

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais

José Pedro Martinho Queirós

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Julho de 2013

Resumo

A presente dissertação pretende demonstrar as principais características das tecnologias mais comuns para garantir o isolamento entre os condutores de linhas aéreas e as estruturas de apoio em sistemas de amarração e suspensão. Destes, destacam-se os isoladores cerâmicos do tipo campânula e espigão constituídos por dielétricos de porcelana e vidro, para os quais se procura descrever os principais constituintes e arranjos mais comuns. Além disso, evidencia-se a maturidade deste tipo de tecnologia derivado das várias décadas de utilização em sistemas de transmissão de energia.

Procura-se também descrever de uma forma mais detalhada a tecnologia dos isoladores compósitos em face do estado de evolução deste tipo de equipamentos. Salientam-se vários relatos de aplicação nos diferentes níveis de tensão dos sistemas elétricos e consequentes dados de performance. São apresentados registos dos vários tipos de degradação verificados nas estruturas de ambas as tecnologias e os principais agentes responsáveis pela mesma, além de uma comparação entre as vantagens tecno-económicas que estas representam.

Por fim, neste documento descreve-se ainda os esforços desenvolvidos para a montagem do novo Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a sua constituição, disposição dos equipamentos e técnicas normalizadas para realização de ensaios elétricos. São apresentados os resultados destes ensaios à rigidez dielétrica a isoladores compósitos e de porcelana destinados a redes de 150 kV e consequente análise do desempenho de ambos.

Abstract

The present dissertation aims to demonstrate the main characteristics of the most common technologies to ensure the isolation between line conductors and support infrastructures in suspended and strain systems. From those are highlighted the ceramic cap and pin insulators with glass and porcelain dielectrics, for which are described the principal arrangements and compositions. Furthermore, it's pointed de maturity of this kind of technology due to the several decades of implementation in energy transmission systems.

By the same hand, it's intended one description of the composite insulators' technology regarding to this equipment's state of evolution. Many practical reports and data are pointed for different voltage levels applied. Moreover, it's presented the types of deterioration recorded in the structure of both types of technologies during service time and the stress agents responsible for them, besides the technical and economic advantages in their application.

Finally, in this document it's described the efforts taken in the assembling of FEUP's new High Voltage Laboratory, its constitution, equipment disposition, and normalized techniques required to the dielectric strength tests on composite and porcelain insulators'. High voltage tests are made on both technologies and conclusion are presented.

Agradecimentos

Aqui gostaria de deixar umas palavras de apreço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram durante a realização deste trabalho e me acompanharam durante o meu percurso académico, sentindo que muitas vezes as palavras não fazem jus ao sentimento de gratidão que possuo por essas pessoas.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura pela oportunidade de participar no projeto do novo Laboratório de Alta Tensão, pela orientação, confiança, e motivação demonstrada ao longo deste período. Além disso, agradeço também pela importância que teve nas minhas escolhas académicas, e pelo contributo que teve na minha formação.

Devo também uma palavra de grande estima ao Eng. Vasques de Carvalho por todo o valioso conhecimento partilhado durante este período, pelo entusiasmo demonstrado, e sobretudo por todo o apoio prestado na busca por informação pertinente à caracterização dos mais variados equipamentos.

Agradeço ao Sr. Eng. José Figueiredo da REN pelo fornecimento dos isoladores compósitos necessários à realização dos ensaios elétricos, e ao Sr. Eng. Gil Vicente Marcelino pela bibliografia facultada.

Aos meus pais, Armando e Adélia Queirós, por todo o apoio, pela confiança, pelo esforço, pelo amor e carinho mostrados ao longo de todos estes anos. A eles lhes dedico esta meta, porque foram eles que sempre me inspiraram a alcançá-la. Agradeço também pelos valores que me transmitiram, pela motivação e compreensão nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão Sérgio pelos mundos e fundos que sempre me proporcionou. Agradeço-lhe toda a partilha do valioso conhecimento prático, por me ensinar o que até então desconhecia, