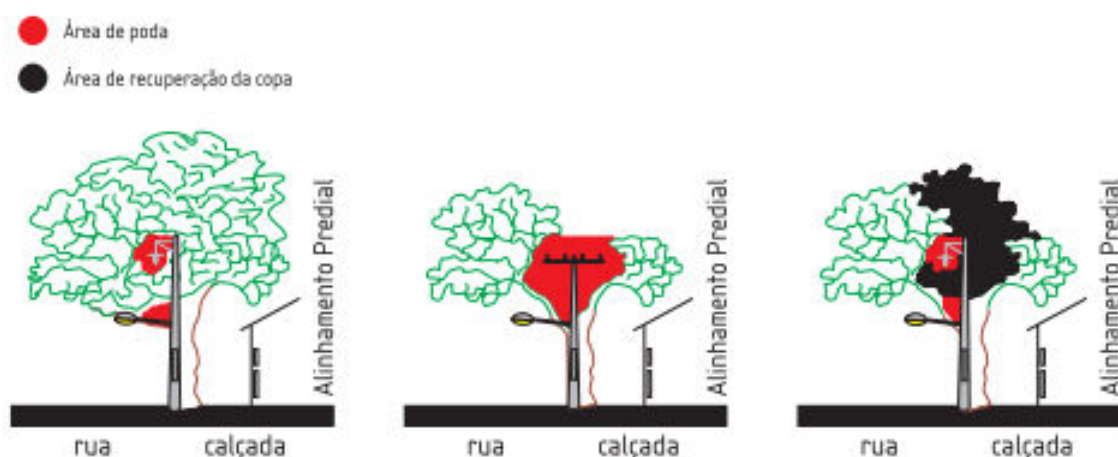


Figura 3.8: Diferença na possível recuperação das copas [8].

A implementação de revestimentos nos componentes sob tensão oferece uma solução eficiente para a redução dos custos relacionados com a limpeza e manutenção da vegetação nas áreas adjacentes, o que, por sua vez, contribui para a mitigação do risco de incêndios originados por falhas nos cabos de eletricidade [9].



Figura 3.9: Redução e proteção das podas consideradas de interesse público [6].

Através da silvicultura de conservação, que se caracteriza por ser menos invasiva, é possível reduzir a extensão das podas. Esta prática reveste-se de particular importância na proteção de várias espécies, como os sobreiros, cuja função ecológica é de elevada relevância. Adicionalmente, ao aumentar o intervalo entre as podas, proporciona-se às árvores um período mais longo para um crescimento saudável. Tais características contribuem para a minimização dos danos provocados por intervenções mais frequentes, garantindo, assim, a integridade das árvores ao longo do tempo e promovendo a sua sustentabilidade e importância ecológica.

A aplicação da tecnologia *Spacer Cable* oferece benefícios notáveis na prevenção de interrupções no fornecimento de energia elétrica, causadas por fenómenos naturais do quotidiano, como a presença de aves, por exemplo, as cegonhas que nidificam em postes, ou pela ação do vento, que pode deslocar objetos estranhos capazes de criar uma conexão fase/fase [10].

As linhas elétricas aéreas tradicionais, especialmente em zonas ecologicamente sensíveis, representam um risco significativo para a avifauna, devido à possibilidade de colisões e de eletrocussões, exigindo a implementação de medidas técnicas de mitigação que promovam a compatibilização entre a infraestrutura energética e a conservação da biodiversidade [11].

A aplicação de dispositivos de proteção específicos, como espirais de sinalização e coberturas isolantes, tem-se revelado fundamental para reduzir a mortalidade de aves em linhas de média e alta tensão, contribuindo diretamente para a preservação de espécies protegidas e para o cumprimento dos objetivos de sustentabilidade ambiental [12].

Nas Figuras 3.10 e 3.11, mostra-se apoios de linhas elétricas de Média Tensão em cabo nu onde as cegonhas nidificaram no topo das estruturas, evidenciando a vulnerabilidade da avifauna a estas infraestruturas e a necessidade de medidas de proteção adequadas.



Figura 3.10: Linha de Média Tensão – cabo nu com ninho de cegonha.

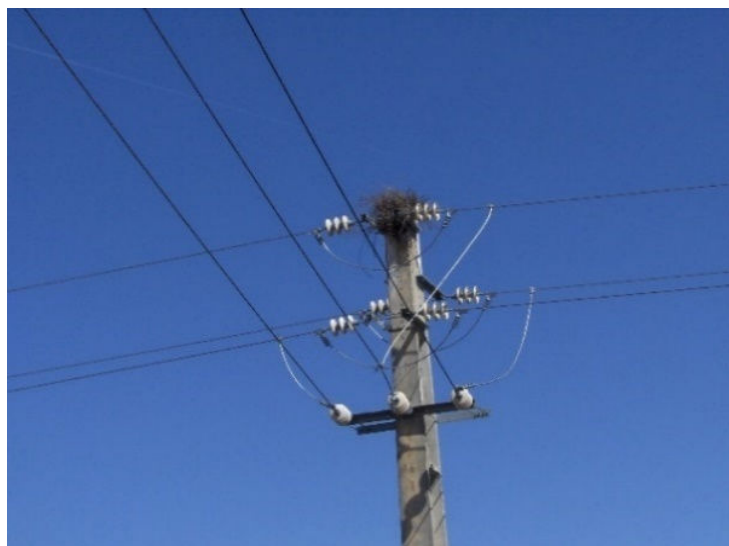


Figura 3.11: Linha de Média Tensão – cabo nu com ninho de cegonha.

Deve-se salientar que o contacto accidental entre aves e as linhas de transporte de energia eléctrica pode originar consequências adversas tanto para a avifauna como para a integridade das infraestruturas, conforme ilustrado na Figura 3.12.



Figura 3.12: Consequências do contacto direto de aves com a linha de MT.

3.4 Interação com a avifauna e protocolo E-Redes

O protocolo apresentado pela E-Redes, relativo à avifauna, tem como principal objetivo [13]:

- Ampliar o conhecimento sobre os efeitos das linhas aéreas de alta e média tensão na avifauna, com especial ênfase nas áreas classificadas e que albergam espécies de aves de reconhecido valor ambiental;

- Apoiar a aplicação do Índice de Perigosidade para a avifauna em todos os traçados de linhas aéreas que atravessem áreas classificadas ou que possuam espécies de aves de importância ambiental;
- Monitorizar a eficácia da utilização de novas tecnologias destinadas à redução dos impactes negativos sobre a avifauna em linhas que tenham sido corrigidas, sinalizadas ou recentemente instaladas;
- Assegurar o cumprimento das recomendações técnicas destinadas a minimizar os danos causados à avifauna por novas linhas, ou por linhas já existentes, em conformidade com o estipulado na Diretiva Aves (79/409/CEE);
- Realizar estudos mais aprofundados sobre os efeitos das linhas aéreas de média tensão em contextos específicos, nomeadamente no que respeita às populações de abetarda (*Otis tarda*) e sisão (*Tetrax tetrax*) na Zona de Proteção Especial (ZPE) de Castro Verde;
- Expandir o conhecimento sobre a dispersão de aves prioritárias.

Tomando como exemplo a freguesia de Ciborro, localizada no concelho de Montemor-o-Novo, foi necessário proceder à abertura dos arcos elétricos do Posto de Transformação (PT), com o objetivo de evitar danos tanto na rede elétrica como nas cegonhas. O Posto de Transformação foi, assim, desligado preventivamente, permitindo a continuidade da nidificação das aves em segurança. Nas Figuras 3.13 e 3.14, mostram o ninho de cegonha no topo da estrutura de um PT aéreo.



Figura 3.13: Ninho de cegonha em Ciborro.



Figura 3.14: Ninho cegonha em Ciborro.

O atravessamento de áreas florestais por linhas de transporte de energia elétrica constitui um fator de risco significativo, uma vez que, na ausência de uma manutenção regular da vegetação envolvente e das próprias infraestruturas, ou devido a contactos diretos resultantes de colisões de aves com as linhas, o risco de ignição aumenta substancialmente, sobretudo em zonas de difícil acesso e com elevada carga combustível [1]. Na Figura 3.15, o contacto direto entre linhas, por objetos estranhos.



Figura 3.15: Contacto direto entre linhas, por objetos estranhos.

De acordo com o Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, o incêndio de Pedrógão Grande, ocorrido em 2017, apresenta indícios de que uma linha de Média Tensão terá gerado descargas elétricas, provocando ignições que deram origem a dois focos de incêndio, separados por um intervalo de aproximadamente uma hora e meia [14].

O mesmo relatório refere que “as faixas de proteção da rede elétrica de média tensão, gerida pela E-Redes, não se encontram devidamente cuidadas” e que “a falta de manutenção destas faixas faz com que existam, ao longo dos muitos quilómetros de linhas que percorrem o território e abastecem de energia elétrica, pontos, ou mesmo zonas, em que a distância entre os cabos e a vegetação é inferior à requerida para garantir a segurança, principalmente em dias de vento, que provocam o movimento dos cabos e da vegetação, podendo originar descargas elétricas e causar incêndios” [14].

As imagens incluídas no relatório do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais evidenciam a reduzida distância entre as linhas da E-Redes e a vegetação nos locais onde se terá iniciado grande parte do incêndio de Pedrógão Grande, um evento que ficou marcado pela sua extrema violência e pela perda de mais de 60 vidas humanas.



Figura 3.16: Foto da primeira ignição do incêndio de Pedrógão Grande [14].



Figura 3.17: Vista aérea do local do incêndio, onde a circunferência a amarelo assinala o ponto de contacto provável entre a linha e a vegetação [14].

Segundo o Centro de Estudos, o incêndio de maior severidade teve origem nas ignições registadas nas localidades de Escalos Fundeiros e de Regadas. Na sequência

de diversos estudos realizados, foi emitido um parecer técnico que conclui que as ignições terão sido provocadas por pontos de contacto entre a vegetação e uma linha elétrica de Média Tensão [14].

O mesmo parecer evidencia, adicionalmente, a existência de uma gestão deficiente de combustíveis na faixa de proteção da referida linha, cuja responsabilidade é atribuída à E-Redes. Estes resultados corroboram a constatação de que a inadequada gestão de combustíveis nas faixas de proteção das infraestruturas elétricas constitui um fator determinante no aumento do risco de ocorrência e propagação de incêndios florestais.

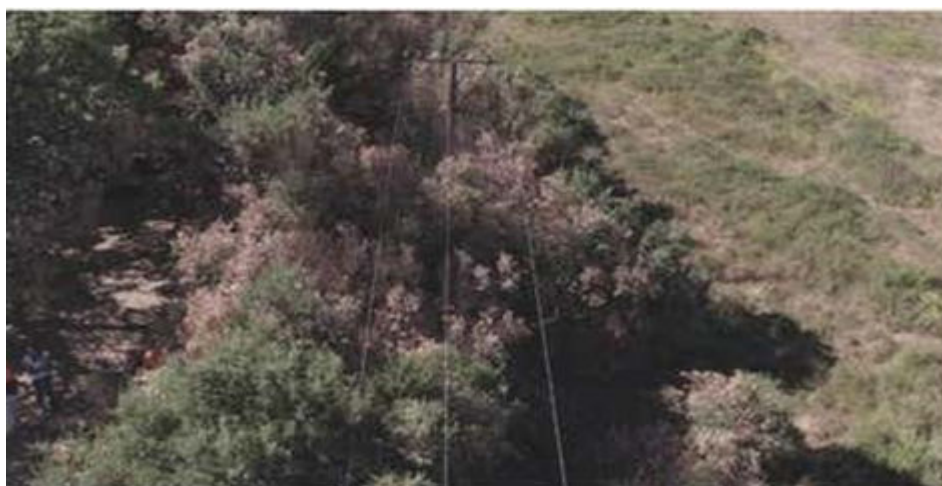


Figura 3.18: Imagem recolhida por um drone dos sobreiros, onde existe uma grande proximidade entre a linha e a ramagem, da qual se terá iniciado o incêndio em Regadas [14].

Não obstante a eficácia desta medida estar intrinsecamente condicionada por diversos fatores de ordem contextual, entende-se que a adoção de redes elétricas compactas, conjugada com uma gestão criteriosa das faixas de servidão, poderá representar uma solução complementar de mitigação do risco de incêndio. Esta estratégia revela-se particularmente pertinente em contextos territoriais marcados por uma elevada acumulação de carga combustível e por condições de défice hídrico persistente, fatores que potenciam a ignição e a rápida propagação de incêndios rurais [3].

3.5 Aplicações Industriais

Em ambientes industriais, onde o espaço é limitado e os requisitos de segurança são elevados, a tecnologia *Spacer Cable* destaca-se pela sua configuração compacta, elevada robustez e possibilidade de instalação em vãos mais longos, reduzindo o número de pontos de apoio necessários. Esta característica é particularmente vantajosa em áreas com restrições de espaço, como zonas de produção intensiva, armazéns logísticos ou parques industriais com infraestruturas específicas. Na Figura 3.19, apresenta-se a utilização da tecnologia numa Zona Industrial [6].



Figura 3.19: Utilização em Zona Industrial [6].

A sua utilização permite ainda a convivência de múltiplos circuitos em estruturas comuns, simplificando a infraestrutura elétrica em ambientes complexos e permitindo uma gestão mais eficiente [10].

3.6 Análise das causas de interrupções

Na Tabela 3.1, apresenta-se uma comparação entre as causas de interrupção imprevistas do cabo nu com o cabo revestido e cabo nu com sistema *Hendrix* [10].

Tabela 3.1: Resultados de serviço durante 3 anos no sistema de distribuição aérea [10].

Causas de interrupção	Cabo nu	Cabo revestido	Redução	Sistema Hendrix	Redução
Relacionada com árvores	17,6	6,6	62%	1,8	90%
Animais	12,1	5,9	51%	2,9	76%
Descargas atmosféricas	3,4	1,9	44%	1,0	71%
Desconhecidas	5,9	2,6	56%	1,0	83%
Outras	11,3	4,6	59%	5,9	48%
Total	50,3	21,6	57%	12,6	75%

Durante um período de três anos, o sistema de distribuição aérea de uma empresa de energia americana, utilizando a tecnologia Hendrix, saiu de serviço. Com base nesta informação e nos dados apresentados na tabela acima, é possível observar uma redução significativa nas causas de interrupção entre a rede de cabo nu e a rede

Hendrix. No que se refere às interrupções causadas por árvores, a diminuição foi particularmente expressiva, atingindo uma redução de 90%.

O estudo comparativo, com duração de três anos, entre as redes de cabo nu e o sistema Hendrix, revela que, enquanto a rede de cabo nu apresenta uma redução global de 57%, o sistema Hendrix regista uma redução final de 75%. Assim, é legítimo concluir que a utilização do sistema Hendrix permite uma maior fiabilidade e robustez na rede, minimizando os constrangimentos para o cliente e garantindo uma melhoria na qualidade do fornecimento de energia elétrica.

3.7 Análise Comparativa para Travessias Elétricas

A empresa Hendrix sustenta que a utilização da sua tecnologia poderá revelar-se mais económica em zonas de carácter florestal onde os custos associados à construção e manutenção das infraestruturas convencionais de distribuição de energia elétrica tendem a ser significativamente superiores. Importa salientar que os valores e a moeda apresentados nas análises seguintes são expressos em dólares norte-americanos, dado que o estudo foi realizado nos Estados Unidos da América. Por conseguinte, eventuais extrapolações ou comparações com o contexto europeu ou nacional deverão considerar fatores como custos locais de mão de obra, regulamentação aplicável, taxas de conversão monetária e características específicas da topografia e vegetação.

A Figura 3.20 apresenta uma rede convencional com cabo nu instalada em área florestal, enquanto a Figura 3.21 demonstra a aplicação da tecnologia *Spacer Cable* no mesmo tipo de ambiente.

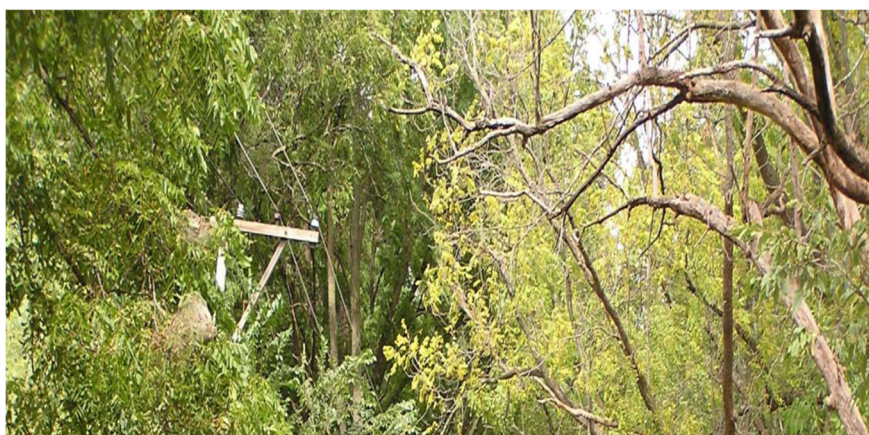


Figura 3.20: Rede com cabo nu em floresta [6].



Figura 3.21: Rede com cabo *spacer* em floresta [6].

No primeiro caso em análise, trata-se de uma travessia situada em zona florestal protegida, com grande relevância para as comunidades locais. De acordo com o estudo realizado pela Hendrix, foram propostas três alternativas para a execução desta travessia, as quais variam significativamente em termos de custo e impacto ambiental:

Opção 1: Instalação de cabo nu, com um custo estimado de 2 milhões de dólares. Embora esta solução permita uma instalação técnica mais simples, ela implica o abate de um número substancial de árvores, o que gera uma forte oposição da população local devido ao impacto ambiental direto. Este fator evidencia a importância de considerar as repercussões sociais e ecológicas de soluções que possam resultar em danos ao património natural protegido;

Opção 2: Poda de árvores, com um custo estimado de 600 mil dólares. Embora esta alternativa seja menos dispendiosa, trata-se de uma solução de curto prazo, com a poda das árvores a gerar resistência pública, ainda que de forma mais moderada. A sua implementação não resolve a questão da preservação do ecossistema a longo prazo, uma vez que as árvores continuarão a crescer, exigindo novas intervenções, o que a torna menos sustentável em termos ambientais;

Opção 3: Utilização de cabo espaçador, com custo total inferior a 500 mil dólares. Esta solução é a mais económica e, ao mesmo tempo, apresenta o menor impacto ambiental, uma vez que não exige intervenções significativas na vegetação. O baixo custo e a minimização da interferência com o ecossistema resultam numa maior aceitação por parte da comunidade local, favorecendo uma solução que, além de tecnicamente eficaz, promove boas relações-públicas e sociais.

Após a consulta às populações locais e a análise técnica dos impactos de cada solução, optou-se pela implementação da rede compacta. Esta opção não só se revelou vantajosa do ponto de vista económico, devido ao custo reduzido, mas também permitiu atender às necessidades ambientais e sociais, destacando-se como uma estratégia eficiente e integrada para a mitigação de impactos.

No segundo caso em análise, a travessia sobre um lago foi igualmente abordada pela Hendrix com a apresentação de três alternativas, que foram comparadas em termos de viabilidade técnica e custos associados:

Opção 1: Instalação de cabo submarino, com um orçamento de 1 milhão de dólares. Esta solução, embora viável do ponto de vista técnico, apresenta um custo elevado, tornando-a menos atraente em comparação com as alternativas mais económicas. Além disso, o impacto ambiental do processo de instalação de cabos submarinos deve ser cuidadosamente avaliado, dado que pode interferir com ecossistemas aquáticos delicados;

Opção 2: Construção de infraestrutura ao redor da costa, com um orçamento de 800 mil dólares. Embora mais acessível que a instalação de cabo submarino, esta solução exige uma intervenção significativa nas margens do lago, o que pode afetar o ecossistema local e a paisagem natural. A análise deste impacto torna a solução menos preferencial, especialmente em áreas sensíveis do ponto de vista ambiental;

Opção 3: Utilização de cabo espaçador com uma extensão de 1.600 pés, com um orçamento estimado em 75 mil dólares. Esta alternativa apresenta o menor custo e uma implementação técnica simples, além de gerar um impacto ambiental reduzido. A solução também se destaca pela sua capacidade de reduzir o risco de danos ambientais, sendo, portanto, a mais adequada em termos de sustentabilidade e custo-benefício.

Em ambos os casos, a rede compacta surge como a solução mais vantajosa, não apenas devido ao seu custo inferior, mas também pela sua capacidade de minimizar impactos ambientais e promover boas relações com as comunidades locais. A escolha desta tecnologia reflete uma abordagem estratégica que alia eficiência técnica e sustentabilidade ambiental, constituindo uma solução robusta para os desafios atuais da gestão de infraestruturas elétricas em zonas sensíveis.

A Figura 3.22 apresenta a travessia de um lago utilizando a tecnologia em análise, demonstrando a sua aplicabilidade em cenários geográficos complexos [10]. Em função das especificidades de cada projeto, particularmente em contextos de limitada disponibilidade de espaço, como zonas protegidas com densa cobertura arbórea, travessias de rios ou lagos, esta solução pode assegurar a disponibilização de recursos técnicos, sociais e ambientais diferenciados, em comparação com os recursos oferecidos pela rede convencional.

Em síntese, tendo em conta as particularidades de cada projeto, especialmente em contextos com restrições espaciais significativas a tecnologia *Spacer Cable* pode revelar-se bastante vantajosa. Para além de responder eficazmente aos desafios de implantação física, permite mobilizar um conjunto de recursos técnicos, sociais e ambientais diferenciados, que não estão, normalmente, disponíveis ou são menos eficazes nas abordagens tradicionais de projeto e exploração das redes de distribuição de energia elétrica.

Entre os benefícios destacam-se a redução do impacto ambiental, o menor grau de intrusão em ecossistemas sensíveis, a flexibilidade na adaptação a obstáculos naturais e, em alguns casos, a melhoria da aceitação social, sobretudo quando se pretende minimizar intervenções em áreas de elevado valor ecológico ou paisagístico. Esta abordagem poderá, assim, representar uma mais-valia em termos de sustentabilidade e viabilidade técnica, face às limitações impostas por infraestruturas tradicionais.



Figura 3.22: Travessia de um lago [10].

4. ESTUDO DE CASO: OBRA “LN 15 kV DE INTERLIGAÇÃO – MANGUALDE I - MANGUALDE GARE” DESENVOLVIDA PELA EDP DISTRIBUIÇÃO

4.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é demonstrar as vantagens da obra realizada pela EDP, distribuição única no país, com a tecnologia *Spacer Cable*, explicando etapa a etapa, com registos fotográficos, e fazendo uma análise económica comparativa com linha aérea de cabo nu.

Nas regiões fortemente poluídas e nas áreas próximas à orla marítima, a deposição de agentes agressivos e/ou da maresia na superfície protetora dos cabos possibilita a formação de correntes rastejantes, ocasionando o fenómeno conhecido como *tracking* [15]. Por esta razão, é crucial evitar a utilização desta solução em zonas localizadas a uma distância inferior a 300 metros da orla marítima.

Os pontos que resumem a motivação que conduziu a EDP, atual E-Redes, a apostar neste tipo de projetos foram [16], [17]:

- A fiabilidade da rede e a qualidade de serviço, ambas prioritárias para as redes elétricas;
- A dificuldade de implantação de linhas aéreas, que se resume na oposição dos proprietários na colocação de apoios;
- Poder aproveitar as potencialidades das redes viárias e suas bermas para implantação deste tipo de infraestruturas;
- O facto de que a ocorrência de interrupções de alimentação afeta a satisfação dos clientes, com grande impacto no TIE;
- Ser necessário evitar disparos intempestivos com origem em animais/aves (corrosão/falhas de isolamento), árvores, contacto entre fases em vãos longos, entre outros fatores;
- Garantir a acessibilidade e visibilidade das infraestruturas, com consequente redução do tempo de interrupção;
- Os elevados custos da solução de rede subterrânea em zonas semiurbanas onde a opção subterrânea não é economicamente viável;
- Rentabilizar os apoios de rede, para suporte de diferentes níveis de tensão e serviços, que em determinadas situações, respeitando as distâncias regulamentares, podem ir da AT às Telecomunicações;
- Um aumento dos níveis de segurança com redução do risco elétrico, atendendo às técnicas e tecnologias utilizadas;

- As exigências a nível de proteção animal e ambiental serem cada vez maiores;
- Redução da Zona de proteção à linha.

Este tipo de rede de distribuição assenta num cabo mensageiro, que suporta a tração mecânica de regulação, bem como os esforços exercidos pelo peso dos condutores e pela ação do vento, em cabos cobertos equidistantes. Conta com as seguintes características:

- O esforço mecânico de regulação é exercido apenas no mensageiro – técnica construtiva;
- Foi definido o uso de espaçadores de 10 em 10 metros – técnica construtiva – garantindo assim a distância mínima entre condutores elétricos e espaçadores;
- A tração inicial considerada foi de 10 kg/mm², para o mensageiro, e 1 kg/mm², para os condutores.

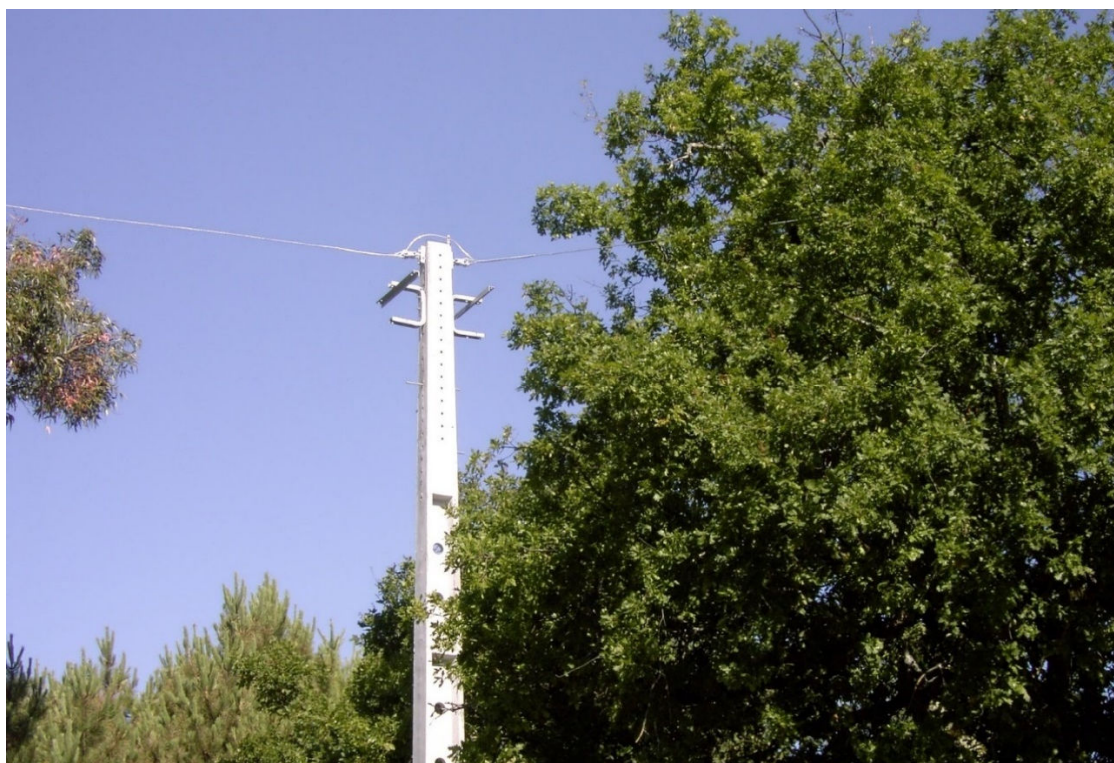


Figura 4.1: Cabo Mensageiro.

4.2 Constituição do mensageiro

O cabo mensageiro apresenta na sua constituição características que incluem o suporte de tensões mecânicas da linha, isto é, age como um escudo (guarda fio) ao impacto de um raio. Funciona, também, como estrela de redes neutras.

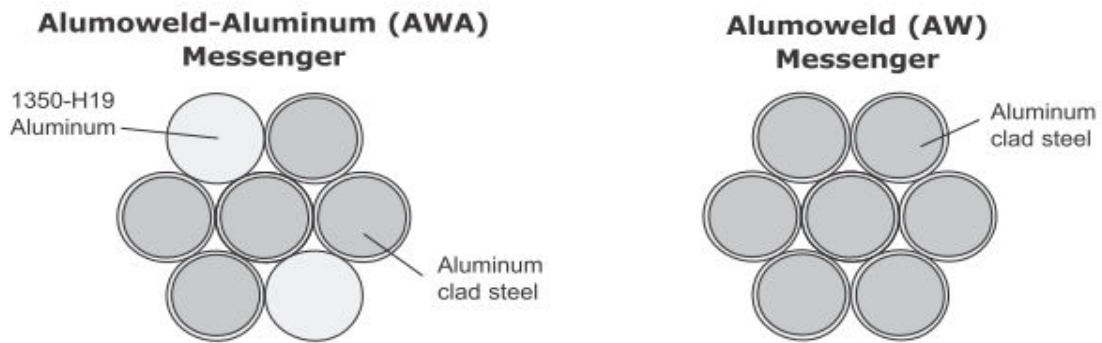


Figura 4.2: Cabo mensageiro [17].

Como características construtivas, o mensageiro 252 AWA, apresenta:

- AWA – 252 (5 fios de aço e 2 fios de alumínio);
- Secção (mm²) – 58,58;
- Diâmetro (mm) – 9,779;
- Peso próprio (kg/m) – 0,324;
- Tração de rutura (N) – 5317;
- Coeficiente de dilatação linear – $14,4 \times 10^{-6}$;
- Módulo de elasticidade – 13445,4.

4.3 Tecnologia do cabo isolado

A Figura 4.3 apresenta a estrutura básica do isolamento do condutor, composta por camadas de polietileno (PE) e outros materiais isolantes, assegurando proteção mecânica e elétrica. Enquanto, a Figura 4.4 pormenoriza a constituição do condutor propriamente dito, incluindo:

- Camada A: Polietileno semiconductor (0,381 mm) – assegura a uniformidade do campo elétrico.
- Camada B: Polietileno de baixa densidade (1,905 mm) – proporciona flexibilidade e resistência térmica.
- Camada C: Polietileno de alta densidade (1,905 mm) – confere robustez mecânica e isolamento adicional.

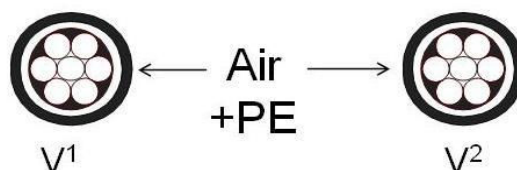
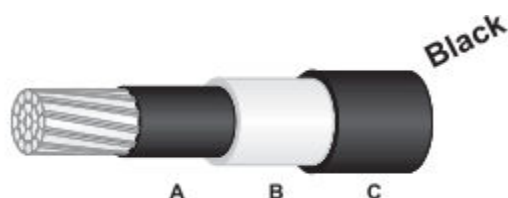


Figura 4.3: Isolamento do condutor – *Aerial Cable* 15 kV [17].

Esta disposição estratificada otimiza o desempenho do cabo em MT (15 kV), garantindo durabilidade e fiabilidade em ambientes expostos. O estudo destes materiais e da sua configuração é essencial para compreender as vantagens desta tecnologia face a soluções tradicionais, nomeadamente em redes de distribuição aéreas.



- A - Polietileno Semicondutor (0,381 m)
- B - Polietileno de Baixa densidade (1,905 mm)
- C - Polietileno de alta densidade (1,905 mm)

Figura 4.4: Condutor, Aerial Cable 15 kV [17].

O polietileno substitui a maioria do ar, permitindo um espaçamento mais próximo.

Dados Construtivos:

- Condutor - Fio de alumínio nu, bloqueado (evita a penetração de água);
- Cobertura - Polietileno reticulado (XPLE)-cor preta, resistente ao trilhamento elétrico (*tracking*) e aos raios ultravioletas.

Características do condutor, *Aerial Cable* 15 kV, condutor coberto de polietileno:

- Características construtivas:
 - Alumínio – 7 fios;
 - Secção (mm²) – 57,17;
 - Diâmetro (mm) – 16,967;
 - Peso próprio (kg/m) – 0,32.
- Características Elétricas:
 - Resistência elétrica a 20°C (Ω/km) – 0,658;
 - Diâmetro (mm) – 8,534;
 - Temperatura máxima de operação (°C) – 75;
 - Corrente máxima (A) – 234;
 - Corrente Máxima Curto-Circuito (1 segundo) – 4,69.

Na Figura 4.5, apresenta-se um cabo aéreo de 15 kV, evidenciando a sua configuração física no contexto de aplicação. A Figura 4.6 mostra as bobinas do referido cabo, tal como são utilizadas nas operações de transporte e manuseamento em ambiente de obra, evidenciando os requisitos logísticos associados à sua disponibilização e preparação para instalação no terreno.



Figura 4.5: Cabo *Aerial Cable* 15 kV.



Figura 4.6: Bobinas do cabo *Aerial Cable* 15 kV.

No Anexo I, é apresentado o cálculo mecânico da linha, tendo por base os pressupostos anteriormente definidos e de acordo com o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta tensão.

4.4 Isolamento

Nos sistemas de cabos aéreos para MT, são utilizados três tipos distintos de componentes de isolamento, cada um com funções específicas e complementares:

- Espaçador;
- Isolador rígido HPI 15;
- Isolador de amarração DEINS 15.

O espaçador é um elemento não condutor cuja função principal é garantir o afastamento físico entre os condutores, prevenindo curtos-circuitos e contactos acidentais, contribuindo assim para a segurança elétrica da instalação [18]. Este componente é, normalmente, fabricado em materiais poliméricos de elevada resistência mecânica e ao envelhecimento ambiental.

O isolador rígido constitui um componente de suporte estrutural, concebido para operar a tensões até 15 kV. Caracteriza-se por apresentar uma elevada rigidez dielétrica e resistência mecânica, sendo geralmente produzido em porcelana ou em materiais compósitos com propriedades isolantes reforçadas.

Por sua vez, o isolador de amarração é utilizado em pontos terminais ou de fixação da linha aérea, tendo como principal função a absorção dos esforços mecânicos longitudinais, assegurando a integridade estrutural do sistema. Este componente é igualmente classificado para serviço a 15 kV e combina funções de isolamento elétrico com capacidade de resistência mecânica.

A seleção adequada dos componentes de isolamento depende de diversos fatores, entre os quais se destacam a configuração da linha aérea (nomeadamente a sua topologia e extensão), as solicitações mecânicas previstas (tais como esforços de tração, ação do vento e acumulação de gelo), as condições ambientais do local (incluindo temperatura, humidade e níveis de poluição) e os requisitos associados à manutenção e acessibilidade ao longo do ciclo de vida da instalação [19].

4.4.1 Materiais – Espaçadores

Os espaçadores constituem acessórios de geometria losangular, especificamente concebidos para aplicação em redes compactas de média tensão da classe de 15 kV. Instalados sobre um cabo mensageiro, têm como principal função sustentar os condutores e garantir o seu afastamento adequado ao longo do vão, assegurando simultaneamente o nível de isolamento requerido.

De forma resumida, apresentam as seguintes características:

- Polietileno de alta densidade;
- Resistente aos raios ultravioletas;
- Resistente ao trilhamento elétrico;
- Amarração com laço preformado;
- Peso aproximado de 1,13 kg;
- Esforços de tração até 450 daN.



Figura 4.7: Espaçador [17].

O expansor RTL-15 é um componente essencial em linhas aéreas isoladas para média tensão (15 kV), sendo especificamente concebido para garantir a estabilidade mecânica e elétrica da instalação. As suas principais características técnicas são as seguintes:

- Tensão (kV) – 15;
- Linha de fuga (mm) – 173,05;
- Peso (kg) – 1,13.

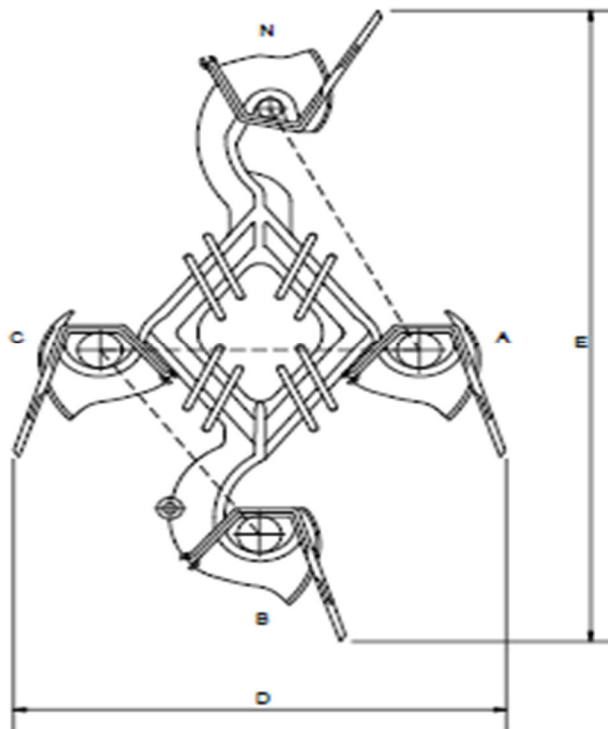


Figura 4.8: Espaçador RTL-15 [17].

Tabela 4:1: Características do espaçador RTL-15 [17]

Dimensões em (mm)		Espaçamento entre Condutores (mm)			Peso (Kg)
D	E	NA	AC	BC	1,1
419,1	596,9	215,9	203,2	203,2	

4.4.2 Materiais - isoladores rígidos HPI 15

Os isoladores rígidos HPI 15 em polietileno de alta densidade apresentam características próprias, como o facto de os condutores serem fixados por meio de filaças em alumínio, cobertas com borracha termoplástica. Com este tipo de espaçadores é garantida a distância mínima de partes sob tensão (16 cm). Nas Figuras 4.9 e 4.10, mostra-se um isolador rígido HPI 15, sem e com filaça, respetivamente. Este tipo de isoladores apresentam as seguintes características:

Tensão (kV) – 15

Linha de fuga (mm) – 304,8

Tensão de choque suportável (kV)

Positiva – 130

Negativa – 176

Tensão de contornamento (kV)

A seco – 77

Sob chuva – 46

Carga de rotura à flexão (kg) – 1359,3

Distância mínima (alínea d) do artigo 74 do decreto 42895 de 31 de março 1960 – 16cm



Figura 4.9: Isolador rígido HPI 15 [17].



Figura 4.10: Isolador rígido HPI 15, com filaça [17].

4.4.3 Materiais - isoladores de amarração, DEINS 15

O isolador é constituído por dois materiais isolantes e encontra-se equipado com engates metálicos, para sustentação e fixação dos cabos em estruturas de fim de linha, derivação e/ou ângulos e amarração. Na Figura 4.11, apresenta-se um isolador de amarração DEINS 15 [17].



Figura 4.11: Isolador de amarração DEINS 15 [17].

Características do isolador de amarração, DEINS 15, em fibra de vidro:

- Tensão (kV) – 15
- Linha de fuga (mm) – 381
- Tensão de choque suportável (kV)
- Positiva – 202
- Negativa – 225
- Tensão de contornamento (kV)
 - seco – 133
 - Sob chuva – 112
 - de rotura à flexão (kg) – 3401,95

No, Anexo II, é apresentado o cálculo elétrico do isolamento.

4.4.4 Materiais - Braço anti balanço

O braço anti balanço, feito de material polimérico, apresenta como função a redução da vibração mecânica dos condutores da rede compacta e evita a aproximação dos cabos condutores aos apoios.



Figura 4.12: Braço anti balanço [17].

4.5 Terras

Não se enquadrando este projeto no Regulamento Nacional, e tendo em consideração as indicações do fabricante, o cabo mensageiro deverá ser ligado à terra nas seguintes condições:

- No mínimo de 150 em 150 metros;
- Em todos os apoios se o índice ceráunico for elevado;
- O valor da resistência de terra deverá ser inferior a 25 Ω .

Tendo em consideração que os apoios de betão possibilitam executar ligações à terra, o cabo mensageiro será ligado à mesma em todos os apoios, sendo o valor da resistência da terra inferior a 20 Ω , o que cumpre o estabelecido do RSLEAT: ponto 3 do Artigo 147.

4.6 Dimensionamento de Apoios

Foram utilizados apoios de betão previstos nas recomendações para linhas aéreas de Alta Tensão até 30 kV (DGEG) e dimensionados tendo em consideração os seguintes pontos:

- Mensageiro estabelecido a 10 kg/mm²;
- Condutores estabelecidos a 1 kg/mm²;
- O peso do mensageiro somado ao peso dos condutores e ao dos espaçadores;
- Vento a atuar sobre o mensageiro, os três condutores e os espaçadores.

No Anexo II, é apresentado o cálculo de estabilidade dos apoios.

4.7 Travessas- Estudo de montagem

Antes da execução da obra, foram realizados testes em colaboração com a empresa Visotela, com o objetivo de adaptar as ferragens (travessas) existentes aos apoios de betão usados em Portugal [20]. O processo foi desenvolvido por tentativa e erro, culminando na definição das soluções finais de montagem. As Figuras 4.13 a 4.21 correspondentes ilustram as várias configurações testadas e os respetivos ajustes efetuados para garantir a compatibilidade mecânica e elétrica.



Figura 4.13: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.14: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.15: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.16: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.17: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.18: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.19: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.20: Estudo, Montagem das ferragens.



Figura 4.21: Estudo, Montagem das ferragens.

4.7.1 Travessas - Armação BD 35

As travessas do tipo BD 35 foram adaptadas para suportar os condutores isolados da rede compacta, garantindo os afastamentos regulamentares entre fases e em relação ao poste. Estas travessas foram homologadas pela Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) especificamente para esta obra.

4.7.2 Travessas - Armação para mensageiro

As travessas destinadas ao cabo mensageiro foram especialmente configuradas para suportar o esforço de tração e garantir o posicionamento adequado da estrutura. A sua geometria permite a fixação segura do cabo mensageiro sem comprometer a integridade da estrutura de suporte.



Figura 4.22: Armação para mensageiro.

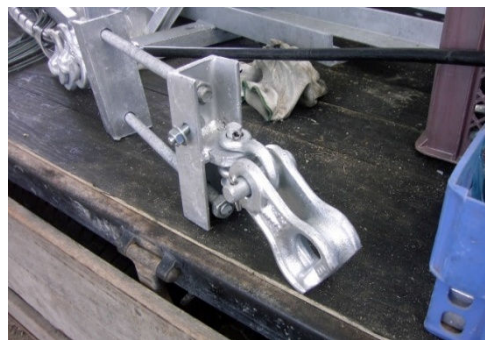


Figura 4.23: Armação para mensageiro.

4.7.3 Travessas - Armações laterais

As armações laterais foram igualmente adaptadas, assegurando a estabilidade dos condutores em transições e curvas. A correta instalação destas travessas é essencial para manter os esforços simétricos e evitar o desequilíbrio da estrutura.



Figura 4.24: Armação Lateral.



Figura 4.25: Armação Lateral.

4.8 Linha de Baixa tensão e de Iluminação Pública

A obra experimental desenvolvida em Mangualde considerou também a integração de outras infraestruturas no mesmo apoio. Com uma distância entre apoios de 40 metros, foi possível aproveitar a estrutura da rede de média tensão para instalar:

- Rede de Baixa Tensão (BT);
- Rede de Iluminação Pública (IP);
- Telecomunicações (conforme aplicável e em conformidade com as distâncias mínimas regulamentares).

Esta solução integrada, além de otimizar o uso do espaço físico e reduzir custos de implantação, contribui para uma paisagem urbana e rural mais limpa e ordenada. As figuras apresentadas demonstram a presença de dois níveis de tensão no mesmo apoio, evidenciando a viabilidade técnica desta abordagem multifuncional.



Figura 4.26: Dois níveis de tensão no mesmo apoio.

Deste modo, o apoio foi devidamente preparado para as instalações de média tensão, baixa tensão, rede de iluminação pública e telecomunicações.

5. ACOMPANHAMENTO TÉCNICO DA EVOLUÇÃO DA OBRA

Apresenta-se, de forma sistematizada, o registo fotográfico das principais fases da execução da obra de modo a dar conhecimento das etapas executadas, de forma ordeira, para a implementação da linha.

5.1 Abertura de covas

Esta fase consiste na escavação das fundações para os apoios, de acordo com a volumetria previamente definida. Durante a abertura das covas, é essencial manter as paredes verticais para garantir a estabilidade da estrutura. As Figuras [Figura 5.1 a Figura 5.6] ilustram as etapas desta operação, incluindo a sinalização de segurança no local.



Figura 5.1: Local para abertura de cova.



Figura 5.2: Início de abertura de cova.



Figura 5.3: Continuação de abertura de cova.



Figura 5.4: Abertura de cova concluída.



Figura 5.5: Abertura de cova com sinalização.



Figura 5.6: Pormenor da prumagem.

5.2 Arvoreamento de apoios

Após a escavação, procede-se ao arvoreamento dos apoios, isto é, à sua colocação nas fundações. Esta tarefa exige o uso de maquinaria pesada e o cumprimento rigoroso de normas de segurança, nomeadamente no que respeita ao encastramento e à prumagem dos postes. As Figuras [Figura 5.7 a Figura 5.12] apresentam as várias fases deste processo.



Figura 5.7: Arvoreamento apoio com auxílio grua. Figura 5.8: Arvoreamento apoio com auxílio grua.



Figura 5.9: Arvoreamento apoio com auxílio grua.



Figura 5.10: Arvoreamento apoio com auxílio grua.



Figura 5.11: Arvoreamento apoio, já na cova.



Figura 5.12: Arvoreamento apoio, com espigagem.

5.3 Betonagem

A betonagem consiste no preenchimento da cova com betão, de forma a garantir a fixação adequada dos apoios. É fundamental assegurar a qualidade do betão e o tempo de cura, antes de dar continuidade à obra. Durante esta fase, não é permitida a instalação de ferragens nem o acesso aos postes. As figuras [Figura 5.13 a Figura 5.16] documentam este procedimento.



Figura 5.13: Betonagem.



Figura 5.14: Betonagem.



Figura 5.15: Betonagem.



Figura 5.16: Betonagem.

O betão aplicado foi do tipo C20/25, adequado para fundações de apoio de MT, com tempo mínimo de cura de 7 dias.

5.4 Construção – montagem das travessas

Com os postes fixados, inicia-se a instalação das travessas (ferragens), previamente adaptadas para esta tecnologia. As Figuras [Figura 5.17 a Figura 5.20] mostram as diferentes configurações e o processo de montagem, incluindo travessas de amarração, de transição e laterais.



Figura 5.17: Travessas Montagem – Figura 5.18: Travessas Montagem. Amarração.



Figura 5.19: Travessas Montagem HRFSC.

Figura 5.20: Travessas Montagem HRFSC.

Como se pode observar nas imagens, o apoio é de transição entre a rede nua e a rede spacer. Consequentemente, as ferragens também são de transição. Nas Figuras [Figura 5.21 a Figura 5.36], é possível observar o seccionador à cabeça do apoio e a ferragem de armação HRFSC em processo de montagem.



Figura 5.21: Travessas de Montagem.



Figura 5.22: Travessas Montagem.



Figura 5.23: Travessas de Montagem.



Figura 5.24: Travessas de Montagem BD 35.



Figura 5.25: Travessas de Montagem BD 35.



Figura 5.26: Travessas de Montagem BD 35.



Figura 5.27: Travessas de Montagem BD 35.

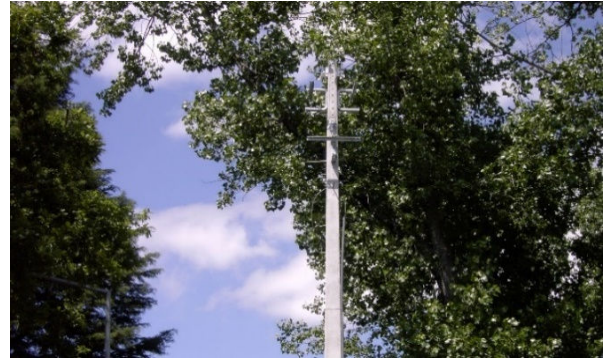


Figura 5.28: Travessas de Montagem BD 35.



Figura 5.29: Travessas de Montagem BD 35.



Figura 5.30: Travessas Montagem BD 35.

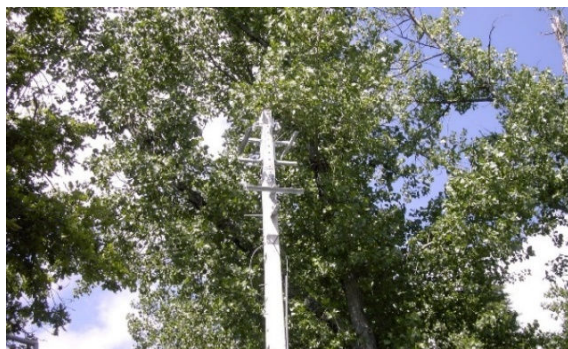


Figura 5.31: Travessas Montagem BD 35.



Figura 5.32: Travessas Montagem BD 35.



Figura 5.33: Travessas Montagem BD 35.

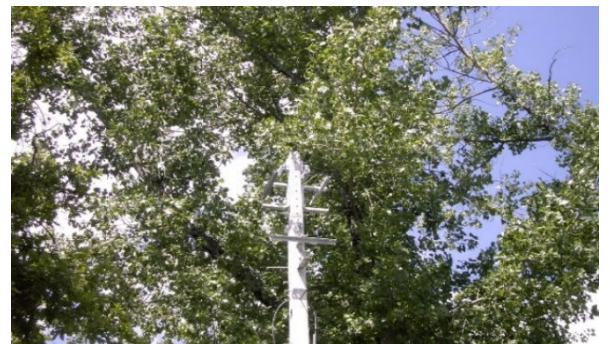


Figura 5.34: Travessas Montagem BD 35.



Figura 5.35: Montagem armação Lateral.



Figura 5.36: Montagem armação Lateral.

5.5 Construção – mensageiro

5.5.1 Cabo mensageiro

A instalação do cabo mensageiro é uma das fases críticas da montagem. Este cabo é responsável por suportar os esforços mecânicos da linha. As figuras [Figura 5.37 a Figura 5.40] ilustram a preparação e colocação das bobines, bem como a fixação do cabo nos apoios.



Figura 5.37: Colocação do cabo mensageiro.



Figura 5.38: Colocação do cabo mensageiro.



Figura 5.39: Colocação do cabo mensageiro



Figura 5.40: Colocação do cabo mensageiro.

5.5.2 Cabo *spacer* (condutores)

O passo seguinte consiste na colocação dos três condutores isolados (rede *Spacer Cable*). As figuras [Figura 5.41 a Figura 5.44] mostram a passagem e posicionamento dos cabos, que devem ser cuidadosamente alinhados com os espaçadores.



Figura 5.41: Colocação de bobines de cabo.



Figura 5.42: Característica do cabo.



Figura 5.43: Colocação de bobines de cabo.

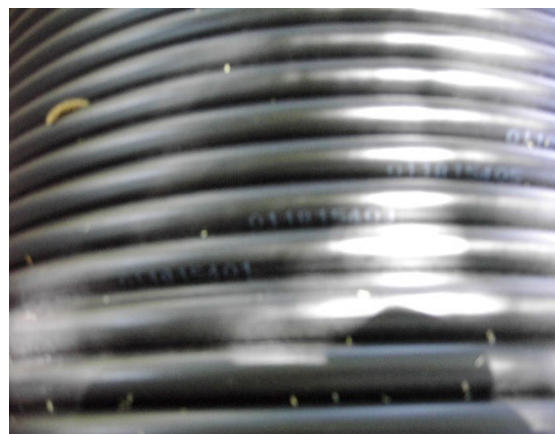


Figura 5.44: Colocação do cabo na bobine.

5.5.3 Passagem de condutores

A passagem dos condutores segue um protocolo específico de segurança e sequenciamento. As figuras [Figura 5.45 a Figura 5.80] apresentam a progressão desta fase, desde o desenrolamento das bobines até à sua fixação final.



Figura 5.45: Início da passagem cabos.



Figura 5.46: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.47: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.48: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.49: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.50: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.51: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.52: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.53: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.54: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.55: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.56: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.57: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.58: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.59: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.60: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.61: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.62: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.63: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.64: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.65: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.66: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.67: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.68: Sequência da passagem cabos.

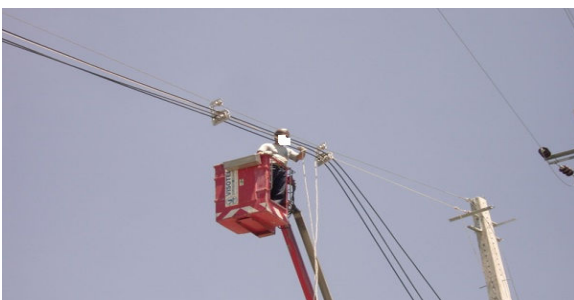


Figura 5.69: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.70: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.71: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.72: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.73: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.74: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.75: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.76: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.77: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.78: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.79: Sequência da passagem cabos.



Figura 5.80: Sequência da passagem cabos.

5.6 Colocação de espaçadores

Os espaçadores são posicionados de 10 em 10 metros, garantindo o afastamento entre os condutores e a estabilidade da configuração triangular da rede. As Figuras [Figura 5.81 a Figura 5.88] demonstram a colocação progressiva dos espaçadores ao longo dos vãos.

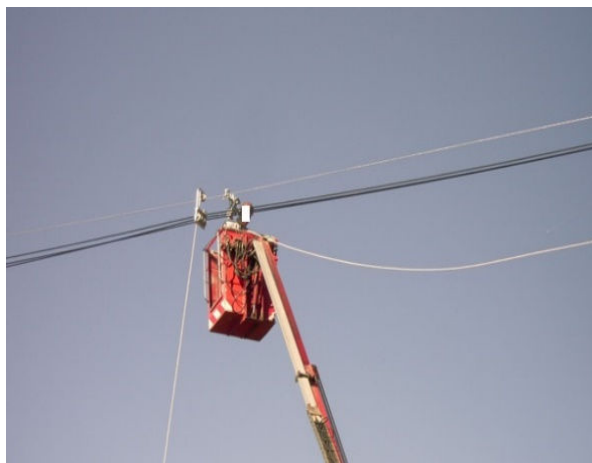


Figura 5.81: Sequência da colocação espaçadores.

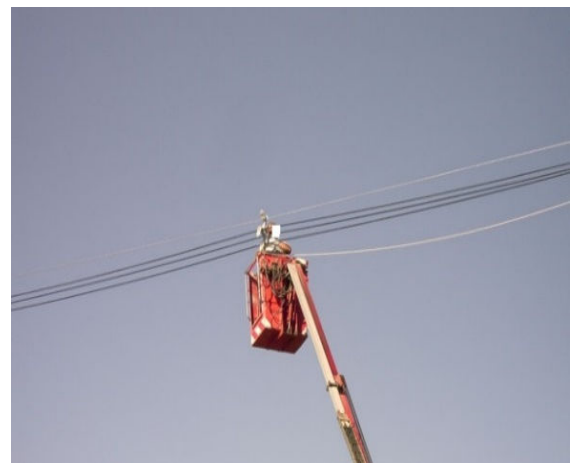


Figura 5.82: Sequência da colocação espaçadores.

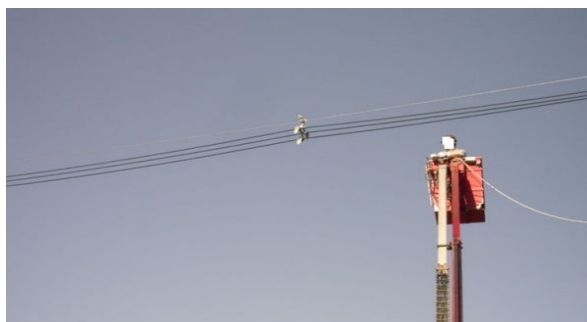


Figura 5.83: Sequência da colocação espaçadores.



Figura 5.84: Sequência da colocação espaçadores.



Figura 5.85: Sequência da colocação espaçadores.



Figura 5.86: Sequência da colocação espaçadores.



Figura 5.87: Sequência da colocação espaçadores.

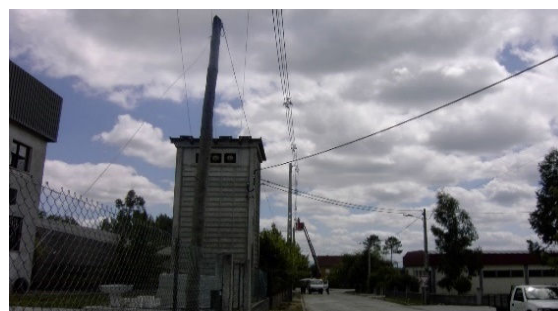


Figura 5.88: Sequência da colocação espaçadores.

5.7 Construção - Execução de amarração

A amarração consiste na fixação dos condutores nas extremidades da linha ou em pontos de derivação. É uma operação que exige rigor técnico para garantir a continuidade elétrica e mecânica da instalação. As figuras [Figura 5.89 a Figura 5.96] exemplificam este processo.



Figura 5.89: Execução de amarração.



Figura 5.90: Execução de amarração.



Figura 5.91: Execução de amarração.



Figura 5.92: Execução de amarração.



Figura 5.93: Execução de amarração.

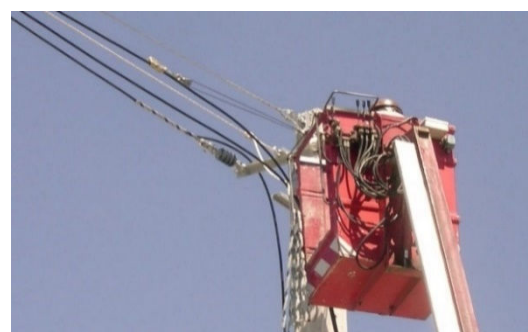


Figura 5.94: Execução de amarração

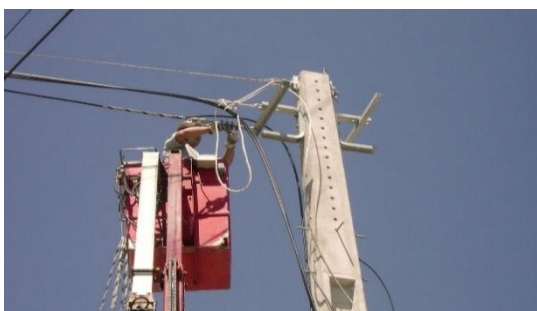


Figura 5.95: Execução de amarração.

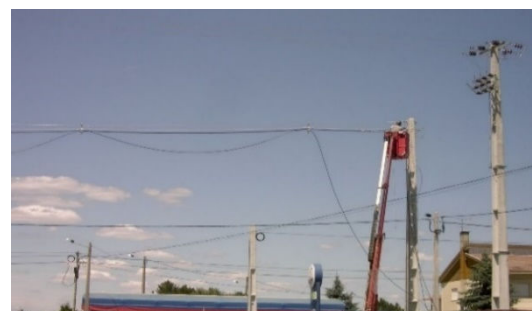


Figura 5.96: Execução de amarração.

5.8 Amarração final

A finalização da amarração implica o tensionamento adequado dos condutores e a verificação da estabilidade do sistema. As figuras [Figura 5.97 a Figura 5.124] mostram os detalhes da amarração definitiva.



Figura 5.97: Amarração.



Figura 5.98: Amarração.



Figura 5.99: Amarração.

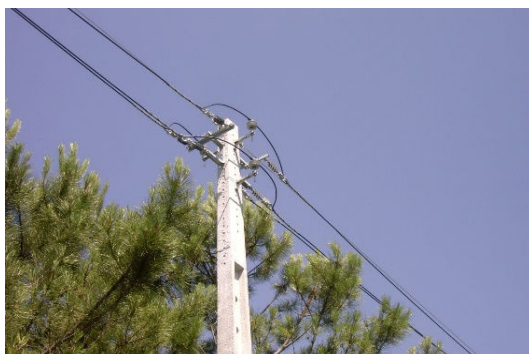


Figura 5.100: Amarração.



Figura 5.101: Amarração.

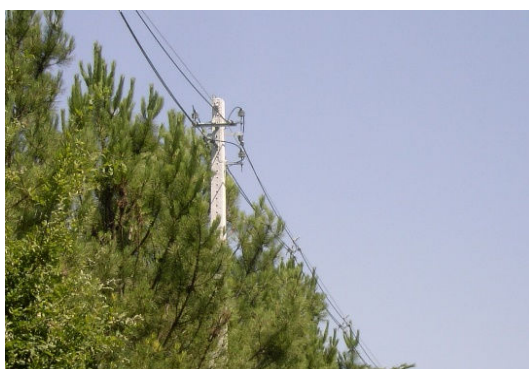


Figura 5.102: Amarração.



Figura 5.103: Amarração.



Figura 5.104: Amarração.



Figura 5.105: Amarração.



Figura 5.106: Amarração.

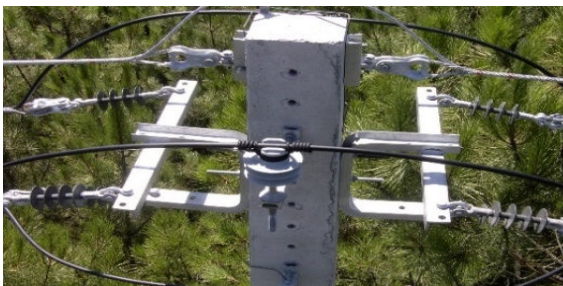


Figura 5.107: Amarração.



Figura 5.108: Amarração.



Figura 5.109: Amarração.

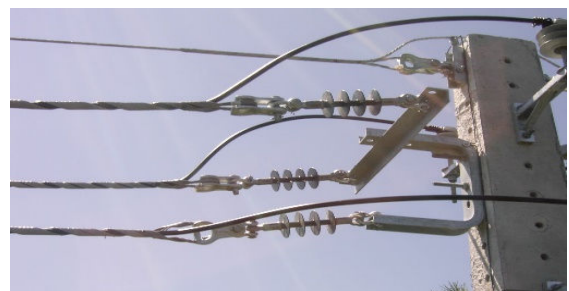


Figura 5.110: Amarração.



Figura 5.111: Amarração.

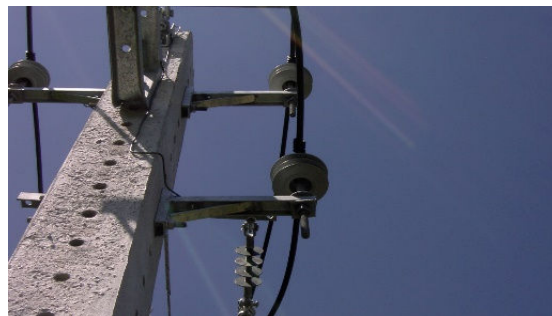


Figura 5.112: Amarração.



Figura 5.113: Amarração.

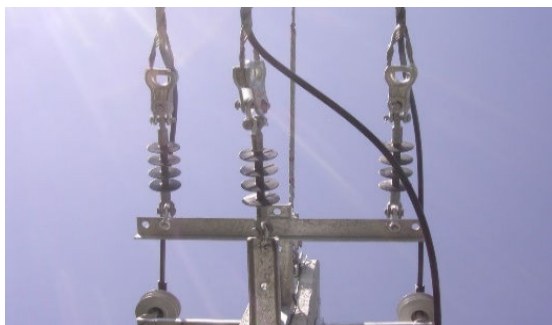


Figura 5.114: Amarração.



Figura 5.115: Amarração.



Figura 5.116: Amarração.

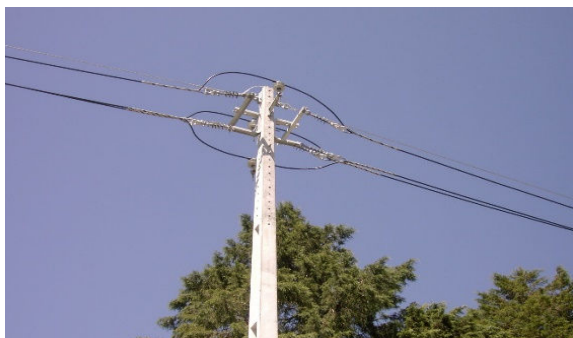


Figura 5.117: Amarração.



Figura 5.118: Amarração.



Figura 5.119: Amarração.

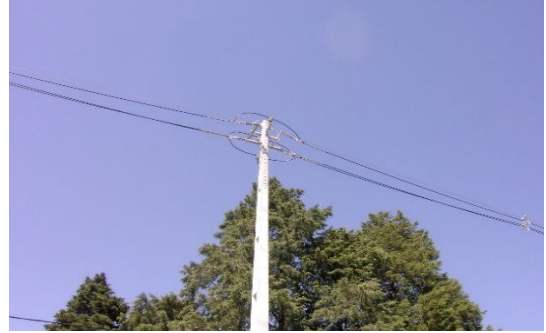


Figura 5.120: Amarração.

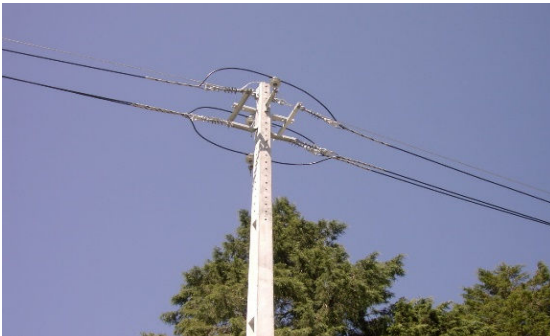


Figura 5.121: Amarração.



Figura 5.122: Amarração.



Figura 5.123: Amarração.



Figura 5.124: Amarração.

5.9 Ligação de condutores

Após a instalação mecânica, procede-se à ligação elétrica dos condutores, com recurso a equipamentos apropriados, garantindo a continuidade da alimentação. As Figuras [Figura 5.125 a Figura 5.140] documentam as ligações e os materiais utilizados.

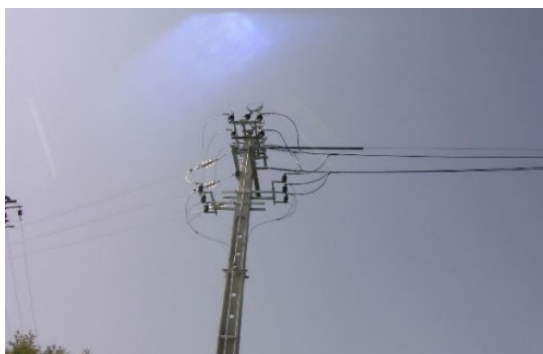


Figura 5.125: Ligação de condutores.



Figura 5.126: Ligação de condutores



Figura 5.127: Ligação de condutores.



Figura 5.128: Ligação de condutores.

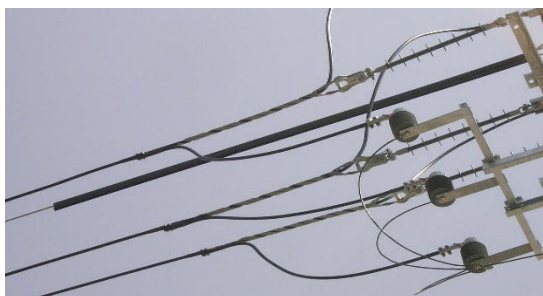


Figura 5.129: Ligação de condutores.



Figura 5.130: Ligação de condutores.

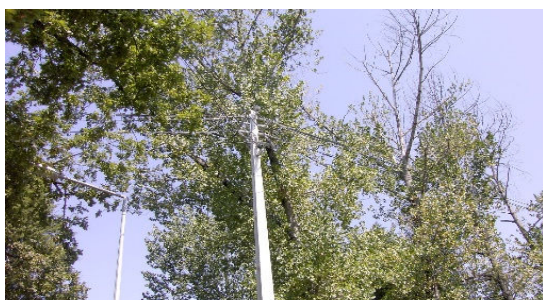


Figura 5.131: Ligação de condutores.

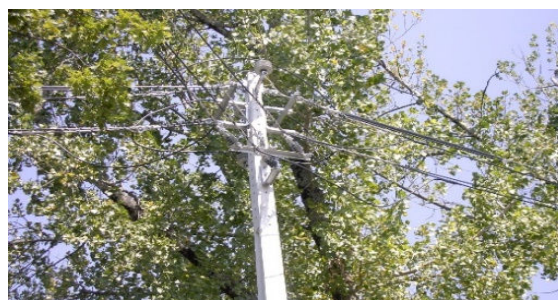


Figura 5.132: Ligação de condutores.



Figura 5.133: Ligeação de condutores.



Figura 5.134: Ligeação de condutores.



Figura 5.135: Ligeação de condutores.



Figura 5.136: Ligeação de condutores.



Figura 5.137: Ligeação de condutores.



Figura 5.138: Ligeação de condutores.



Figura 5.139: Ligeação de condutores.



Figura 5.140: Ligeação de condutores.

5.10 Condutores com espaçadores instalados

Com os espaçadores corretamente posicionados e os condutores tensionados, obtém-se a configuração final da linha. As Figuras [Figura 5.141 a Figura 5.150] apresentam o resultado da instalação.



Figura 5.141: Condutores com espaçadores.



Figura 5.142: Condutores com espaçadores.

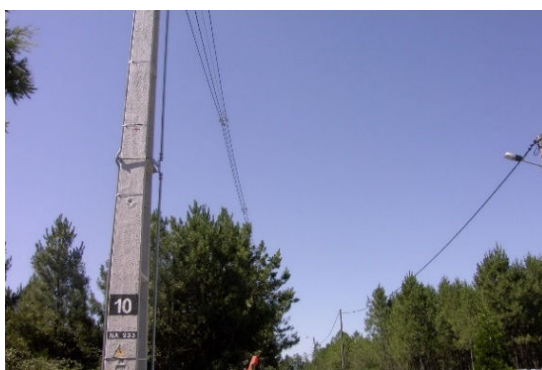


Figura 5.143: Condutores com espaçadores.



Figura 5.144: Condutores com espaçadores.

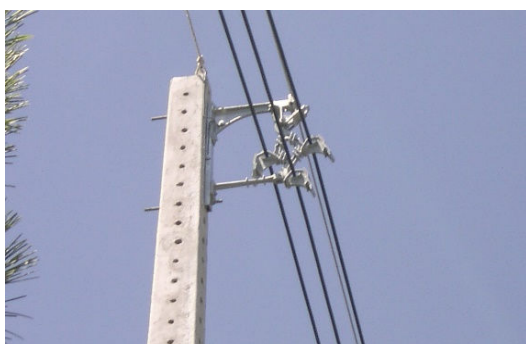


Figura 5.145: Condutores com espaçadores.



Figura 5.146: Condutores com espaçadores.



Figura 5.147: Condutores com espaçadores.



Figura 5.148: Condutores com espaçadores.



Figura 5.149: Condutores com espaçadores.

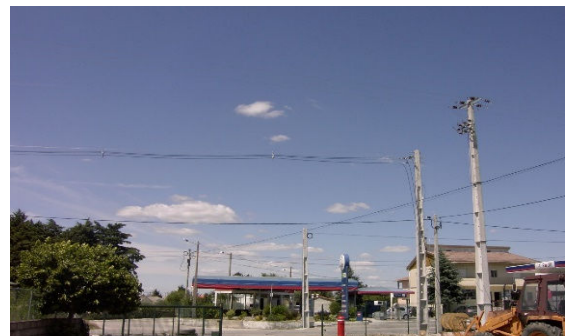


Figura 5.150: Condutores com espaçadores.

5.11 Montagem de seccionador lado B do Fojo

Neste tópico é exposta a montagem de seccionador lado Bº do fojo.



Figura 5.151: Seccionador lado B.



Figura 5.152: Seccionador lado B.

5.12 Montagem de seccionador lado A

Neste tema é exibida a montagem de seccionador do lado A.



Figura 5.153: Seccionador lado A

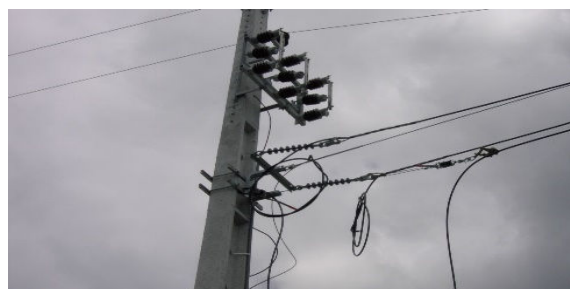


Figura 5.154: Seccionador lado A



Figura 5.155: Seccionador lado A



Figura 5.156: Seccionador lado A



Figura 5.157: Seccionador lado A



Figura 5.158: Seccionador lado A

5.13 Montagem de seccionador lado do loteamento

Neste segmento é detalhada a montagem do seccionador do lado do loteamento.

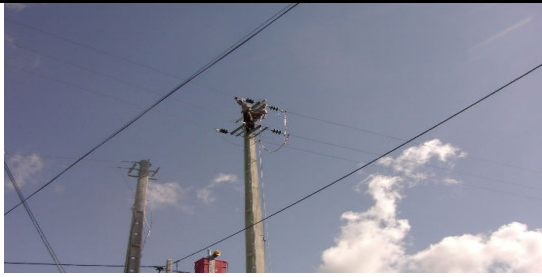


Figura 5.159: Seccionador loteamento



Figura 5.160: Seccionador loteamento



Figura 5.161: Seccionador loteamento



Figura 5.162: Seccionador loteamento



Figura 5.163: Seccionador loteamento



Figura 5.164: Seccionador loteamento



Figura 5.165: Seccionador loteamento



Figura 5.166: Seccionador loteamento

5.14 Apoios com diferente nível de tensão elétrica

Nesta secção é detalhada a colocação de apoios com dois níveis de tensão Média Tensão e Baixa Tensão.



Figura 5.167: Apoios MT com rede BT.



Figura 5.168: Apoios MT com rede BT.



Figura 5.169: Apoios MT com rede BT.



Figura 5.170: Apoios MT com rede BT.

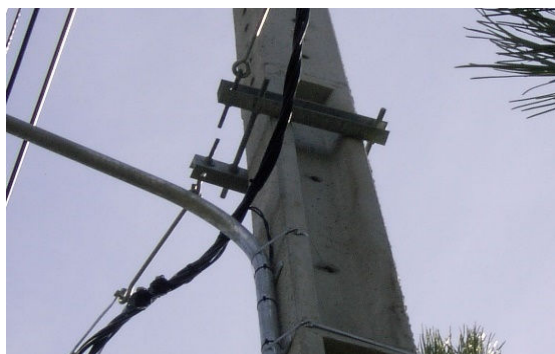


Figura 5.171: Apoios MT com rede BT.



Figura 5.172: Apoios MT com rede BT.



Figura 5.173: Apoios MT com rede BT.



Figura 5.174: Apoios MT com rede BT.

A combinação de dois ou três níveis de tensão (média tensão, baixa tensão e telecomunicações) reduz a necessidade de múltiplos postes, economizando espaço e minimizando o impacto visual na paisagem urbana ou rural.

6. ANÁLISE ECONÓMICA

Este capítulo tem como objetivo comparar os custos associados a diferentes soluções técnicas para a construção de linhas de distribuição de média tensão, analisando três cenários distintos:

- Rede com tecnologia *Spacer Cable*;
- Rede aérea convencional (com cabo nu);
- Rede subterrânea.

A análise baseia-se em dados recolhidos no âmbito da obra “Mangualde I – Mangualde Gare” e permite uma avaliação técnico-económica que justifica a escolha da solução adotada.

6.1 Cenário 1 – linha construída com rede compacta (*Spacer Cable*)

Neste cenário, são considerados os custos da solução aplicada na obra em análise, com condutores revestidos e cabo mensageiro, segundo os seguintes pressupostos:

- Distância média entre apoios: 40 metros;
- Altura dos apoios: 14 metros;
- Utilização de espaçadores a cada 10 metros;
- Compartilhamento da estrutura com BT, iluminação pública e telecomunicações.
- Principais custos envolvidos:
 - Apoios e fundações;
 - Ferragens específicas (travessas BD35, armações para mensageiro);
 - Condutores e cabo mensageiro;
 - Espaçadores, isoladores e braços anti balanço;
 - Mão de obra especializada;
 - Equipamento de segurança e máquinas.
 - Apesar do custo inicial ser mais elevado do que o da rede aérea convencional, este sistema apresenta vantagens económicas a médio e longo prazo:
 - Redução da manutenção (menos podas, menor desgaste de condutores);
 - Menor número de interrupções;

Análise Técnico-Económica e Avaliação da Sustentabilidade da Integração de Linhas Aéreas Compactas em Redes de Distribuição de Média Tensão: Estudo de Caso em Mangualde

- Diminuição dos custos com indemnizações por incidentes (ex.: incêndios ou danos à avifauna);
- Aumento da durabilidade dos materiais.

Tabela 6:1: Estudo de investimento rede compacta (*Spacer Cable*)

Art.º	Designação	Quantidade	Preço unitário	Preço Total
	LAMT <i>spacer cable</i>			
1-	Piquetagem de traçado de linhas	0,50	800,00 €	400,00 €
2-	Projeto <i>spacer cable</i> + rede baixa tensão e IP	1,00	4 000,00 €	3 000,00 €
3-	Levantamento topográfico cadastral LAMT	1,00	2 000,00 €	2 000,00 €
4-	Apoio 1 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €
4.1-	Arvoreamento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
4.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
4.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	750,00 €	750,00 €
5-	Apoio 2 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
5.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
5.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
5.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
6-	Apoio 3 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
6.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
6.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
6.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
7-	Apoio 4 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €

7.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
7.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
7.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
8-	Apoio 5 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
8.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
8.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
8.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
9-	Apoio 6 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €
9.1-	Arvoreamento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
9.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
9.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	750,00 €	750,00 €
10-	Apoio 7 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
10.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
10.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
10.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
11-	Apoio 8 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
11.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
11.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
11.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
12-	Apoio 9 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
12.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
12.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
12.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
13-	Apoio 10 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €

Análise Técnico-Económica e Avaliação da Sustentabilidade da Integração de Linhas Aéreas Compactas em Redes de Distribuição de Média Tensão: Estudo de Caso em Mangualde

13.1-	Arvoreamento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
13.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
13.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	750,00 €	750,00 €
14-	Fornecimento e colocação cabo mensageiro 252 AWA	424,00	63,00 €	26 712,00 €
15-	Fornecimento e colocação de cabo Aerial <i>Cable</i> 15 kV (inclui amarração)	1240,00	72,00 €	89 280,00 €
16-	Fornecimento e colocação de espaçadores	35,00	56,00 €	1 960,00 €
17-	Rede baixa tensão			
17.1-	Fornecimento e colocação cabo torçada LXS 4X70+16 (inclui ferragens)	424,00	42,00 €	17 808,00 €
18-	Rede iluminação pública			
18.1-	Fornecimento e colocação braços e luminárias (inclui cabo, ligadores e ferragens)	14,00	180,00 €	2 520,00 €
19-	Manutenção preventiva a 20 anos	20,00	1 000,00 €	20 000,00 €
20-	Manutenção reativa a 20 anos	20,00	1 000,00 €	20 000,00 €
				220 043,21 €

6.2 Cenário 2 – linha construída com linha aérea de média tensão convencional

Neste cenário, considera-se a construção da linha com condutores nus, segundo a tipologia tradicional da E-Redes.

Custos diretos:

- Apoios de betão convencionais;
- Isoladores tipo pino;
- Condutores nus de alumínio;
- Montagem simples.

Apesar do custo inicial ser inferior, esta solução apresenta desvantagens operacionais e ambientais:

- Maior exposição a curtos-circuitos por contacto com vegetação;
- Necessidade frequente de podas;
- Elevado risco de ignição em zonas florestais;
- Maior número de interrupções por contacto com aves ou árvores;
- Impacto ambiental mais acentuado.

Tabela 6:2: Estudo de investimento linha aérea MT convencional

Art.º	Designação	Quantidade	Preço unitário	Preço Total
	LAMT			
1-	Piquetagem de traçado de linhas	0,50	800,00 €	400,00 €
2-	Projeto			
2.1-	Projeto LAMT	1,00	3 000,00 €	3 000,00 €
2.2-	Projeto LABT	1,00	1 000,00 €	1 000,00 €
3-	Levantamento topográfico			
3.1-	Levantamento topográfico cadastral LAMT	1,00	2 000,00 €	2 000,00 €
3.2-	Levantamento topográfico cadastral LABT	1,00	500,00 €	500,00 €
4-	Apoio 1 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €
4.1-	Arvoramento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
4.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
4.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	750,00 €	750,00 €
5-	Apoio 2 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
5.1-	Arvoramento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
5.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
5.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
6-	Apoio 3 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €

Análise Técnico-Económica e Avaliação da Sustentabilidade da Integração de Linhas Aéreas Compactas em Redes de Distribuição de Média Tensão: Estudo de Caso em Mangualde

6.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
6.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
6.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
7-	Apoio 4 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
7.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
7.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
7.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
8-	Apoio 5 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
8.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
8.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
8.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
9-	Apoio 6 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €
9.1-	Arvoreamento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
9.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
9.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	750,00 €	750,00 €
10-	Apoio 7 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
10.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
10.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
10.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
11-	Apoio 8 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
11.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
11.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
11.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €

12-	Apoio 9 - 600/260 14	1,00	992,33 €	992,33 €
12.1-	Arvoreamento do poste de betão 600/260 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
12.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
12.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	500,00 €	500,00 €
13-	Apoio 10 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €
13.1-	Arvoreamento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
13.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
13.3-	Ferragens mais isoladores	1,00	750,00 €	750,00 €
14-	Fornecimento e colocação de cabo nu 50mm	1240,00	31,95 €	39 618,00 €
15-	Rede baixa tensão			
15.1-	Fornecimento e colocação de cabo 4x70+16 (inclui ferragens)	424,00	12,88 €	5 461,12 €
16-	Rede iluminação pública			
16.1-	fornecimento e colocação luminárias e braços (inclui cabo, ligadores e ferragens)	14,00	180,00 €	2 520,00 €
17-	Manutenção preventiva a 20 anos	20,00	3 000,00 €	60 000,00 €
18-	Manutenção reativa a 20 anos	20,00	1 000,00 €	20 000,00 €
				170 862,33 €

6.3 Cenário 3 – linha construída com linha subterrânea de MT

A solução subterrânea apresenta os custos iniciais mais elevados, devido a:

- Escavações e reposição de pavimento;
- Condutores subterrâneos com isolamento reforçado;
- Caixa de visita e acessórios de emenda;
- Estudos de impacto e licenciamento.
- Vantagens:
- Estética urbana;
- Ausência de impacto visual;

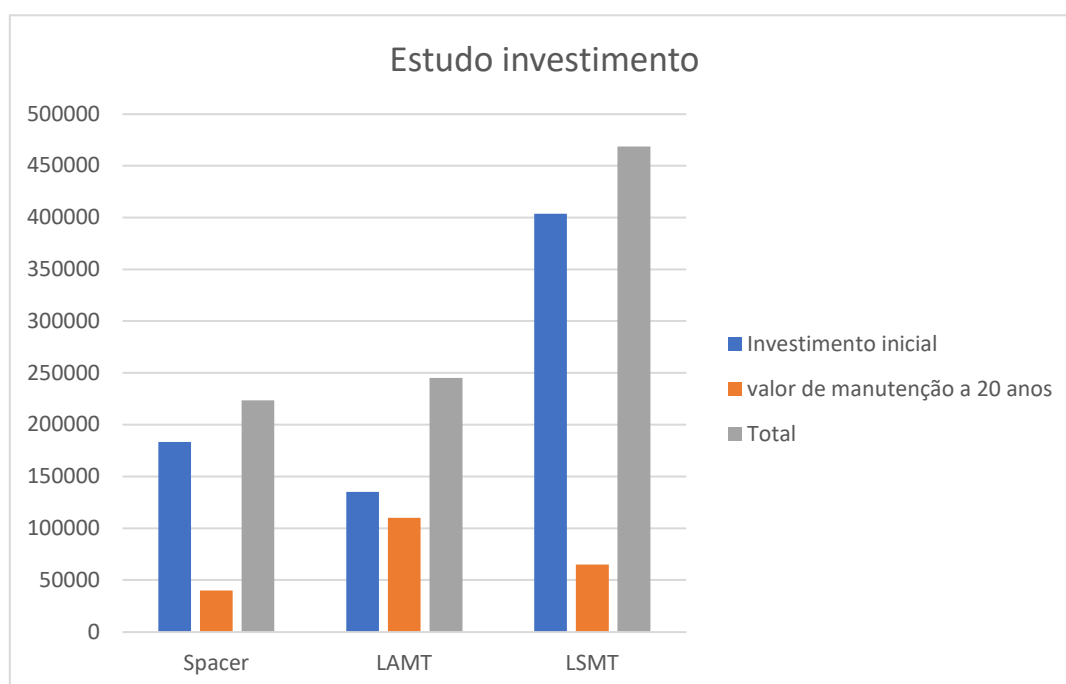
- Redução de riscos ambientais diretos.
- Desvantagens:
- Elevado custo de instalação, especialmente em zonas rurais ou semiurbanas;
- Dificuldade de manutenção e reparação em caso de avaria;
- Necessidade de proteção mecânica adicional em zonas de tráfego ou atividade agrícola.

Tabela 6:3: Estudo de investimento linha subterrânea de MT

Art.º	Designação	Quantidade	Preço unitário	Preço Total
	LSMT			
1-	Piquetagem de traçado de linhas	0,50	800,00 €	400,00 €
2-	Projeto LSMT	1,00	3 000,00 €	3 000,00 €
2.1-	Projeto LSBT + IP	1,00	1 000,00 €	1 000,00 €
3-	Levantamento topográfico cadastral LSMT	1,00	2 000,00 €	2 000,00 €
3.1-	Levantamento topográfico cadastral LSBT	1,00	500,00 €	500,00 €
4-	Apoio 1 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €
4.1-	Arvoreamento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
4.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
4.3-	Ferragens mais isoladores (inclui descida a poste)	1,00	950,00 €	750,00 €
5-	Apoio 2 - 1600/540 14	1,00	1 650,00 €	1 650,00 €
5.1-	Arvoreamento do poste de betão 1600/540 14, incluindo cova e maciço	1,00	1 259,35 €	1 259,35 €
5.2-	Execução da terra de serviço e terra de proteção	1,00	612,34 €	612,34 €
5.3-	Ferragens mais isoladores (inclui subida a poste a poste)	1,00	950,00 €	750,00 €
6-	Vala			

6.1-	Abertura e tapamento de Vala perfil MT (inclui reposição e transporte excedentes)	400,00	282,00 €	112 800,00 €
6.2-	Abertura e tapamento de Vala qualquer perfil (inclui reposição e transporte excedentes)	28,00	82,00 €	2 296,00 €
6.3-	Fornecimento e colocação tubo 125mm2	1200,00	6,58 €	7 896,00 €
6.4-	Fornecimento e colocação tubo 63mm2	452,00	4,27 €	1 930,04 €
6.5-	Fornecimento e colocação Cabo MT LSVAV 15kv (inclui terminações)	1272,00	52,00 €	66 144,00 €
6.6-	Acompanhamento arqueológico	30,00	320,00 €	9 600,00 €
6.7-	Acompanhamento policial	30,00	480,00 €	14 400,00 €
6.8-	Fornecimento e colocação Fita sinalização.	1200,00	1,20 €	1 440,00 €
6.9-	Reposição de pavimento (inclui 10 marcos sinalização MT)	400,00	21,00 €	420,00 €
7-	Rede de baixa tensão			
7.1-	Fornecimento e instalação Cabo lsvav 4x70+16 (inclui terminais).	424,00	12,88 €	5 461,12 €
7.2-	Instalação e fornecimento de armário X (inclui terra de proteção)	4,00	2 200,00 €	8 800,00 €
8-	Rede IP			
8.1-	Instalação e fornecimento de armário IP (inclui terra de proteção)	1,00	1 824,00 €	1 824,00 €
8.2-	Fornecimento e instalação Cabo lsvav 4x16 (inclui terminais).	452,00	7,61 €	3 439,72 €
8.3-	Fornecimento e colocação luminárias e braços (inclui cabo e terminais)	14,00	380,00 €	5 320,00 €
8.4-	Fornecimento e colocação de coluna de Iluminação pública 4 metros com eletrificação	14,00	1 279,00 €	17 906,00 €
9-	Manutenção preventiva a 20 anos	20,00	3 000,00 €	60 000,00 €
10-	Manutenção reativa a 20 anos	20,00	2 500,00 €	50 000,00 €
				385 120,26 €

Tabela 6:4: Estudo de investimento



A solução em análise, referente à rede compacta, exige um investimento inicial cerca de 35% superior ao da linha convencional (linha aérea). Contudo, ao considerar a redução dos custos operacionais e a diminuição das perdas associadas a interrupções no fornecimento de energia elétrica, esta opção revela-se mais económica do que a rede de cabos tradicionais a médio prazo, uma vez que as vantagens a longo prazo compensam o maior investimento inicial. Embora a linha subterrânea seja uma solução tecnicamente mais fiável, o seu custo inicial é significativamente mais elevado do que o da linha convencional, atingindo um aumento aproximado do dobro. É relevante destacar que, em caso de falha, a identificação e resolução do problema numa linha subterrânea tendem a ser mais complexas, devido à necessidade de intervenções mais profundas e dispendiosas.

Quadro de comparação técnico-económica entre soluções de rede.

Tabela 6:5: Quadro resumo comparação cenários

Critério	<i>Spacer Cable</i>	Aérea Convencional	Subterrânea
Custo inicial	Médio	Baixo	Muito elevado
Custo de manutenção	Baixo	Alto	Muito baixo
Risco de incêndio	Reduzido	Elevado	Muito reduzido
Impacto visual	Moderado	Elevado	Nulo
Flexibilidade de instalação	Alta	Alta	Baixa
Facilidade de manutenção	Alta	Alta	Baixa

No que diz respeito à linha de Mangualde, de MT, esta foi implementada por opção da E-Redes em nó aberto, o que significa que não há dados disponíveis sobre os custos ou o investimento em manutenção associados a essa infraestrutura. Esta falta de dados torna difícil avaliar o impacto económico e a eficácia das manutenções realizadas, limitando a análise comparativa com outras soluções de rede.

A análise demonstra que a solução *Spacer Cable* representa um equilíbrio entre custo, fiabilidade, sustentabilidade e segurança, sendo particularmente vantajosa em zonas com elevada densidade florestal ou onde existam restrições ambientais e urbanísticas.

Quadro comparativo técnico-económico, com estimativa de ROI para redes convencionais, compacta e subterrânea (só com o nível de energia média tensão).

Tabela 6:6: Quadro resumo comparação cenários

Critério	Rede Compacta	Rede Aérea Convencional	Rede Subterrânea	Observações
Custo de instalação (€)	100.000	70.000	250.000	Valores estimados por km
Custos de manutenção	Baixos	Médios	Muito baixos	Compacta reduz podas
Segurança contra incêndios	Alta	Baixa	Muito alta	Cabo coberto vs nu
Impacto ambiental visual	Médio	Alto	Muito baixo	Subterrânea invisível
Durabilidade esperada	25-30 anos	20-25 anos	40+ anos	Depende do solo
TIE (indicador fiabilidade)	muito baixo	moderado	muito baixo	Compacta e subterrânea são mais fiáveis
ROI estimado (anos)	8	5	20	Subterrânea tem alto CAPEX

7. CONCLUSÕES

Este capítulo está dividido em dois subcapítulos: o primeiro apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido, enquanto o segundo propõe linhas orientadoras para trabalhos futuros.

7.1 Principais Conclusões

O trabalho realizado teve como principal objetivo avaliar, de forma técnica, económica e ambientalmente sustentável, a viabilidade da integração de redes aéreas compactas do tipo *Spacer Cable* nas redes de distribuição MT, através da análise de um caso de estudo real no concelho de Mangualde.

O estudo desenvolvido permitiu identificar um conjunto robusto de vantagens associadas à tecnologia em análise, nomeadamente quando comparada com soluções tradicionais, como as redes aéreas com condutores nus e as infraestruturas subterrâneas. Entre os benefícios mais relevantes destacam-se: a melhoria da continuidade de serviço, a redução da área de servidão e aceiros, o menor impacto visual, a maior resiliência a fenómenos meteorológicos adversos e a competitividade económica em determinados contextos operacionais.

Do ponto de vista técnico, a tecnologia *Spacer Cable* destaca-se pela sua robustez mecânica e pelo seu desempenho elétrico fiável, permitindo a instalação de vãos mais longos e reduzindo a interferência com o meio envolvente. O sistema baseia-se na utilização de condutores cobertos, isto é, condutores metálicos com revestimento extrudido protetor, mas sem isolamento elétrico integral, suportados por espaçadores e por um cabo mensageiro. Esta configuração proporciona uma maior resistência a fenómenos naturais adversos, como vento, queda de ramos ou nidificação de aves, e contribui para a redução da frequência e da gravidade das interrupções no fornecimento de energia. Em consequência, observa-se uma melhoria mensurável nos indicadores de qualidade de serviço, nomeadamente no Tempo de Interrupção Equivalente (TIE).

Relativamente à segurança contra incêndios, a substituição de condutores nus por condutores cobertos contribui significativamente para a mitigação do risco de contacto elétrico com a vegetação, reduzindo assim a probabilidade de ignições, sobretudo em zonas florestais densas. Este aspeto adquire especial relevância no contexto português, onde a frequência de incêndios rurais com origem em infraestruturas elétricas tem causado consequências ambientais, económicas e sociais graves. O caso de estudo de Mangualde demonstra o potencial desta solução como elemento integrante de uma estratégia nacional de redução do risco de incêndio, promovendo redes mais seguras, resilientes e alinhadas com as atuais exigências de proteção civil e sustentabilidade territorial.

Do ponto de vista ambiental e ecológico, a redução das necessidades de poda, possibilitada pela menor distância de segurança exigida entre os condutores e a vegetação, favorece a preservação da flora nativa e da avifauna protegida, como é o caso da Abetarda. Esta tecnologia está em consonância com diretrizes europeias, em particular com a Diretiva Aves (79/409/CEE), bem como com protocolos nacionais destinados à proteção de zonas classificadas e espécies ameaçadas. Em contextos industriais ou em zonas urbanas densamente ocupadas, onde o espaço destinado a servidões elétricas é limitado, a aplicação de redes aéreas compactas permite uma gestão mais eficiente da ocupação do solo, reduzindo o impacto visual e facilitando a integração com outras infraestruturas existentes, como iluminação pública e redes de telecomunicações.

Apesar de o custo inicial ser superior ao de uma linha aérea convencional, a análise económica comparativa evidencia que, no dimensionamento de linhas MT, o sistema *Spacer Cable* apresenta um retorno de investimento (ROI) aceitável, estimado em cerca de oito anos. Este desempenho torna-se particularmente competitivo quando são considerados os benefícios indiretos, tais como a redução de falhas, a menor exigência em termos de manutenção preventiva e corretiva, e o impacto ambiental reduzido. Em contraste, a solução subterrânea, ainda que ofereça vantagens inegáveis do ponto de vista estético e de mitigação do risco de incêndio, apresenta um ROI substancialmente mais alargado, na ordem dos vinte anos, o que condiciona a sua viabilidade económica em diversos cenários, sobretudo em contextos rurais ou de orografia complexa.

Em síntese, a tecnologia analisada representa uma alternativa tecnicamente eficaz, economicamente viável e ambientalmente responsável, para a modernização das redes de distribuição elétrica MT, particularmente em territórios com elevada sensibilidade ambiental e/ou suscetibilidade a incêndios. A sua integração deve ser considerada nos planos estratégicos de investimento na infraestrutura elétrica, nomeadamente em zonas florestais, industriais e suburbanas, sempre que se justifique a conjugação entre o desempenho técnico, a continuidade do serviço e a compatibilidade com o meio ambiente.

7.2 Perspetivas de Trabalho Futuro

Do ponto de vista económico, a solução analisada posiciona-se como uma alternativa intermédia entre as redes aéreas tradicionais e as infraestruturas subterrâneas, combinando menor investimento inicial do que estas últimas com ganhos operacionais significativos. Tendo em vista o processo de concessão previsto para 2040, é expectável o surgimento de novos operadores com propostas tecnológicas diferenciadoras. Entre estas, destaca-se o potencial da utilização de postes poliméricos, cuja aplicação poderá conferir benefícios adicionais em termos de durabilidade, manutenção e impacto ambiental. A análise futura destas opções, constitui uma linha promissora para investigação na área das redes de distribuição.

Para além destas considerações, abrem-se diversas linhas de desenvolvimento que merecem exploração em trabalhos futuros. Em particular, destaca-se a possibilidade de expansão do presente estudo a outras regiões com características ambientais e operacionais distintas, de forma a avaliar a robustez e adaptabilidade da solução em contextos variados. Adicionalmente, importa aprofundar a análise do desempenho da tecnologia ao longo do tempo, considerando indicadores como a degradação dos materiais, a evolução dos custos operacionais e a resiliência face a eventos extremos.

Outro eixo de investigação relevante corresponde à integração da tecnologia Spacer Cable com fontes de energia renovável, especialmente em zonas remotas ou de difícil acesso, onde a resiliência e a modularidade das soluções de distribuição adquirem particular importância. Esta integração poderá contribuir para reforçar a sustentabilidade das redes de média tensão, assegurando simultaneamente uma maior flexibilidade na expansão da infraestrutura elétrica.

Estas perspetivas abrem caminho a desenvolvimentos futuros de carácter técnico, económico e ambiental, com relevância significativa para a modernização das redes de distribuição no contexto da transição energética e da descarbonização do setor elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pesquisa bibliográfica tendo sido consultada as seguintes publicações:

- [1] A. Bento-Gonçalves, *Os Incêndios Florestais em Portugal*, Lisboa: Fundação Francisco Manuel dos Santos, 2021.
- [2] A. Bento-Gonçalves, “Os incêndios florestais: das causas às consequências,” em *Conferências da Natureza*, Universidade do Minho, 2021.
- [3] *Hendrix*, “*Wildfire Mitigation – Hendrix Wildfire Risk Reduction*,” Marmon Utility, Milford, NH, USA, Brochure, July 2024. [Online]. Disponível em: <https://marmonutility.com/wildfire-mitigation/>, acedido em setembro de 2024.
- [4] M. Bolotinha, *Linhas Aéreas: Tipologias, Características, Equipamentos e Princípios Construtivos*, Engebook, Lisboa, nov. 2020.
- [5] *Hendrix*, “*Expanding the Grid Infrastructure with Aerial Spacer Cable Systems*,” T&D World, 9 Oct. 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.tdworld.com/transmission-reliability/article/21274748/expanding-the-grid-infrastructure-with-aerial-spacer-cable-systems>, acedido em outubro de 2024.
- [6] Manual de Procedimentos da Hendrix, disponível em: <http://www.hendrix-wc.com/>, acedido em novembro de 2024.
- [7] S. Santos et al., “*Spacer Design for 15 kV Compact Overhead Distribution Networks for Regions with High Environmental Aggressiveness*,” IEEE Latin America Trans., vol. 16, no. 10, pp. 2634-2639, Oct. 2018.
- [8] Montagem da rede de distribuição aérea protegida compacta (*spacer cable*), disponível em: <http://www.bandeirante.com.br/energia/index.asp>, em novembro de 2024.
- [9] Manual de publicidade da *Hendrix* – disponibilizado via e-mail pela *Hendrix*, acedido em dezembro de 2022.
- [10] J. D. Bouford, “*Spacer cable reduces tree caused customer interruptions*,” in Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Expo., Chicago, IL, USA, Apr. 21-24, 2008.
- [11] ICNF, *Manual de apoio à análise de projetos relativos à instalação de linhas aéreas de distribuição e transporte de energia elétrica – Componente Avifauna* (versão revista), Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, Lisboa, 2019.
- [12] EDP Distribuição – Energia, S.A., *DFT-C11-310/N – Dispositivos para a proteção de avifauna: Fichas Técnicas*, DTI – Direção de Tecnologia e Inovação, Lisboa, mar. 2017.

- [13] E-Redes, “Nós e o Planeta – Proteção da Biodiversidade,” [Online]. Disponível em: <https://www.e-redes.pt/pt-pt/sustentabilidade/nos-e-o-planeta/protecao-da-biodiversidade>, em novembro de 2024.
- [14] D. X. Viegas et al., “O Complexo de Incêndios de Pedrógão Grande e Concelhos Limítrofes, Iniciado a 17 de Junho de 2017,” Relatório Técnico, Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, ADAI/LAETA, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, out. 2017.
- [15] R. Espino-Cortés et al., “*Performance of a Spacer Cable System Under Polluted Conditions*,” IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 30, no. 6, pp. 29-37, Nov./Dec. 2014.
- [16] EDP Distribuição, 2007, Rede aérea compacta de média tensão (*Spacer Cable*), Guia técnico – DRE – C11-320/E.
- [17] Processo de licenciamento do condutor *Aerial Cable (Spacer Cable)* da EDP Distribuição, 2007.
- [18] B. J. Trager and G. Grenier, “*Safety-Related Contact Currents for Humans Touching Medium Voltage Covered Conductors*,” Hendrix/Marmon Utility LLC, Milford, NH, USA, 2017.
- [19] R. Rocha et al., “*New Technologies, Standards, and Maintenance Methods in Spacer Cable Systems*,” IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 2, pp. 562-566, Apr. 2002.
- [20] Portfólio de Obras da empresa Visotela — Sociedade Técnica de Electromecânica, Lda, Disponível em: <http://www.visotela.pt/>, acedido em novembro de 2024.

ANEXO I – DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

O dimensionamento mecânico foi feito de acordo com o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão e o vento foi considerado como atuando na direção horizontal. Deste modo, a área da superfície batida pelo vento deverá ser, para todas as estruturas e isoladores, a da projeção dessa superfície num plano normal à direção do vento e, para os cabos *Aerial Cable* 15 kV e cabo tensor 252 AWA, a da respetiva secção longitudinal de área máxima. Em todos os cálculos é considerada a pressão do vento sobre os três cabos *Aerial Cable* 15 kV e o tensor 252 AWA. Cumulativamente, deve ser adicionado o efeito do vento sobre os espaçadores.

O dimensionamento mecânico do sistema foi igualmente definido tendo em consideração que:

- O peso total do sistema inclui o peso do tensor 252 AWA, dos cabos *Aerial Cable* 15 kV e dos espaçadores;
- O vento a atuar sobre o tensor 252 AWA, os três cabos *Aerial Cable* 15 kV e dos espaçadores;
- O esforço mecânico resultante da ação do vento e do peso é suportado apenas pelo tensor 252 AWA (cabo mensageiro).

A tensão máxima de trabalho definida para o cabo tensor 252 AWA deverá ser sempre inferior ao quociente da sua tensão de rotura por 2,5.

O cálculo da resistência mecânica é executado de acordo com o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão, Artigo 21.º, fora das zonas de gelo, para a mais desfavorável das hipóteses seguintes:

- Temperatura de +15°C e vento máximo habitual;
- Temperatura de -5°C e vento reduzido.

As flechas máximas para conjunto composto por tensor e cabos são calculadas para a temperatura de +50°C.

Ficou definido o coeficiente de forma igual a 1, conforme o Artigo 15.º do Regulamento Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão para Condutores e cabos de guarda, tendo sido igualmente considerado que o coeficiente de forma dos espaçadores será de 1. De acordo com o Artigo 14.º do RSLET o coeficiente de redução é igual a 0,6 para condutores e cabos de guarda.

A tensão máxima de trabalho que foi definida para o cabo Tensor 252 AWA teve em atenção a regra de ser inferior ao quociente da sua tensão de rotura por 2,5, pelo que a tensão máxima de trabalho é 36,3 daN/mm² para o tensor 252 AWA.

Os resultados dos cálculos efetuados de acordo com os critérios estabelecidos estão representados no quadro Cabos Tensores – Resultado do cálculo mecânico para 15 kV, onde também é indicado o respetivo coeficiente de segurança.

As flechas de montagem, as trações de montagem e as flechas máximas estão apresentadas nas tabelas que constituem as Tabela de flechas de montagem (m).

Ficou definido que a regulação do Tensor deve ser efetuada antes da montagem dos Cabos Condutores (*Aerial Cable* 15 kV).

Tabela de apoios – Cálculo mecânico cabo tensor:

Tabela AI:1: Cálculo mecânico tensor [17].

Tensor	Condutor	Suporte	Tensão máxima do tensor (daN/mm ²)	Vão de cálculo (m)	Flecha 50°C (m)	Parâmetro 50°C (m)	Coeficiente de segurança
252 AWA	1/0 AWG 15 kV	RTL-15	35,5	70	2,57	237	2,56

Cálculo do Peso Total por metro:

O peso total w_{total} por metro de cabo será:

- O peso dos cabos condutores é constante, já que eles estão em todo o comprimento.
- O peso do espaçador será considerado em intervalos de 10 metros.

Para cada 10 metros de cabo, teremos:

$$w = \left(P_{mensagem} + 3 \cdot P_{condutor} + \frac{P_{espaçador}}{10} \right) \cdot g \quad (1)$$

$$w = \left(0,324 + 3 \cdot 0,32 + \frac{1,1}{10} \right) \cdot 9,81 = 13,68 \text{ N/m} \approx 1,368 \text{ daN/m}$$

- Vento considerado horizontal
- Coeficientes:

Redução (α): 0,6

Forma (c): 1

Carga de vento total por metro:

$$F_{total} = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S_{total} \quad (2)$$

$$F_{total} = 0,6.1. q \cdot (d_{tensor} + 3 \cdot d_{condutor} + d_{espaçador}) \quad (3)$$

Com q conforme RSLEAT para pressão dinâmica.

A flecha total pode ser estimada por:

$$f = \frac{wl^2}{8H} \quad (4)$$

Mas como o cabo sofre alongamento devido à temperatura e à sua elasticidade, a tração H é ajustada com o seguinte termo:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l + \frac{w^2 \cdot l^3}{24 \cdot E \cdot A} \quad (5)$$

sendo:

- α – coeficiente de dilatação linear ($14,4 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)
 - ΔT – variação de temperatura ($^\circ\text{C}$)
 - l – comprimento do vão (m)
 - w – peso por metro do sistema (N/m)
 - $E \cdot A$ – rigidez axial (N)
 - $\frac{w^2 \cdot l^3}{24 \cdot E \cdot A}$ – termo de alongamento elástico
- (6)

A equação final para H corrigida torna-se implícita e iterativa:

$$\frac{l_{final} - l_{inicial}}{l} = \alpha \cdot \Delta T + \frac{w^2 \cdot l^2}{24 \cdot E \cdot A} \quad (7)$$

E a nova flecha com $H_{corrigida}$:

$$f = \frac{w \times l^2}{8 \times H_{corrigida}} \quad (8)$$

Foram extraídas em SÍTDM as seguintes tabelas.

Tabela de flechas de montagem (m):

Tabela AI:2: Tabela de flechas de montagem (m) [17].

Temperatura	Vão (m)						
°C	10	20	30	40	50	60	70
0	0,02	0,09	0,19	0,34	0,56	0,91	1,33
10	0,04	0,13	0,26	0,42	0,66	1,02	1,44
20	0,07	0,18	0,33	0,51	0,76	1,12	1,55
30	0,10	0,23	0,40	0,59	0,85	1,22	1,65

Tabela de tração de montagem (daN):

Tabela AI:3: Tração de montagem (daN) [17].

Temperatura	Vão (m)						
°C	10	20	30	40	50	60	70
0	190	191	192	193	181	160	149
10	111	128	143	154	153	143	138
20	60	90	111	127	134	130	128
30	40	69	92	109	119	120	120

Flechas máximas (50 C°)

Tabela AI:4: Flechas máximas (50C°) [17].

Temperatura	Vão (m)						
(50°C)	10	20	30	40	50	60	70
Flecha (m)	0,15	0,37	0,66	1,03	1,46	1,98	2,58
Tração (daN)	102	313	578	876	1195	1511	1839
Param. (m)	81	134	169	195	215	227	238

ANEXO II – CÁLCULO MECÂNICO E ELÉTRICO DO ISOLAMENTO

Cálculo mecânico e elétrico do isolamento:

- Tensão – 15 kV
- Tensão mais elevada – 18 kV
- Tensão de contornamento sob chuva (U_{ch})
- U_{ch} não deverá ser inferior a:

$$U_{ch} = \frac{\sqrt{2} U_m}{\sqrt{3}} = 2,45 U_m \text{ kV} \quad (9)$$

$$U_{ch} < 2,45 U_m = 2,45 \times 18 = 44,1 \text{ kV}$$

De acordo com o artigo 50 do RSLEAT, o local de construção da linha é classificado como zona de nível de poluição fraca. Assim, a linha de fuga nominal específica mínima entre fase e terra que vamos considerar é de 16 mm/kV. ($L_{fe}=16 \text{ mm/kV}$) (tensão composta).

O comprimento mínimo da linha de fuga será:

$$LFT \geq L_{fe} \times U_m \Leftrightarrow LFT \geq 16 \times 15 \Leftrightarrow LFT \geq 240 \text{ mm.}$$

ANEXO III – DIMENSIONAMENTO DE APOIOS

A altura dos apoios neste projeto específico foi de 14 metros, de acordo com as cotas de terreno. A distância entre apoios foi de 40 metros, de modo a ser integrada no mesmo apoio a rede de média tensão, baixa tensão e iluminação pública. Após cálculos ficou definido instalar apoios 1600/540 14 nos apoios de reforço e nos restantes 600/250 14, atendendo ao RSLEAT para as situações descritas nos Artigos 56º a 62º. A força devida à ação do vento em linhas convencionais é considerada apenas a atuar sobre os condutores.

Nesta rede compacta, os condutores de fase são suspensos no cabo tensor e apoiados em espaçadores. Como tal, a força devida à ação do vento a ser considerada é a que atua sobre o cabo tensor, os 3 cabos condutores e o espaçador. A força total será:

$$F_{total} = F_{tensor} + 3 \times F_{condutor} + F_{espaçador} \quad (10)$$

em que

$$F = \alpha \cdot c \cdot q \cdot s \quad (11)$$

e

α – coeficiente de redução;

c – coeficiente de forma;

q – pressão dinâmica do vento, em Pascal;

s – área da superfície batida pelo vento, em m².

O estabelecimento de dois ou mais circuitos de linhas aéreas de alta tensão, em apoios comuns, e o estabelecimento de linhas aéreas de baixa tensão e telecomunicações, permite otimizar a utilização de apoios e de traçados.

Os resultados dos cálculos efetuados de acordo com os critérios estabelecidos encontram-se expostos na Tabela AIII:1.

Tabela AIII:1: Força do vento sobre o conjunto (daN/m) [17].

Tensor	Condutor	Espaçador	Força do vento sobre o conjunto (daN/m)
252 AWA	1/0 AWG 15 kV	RTL-15	3,53

Após piquetagem, como a linha foi projetada para média tensão, baixa tensão e iluminação pública, a distância entre apoios vai ser aproximadamente 40 metros, perfazendo 10 apoios.

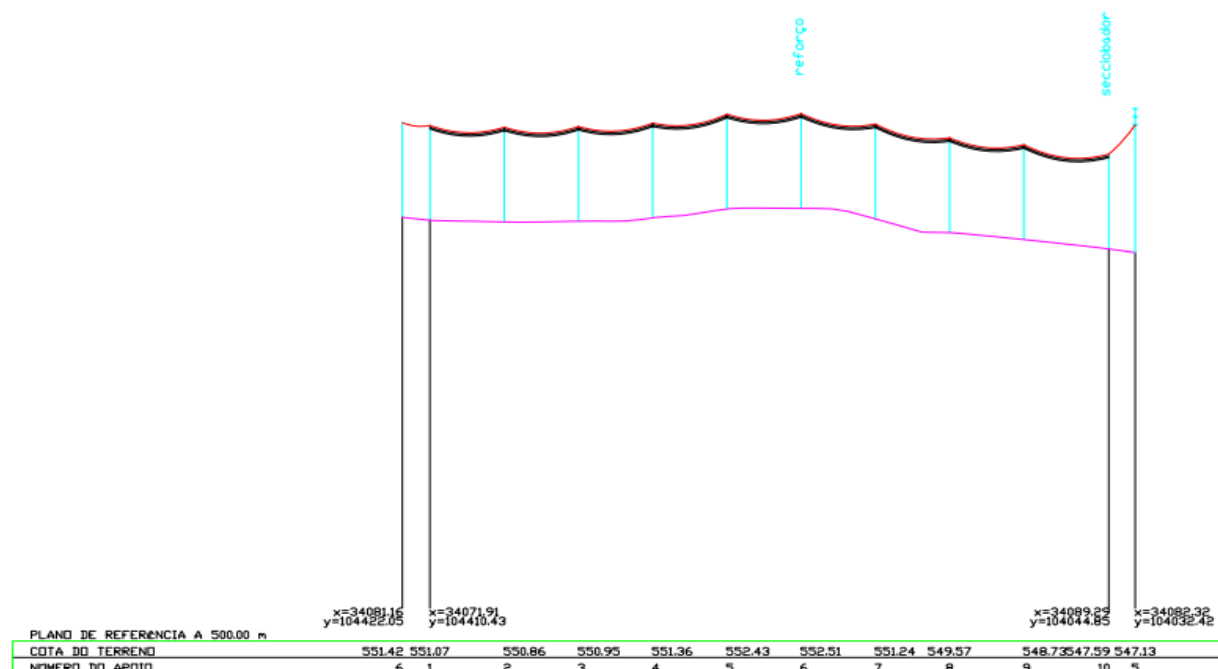


Figura AIII.1: Piquetagem e numeração dos apoios [17].

O esforço horizontal na cabeça do poste:

$$H = \frac{wl^2}{8f} \quad (12)$$

onde:

- H : esforço horizontal (N ou daN)
- w : peso linear total da rede (N/m)
- l : vão entre postes (m)
- f : flecha (m)

O esforço vertical inclui o peso próprio da rede (MT, BT e iluminação) atuando sobre o apoio:

$$V = wl \quad (13)$$

onde:

- V : esforço vertical (N ou daN)
- w : peso linear total (N/m)
- l : metade do vão anterior mais metade do vão seguinte (m)

Ficaram após cálculos dimensionados assim os apoios em SIT:

Apoio 1 - 1600/540 14

Apoio 2 - 600/250 14

Apoio 3 - 600/250 14

Apoio 4 - 600/250 14

Apoio 5 - 600/250 14

Apoio 6 - 1600/540 14

Apoio 7 - 600/250 14

Apoio 8 - 600/250 14

Apoio 9 - 600/250 14

Apoio 10 - 1600/540 14

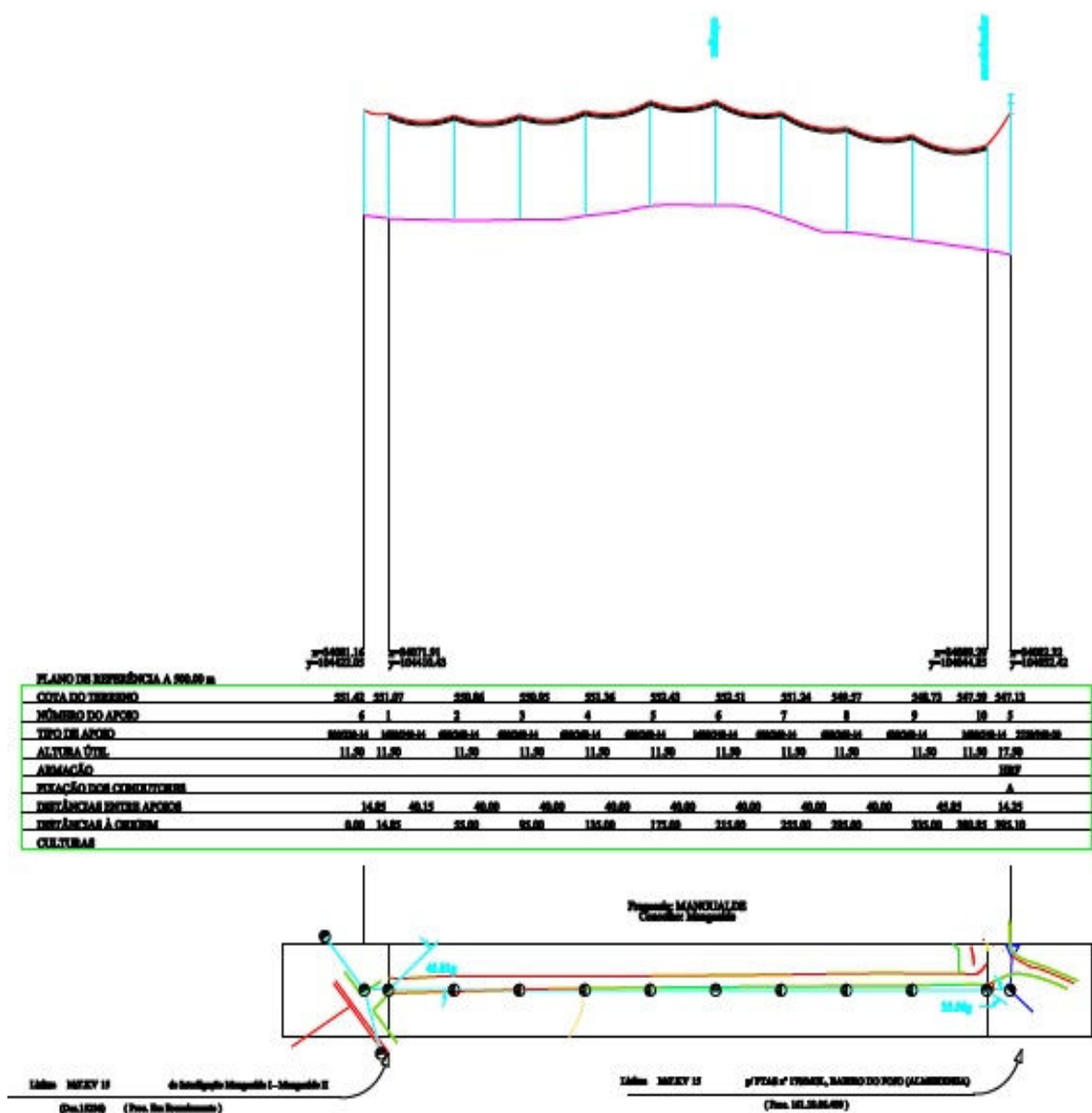


Figura AIII.2: Projeto em SIT [17].

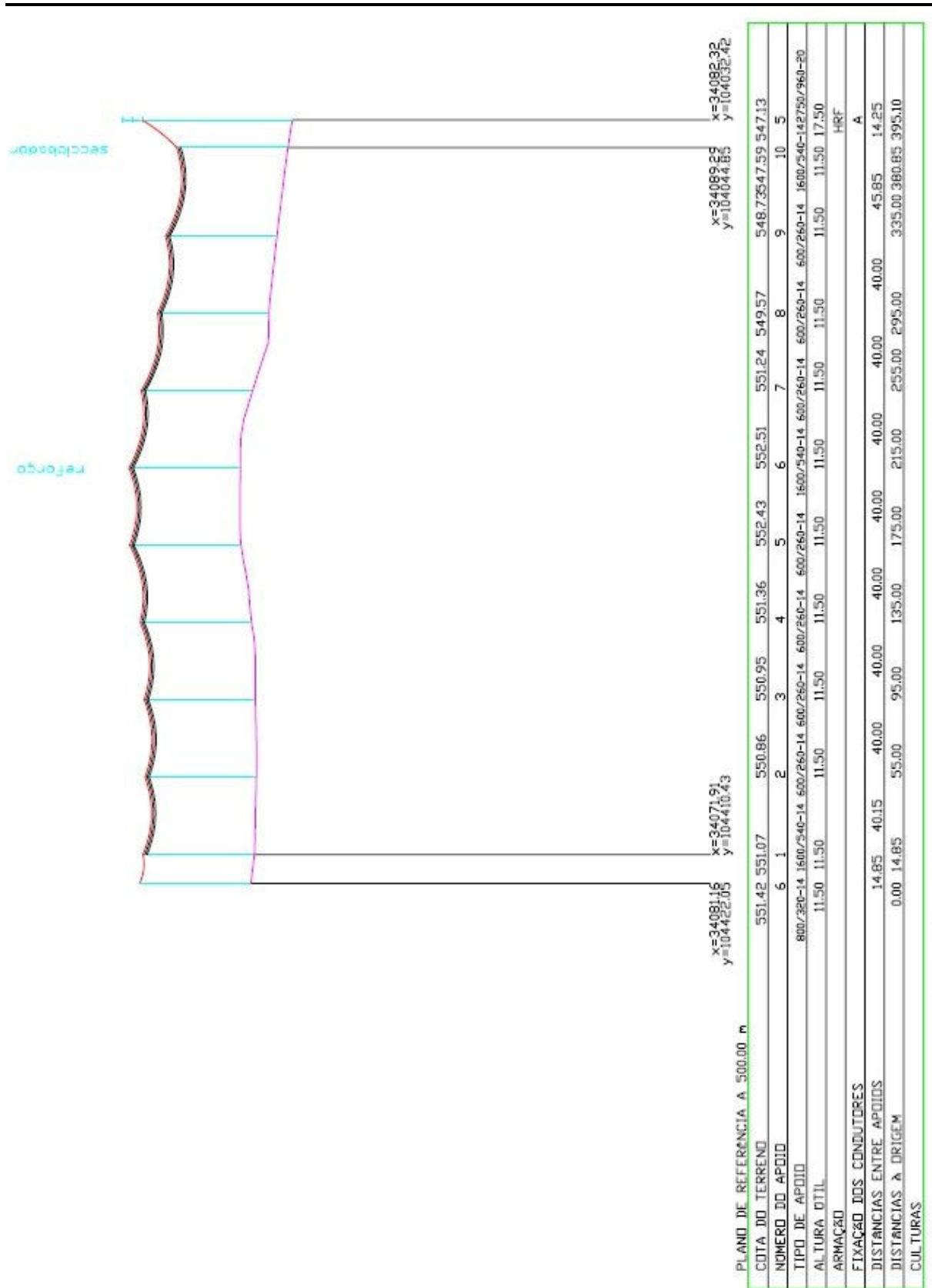


Figura AIII.3: Detalhe em SIT [17].

Os maciços foram escolhidos com base no esforço total (resultante vetorial de H e V) e de acordo com a tabela do RSLEAT e recomendações da DGEG, para solos de classe média.

$$R = \sqrt{H^2 + V^2} \quad (14)$$

Para os apoios 1600/540 14:

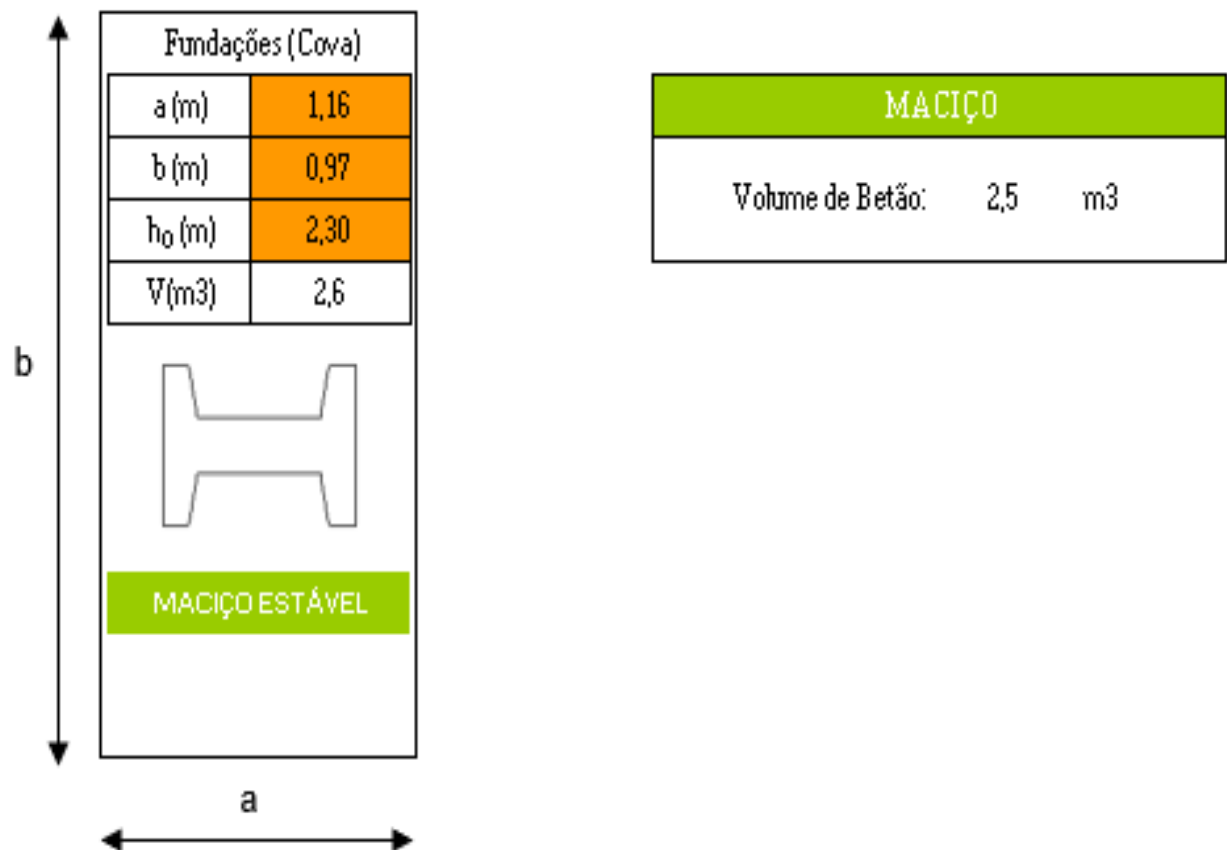


Figura AIII.4: Fundações de apoio 1600/540 14 [17].

Para os apoios - 600/250 14:

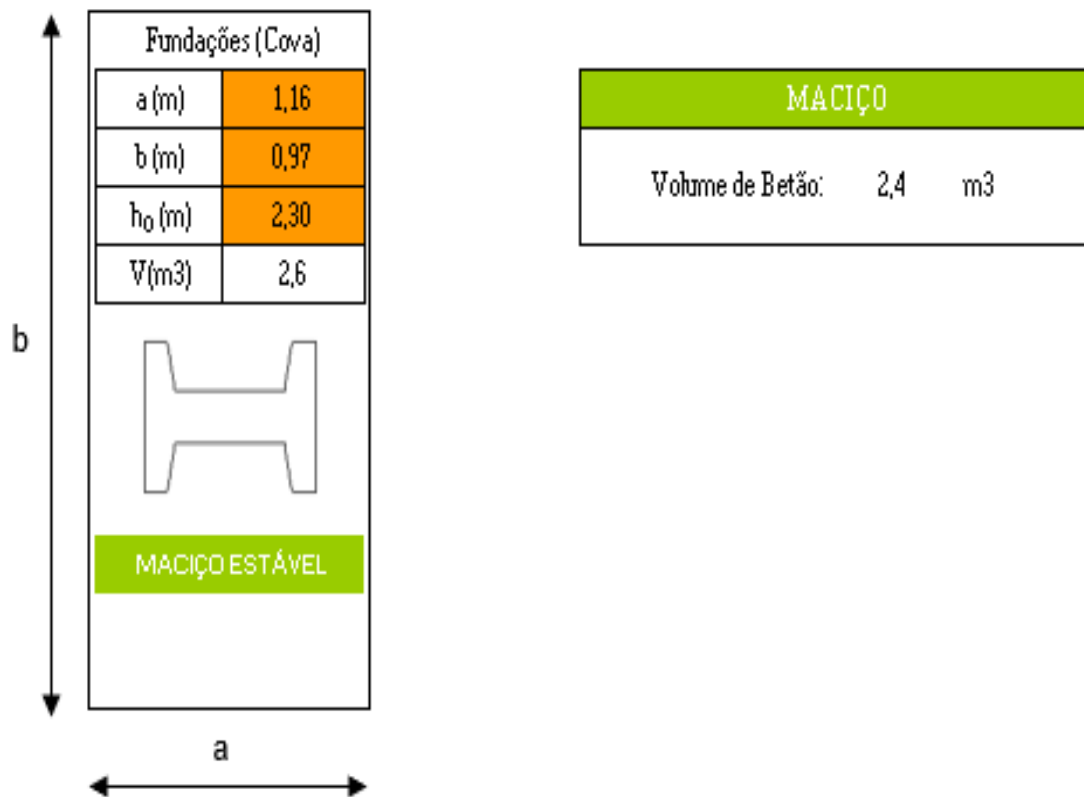
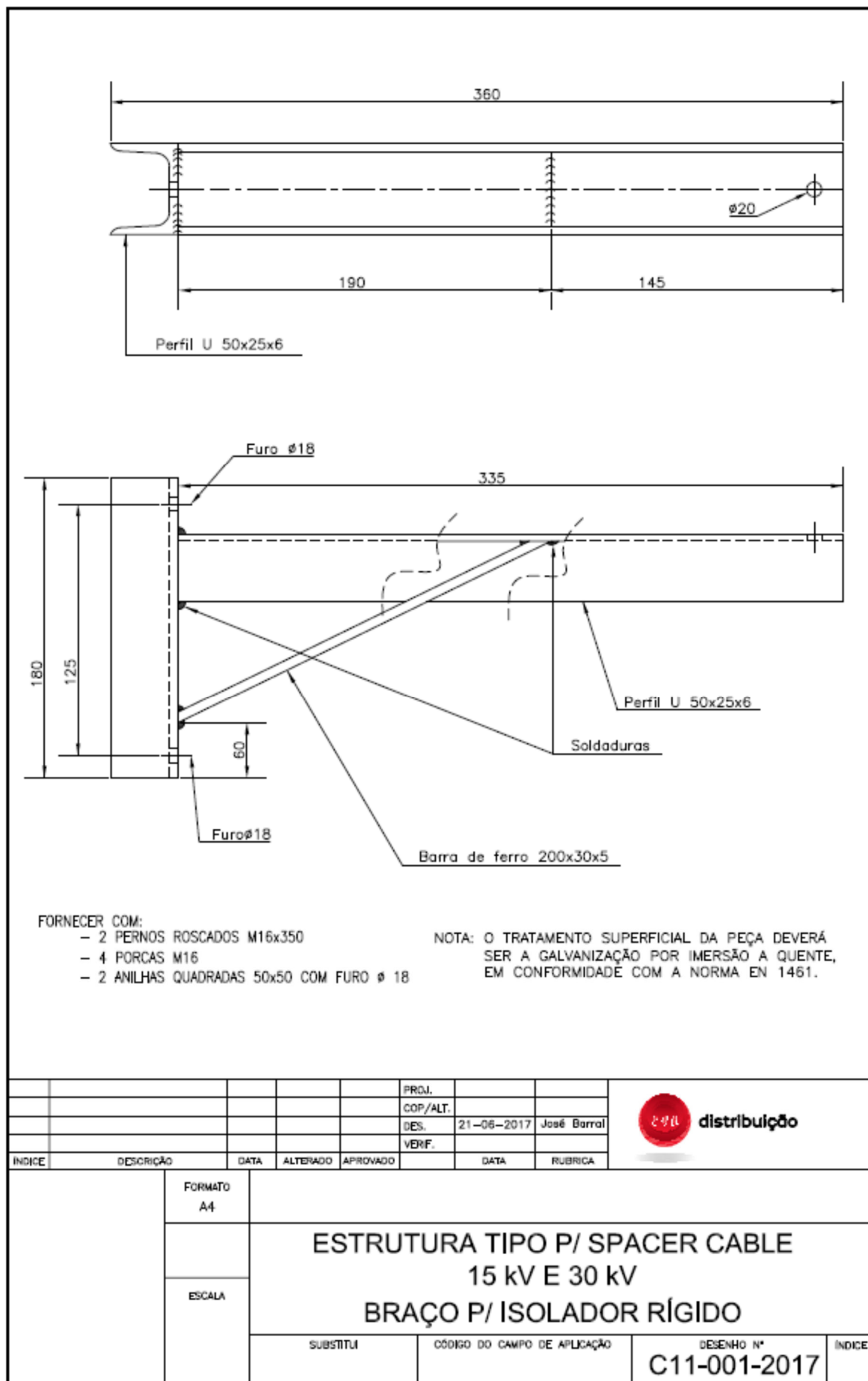
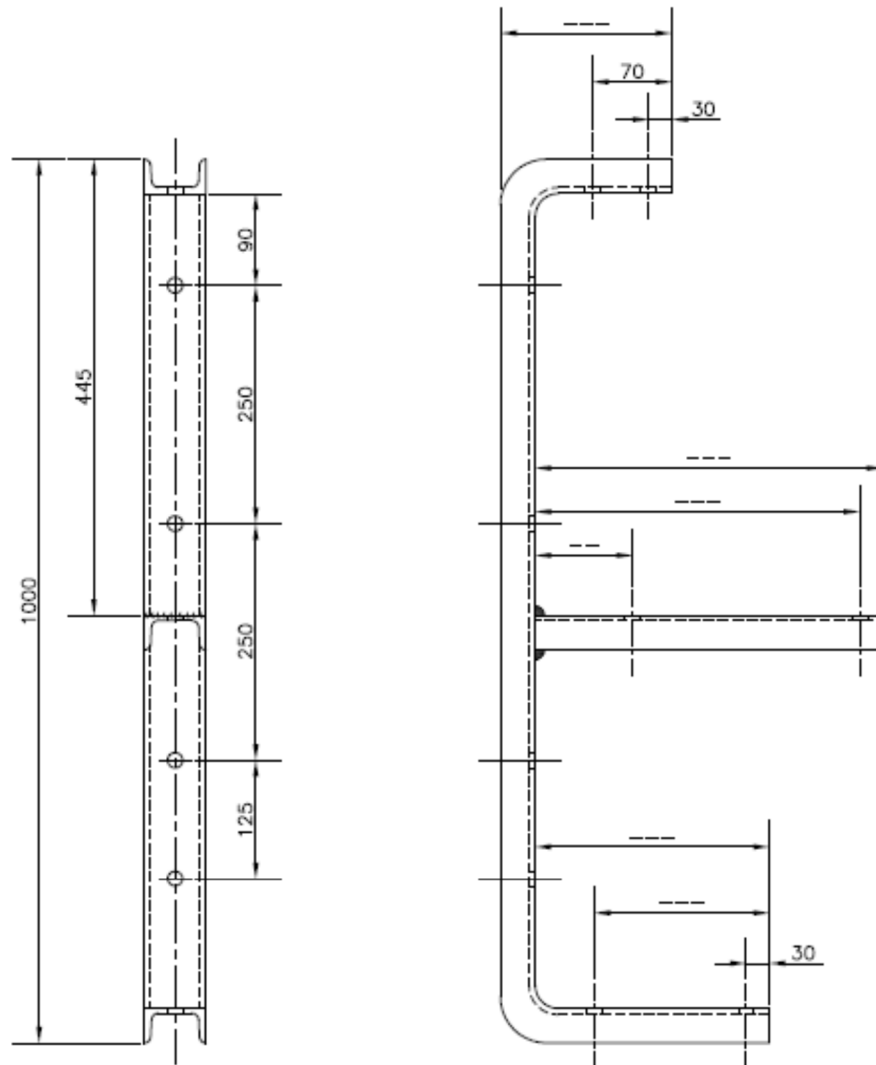


Figura AIII.5: Fundações de apoio 600/250 14 [17].

ANEXO IV – ESTRUTURAS

Desenhos (N.º desenho)	Designação desenho
C11-001-2017	Estrutura tipo p/ <i>Spacer Cable</i> – 15 e 30 kV - Braço p/ isolador rígido
C11-002-2017	Estrutura tipo p/ <i>Spacer Cable</i> – 15 kV - Armação p/ ângulos 20 grados
C11-003-2017	Estrutura tipo p/ <i>Spacer Cable</i> – 15 e 30 kV - Armação para amarração/fim de linha/ ângulo/derivação
C11-004-2017	Estrutura tipo p/ <i>Spacer Cable</i> – 15 e 30 kV - Armação para derivação e alinhamento
C66-002A-2006	Armações de esteira horizontal p/ derivação - HRFSC/EDP 80-100-120
C66-015-2006	Ferragem suporte p/ DST/Cx terminal - Transição aérea/subterrânea
C66-026-2006	Ferragem OEVR-16
C66-027-2006	Manilha para ferragem OEVR-16
C66-046-2005	Manilha MU 16-82
C66-043-2005	Estribos - QZ 16-70-140 QZ 16-70-190 QZ 16-70-230

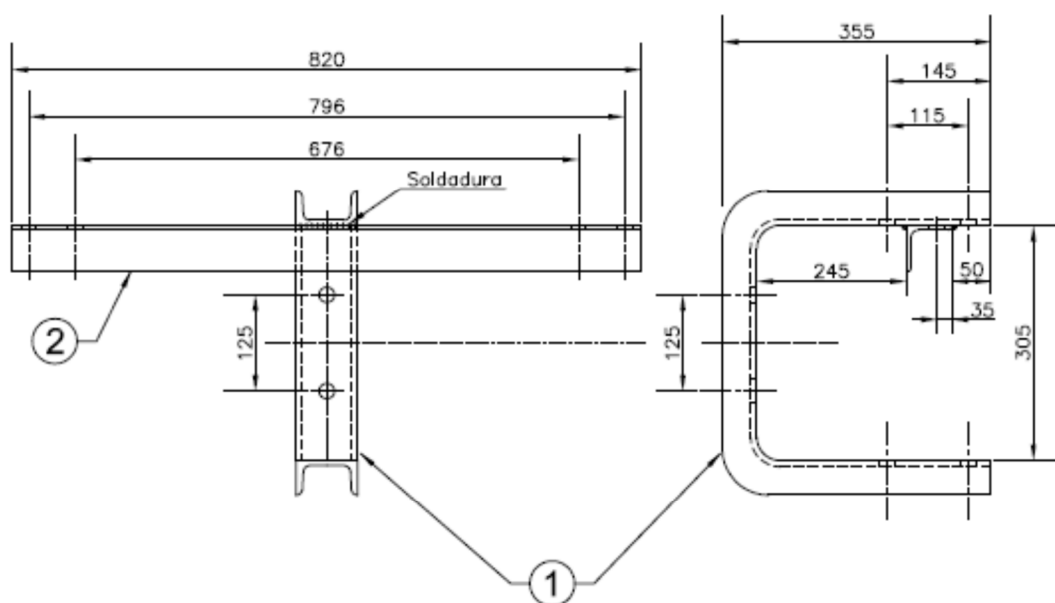




NOTAS:

- 1- PEÇA EM PERFIL U 80x45x8 (NP 338).
- 2- TODA A FURAÇÃO É DE Ø 20
- 3- O TRATAMENTO SUPERFICIAL DA PEÇA DEVERÁ SER GALVANIZADO POR IMERSÃO A QUENTE, EM CONFORMIDADE COM A NORMA EN 1461.

					PROJ.			
					COP/ALT.			
					DES.	21-06-2017	José Barrol	
					VERIF.			
ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO		DATA	RUBRICA	
	FORMATO A4							
	ESCALA	ESTRUTURA TIPO P/ SPACER CABLE 15 kV ARMAÇÃO P/ ÂNGULOS < 20 graus						
		SUBSTITUI	CÓDIGO DO CAMPO DE APLICAÇÃO				DESENHO N.º C11-002-2017	ÍNDICE

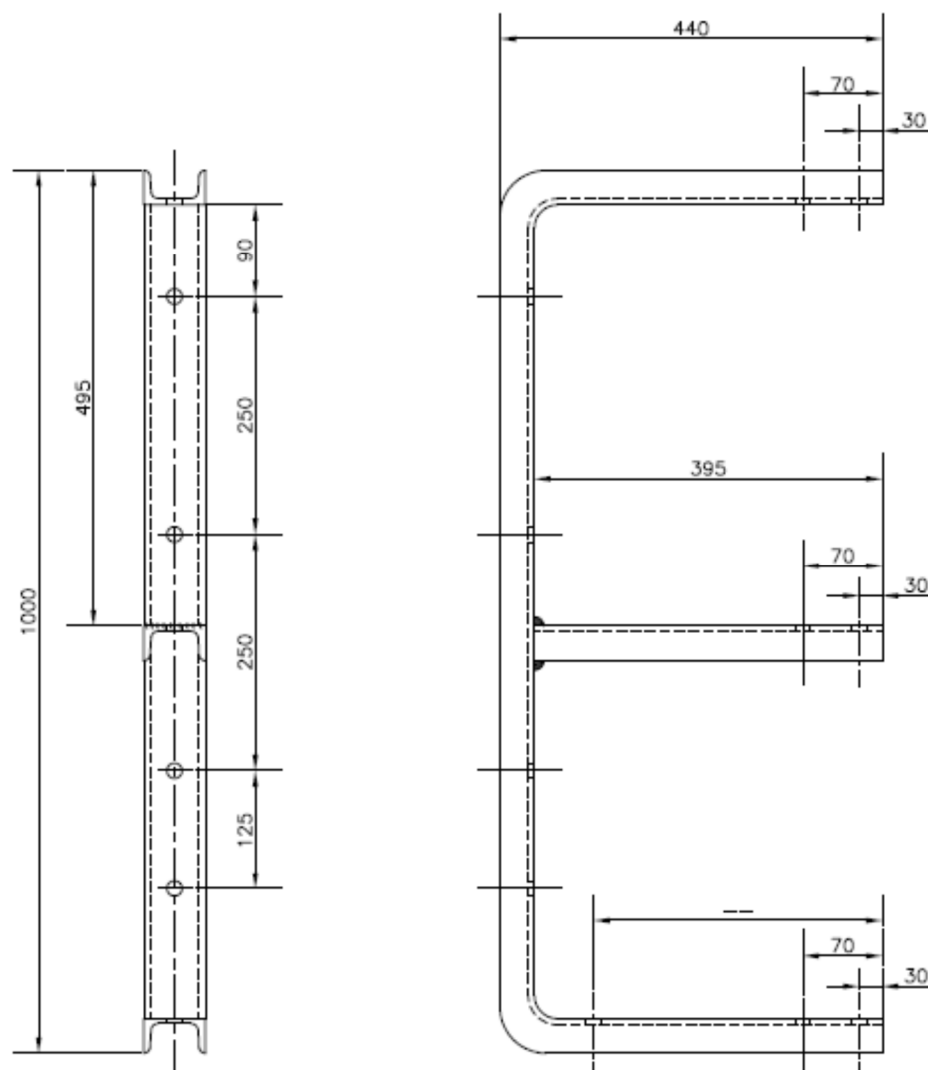


- ① Perfil U 80x45x8 (NP 338)
- ② Perfil L 60x60x6 (NP 335)

NOTA: O TRATAMENTO SUPERFICIAL DA PEÇA DEVERÁ SER A GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE, EM CONFORMIDADE COM A NORMA EN 1461.

TODA A FURAÇÃO É DE Ø 20

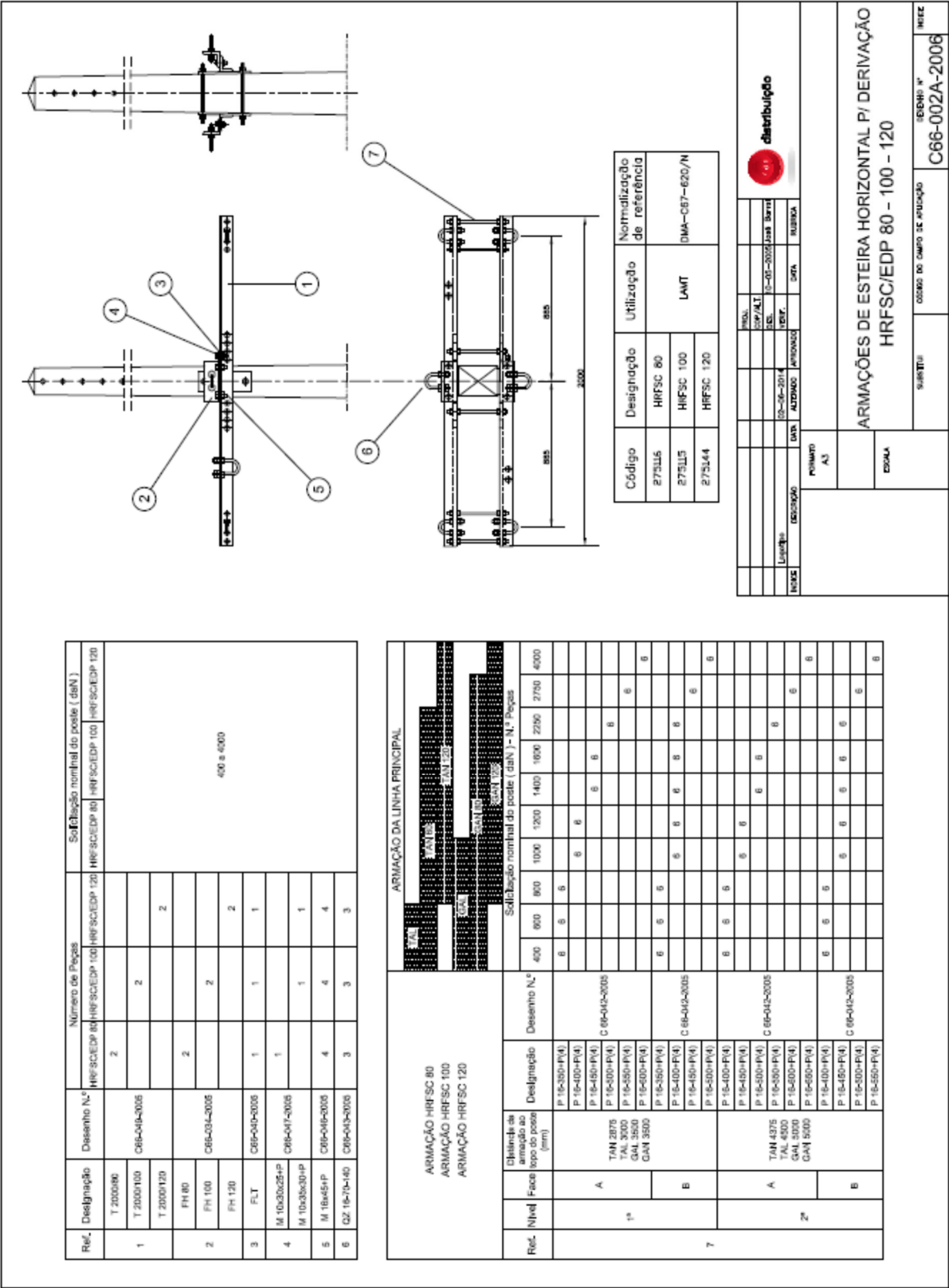
					PROJ.			 distribuição
					COP./ALT.			
					DES.	21-06-2017	João Barrol	
					VERIF.			
ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO		DATA	RUBRICA	
	FORMATO A4							
		ESTRUTURA TIPO P/ SPACER CABLE 15 E 30 kV						
	ESCALA	ARMAÇÃO P/ AMARRAÇÃO/FIM DE LINHA/ ÂNGULO/ DERIVAÇÃO						
		SUBSTITUI	CÓDIGO DO CAMPO DE APLICAÇÃO			DESENHO N.º	ÍNDICE	
						C11-003-2017		

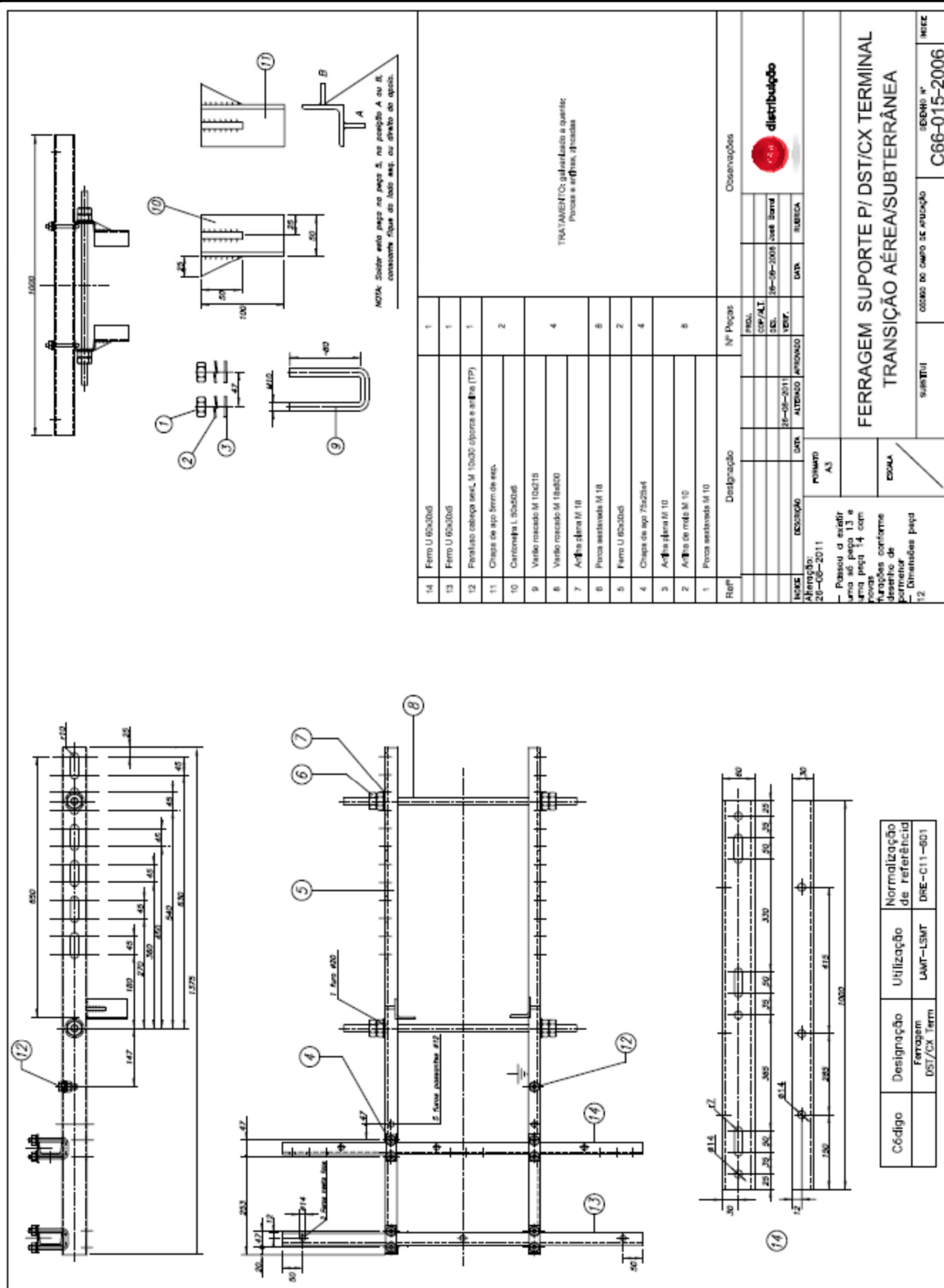


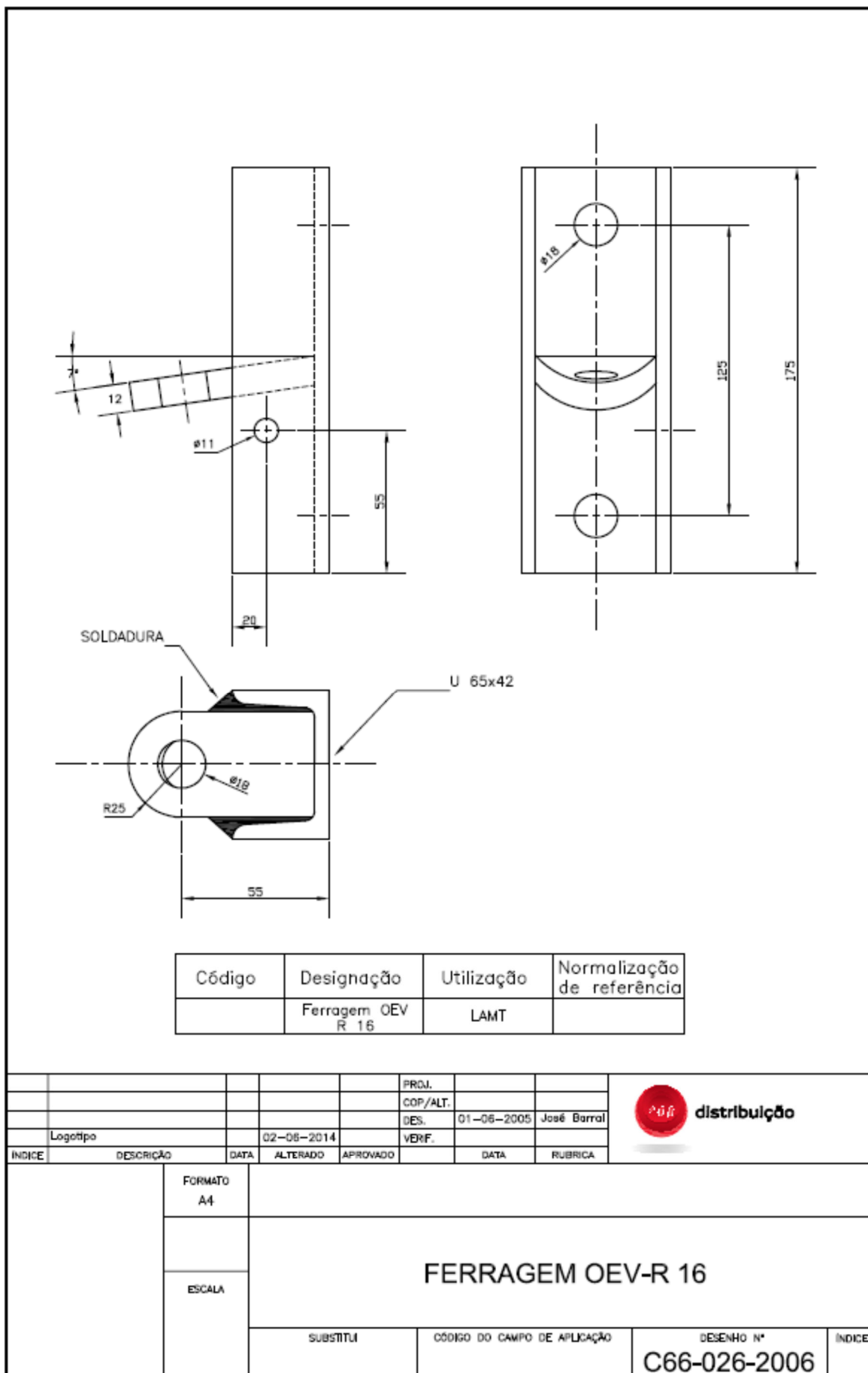
NOTAS:

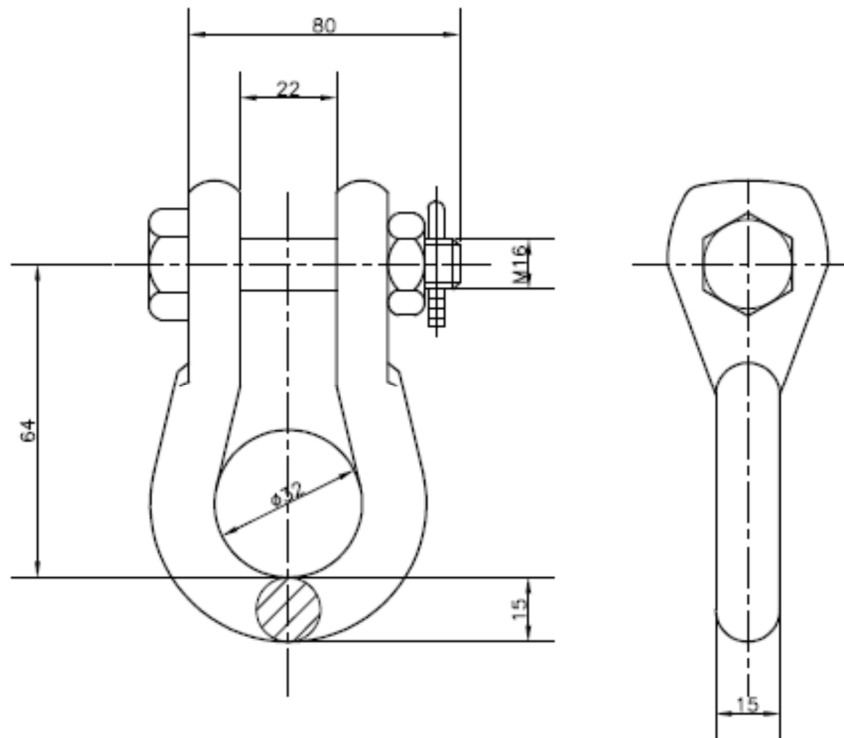
- 1- PEÇA EM PERFIL U 80x45x8 (NP 338).
- 2- TODA A FURAÇÃO É DE ϕ 20
- 3- O TRATAMENTO SUPERFICIAL DA PEÇA DEVERÁ SER GALVANIZADO POR IMERSÃO A QUENTE, EM CONFORMIDADE COM A NORMA EN 1461.

					PROJ.			
					COP/ALT.			
					DES.	21-07-2017	José Barrai	
					VERIF.			
ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO		DATA	RUBRICA	
	FORMATO A4	ESTRUTURA TIPO P/ SPACER CABLE 15 E 30 kV ARMAÇÃO P/ DERIVAÇÃO E ALINHAMENTO						
	ESCALA							
		SUBSTITUI			CÓDIGO DO CAMPO DE APLICAÇÃO		DESENHO N.º	ÍNDICE
							C11-004-2017	



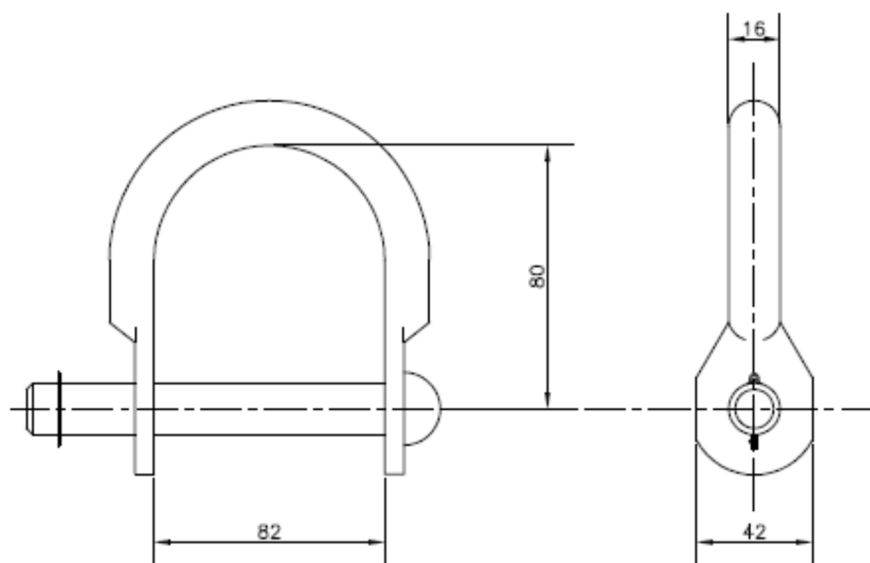






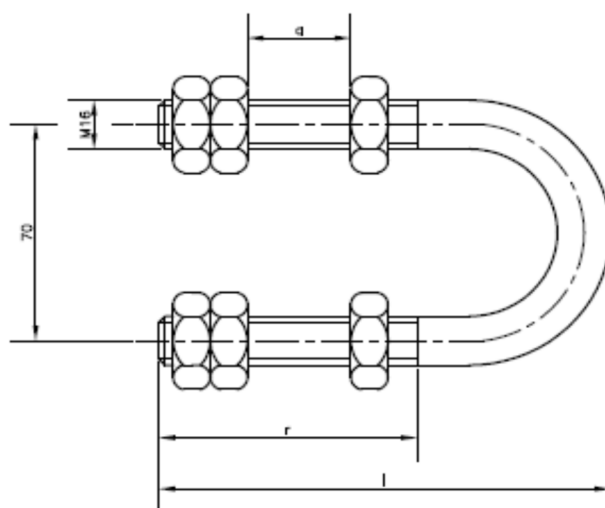
Código	Designação	Utilização	Normalização de referência
	Manilha ferrag OEVR16	LAMT	

					PRD.			
					COP/ALT.			
					DES.	01-06-2005	João Baral	
					VER.			
Logotipo		02-06-2014						
ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO		DATA	RUBRICA	
	FORMATO A4							
	ESCALA	MANILHA P/ FERRAGEM OEVR 16						
		SUBSTITUI	CÓDIGO DO CAMPO DE APLICAÇÃO		DESENHO Nº		ÍNDICE	
					C66-027-2006			



Código	Designação	Utilização	Normalização de referência
	Manilha Mu 16-82	Armações: TAN-VAN	Des n.º 04.05.570 DGE

					PROJ.			 distribuição
					COP/ALT.			
					DES.	14-06-2005	José Barral	
					VERIF.			
ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO		DATA	RUBRICA	
	FORMATO A4	MANILHA MU 16-82						
	ESCALA							
		SUBSTITUI	CÓDIGO DO CAMPO DE APLICAÇÃO			DESENHO N.º	ÍNDICE	
						C66-046-2005		



Designação	Dimensões (mm)		
	l	r	a
QZ • 16 • 70 • 140	140	80	33
QZ • 16 • 70 • 190	190	130	83
QZ • 16 • 70 • 230	230	170	123

					PROJ.			
					LEV. TOP.			
					DES.	23-06-2005	José Barral	
					VERIF.	03-08-2005	Gaspar	
ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO		DATA	RUBRICA	
	FORMATO A4							
	ESCALA 1:2	ESTRIBOS QZ 16-70-140 QZ 16-70-190 QZ 16-70-230						
		SUBSTITUI	CÓDIGO DO CAMPO DE APLICAÇÃO			DESENHO N.º	ÍNDICE	
						C66-043-2005		

Fonte: E-redes, DRP-C11-621, 2018



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra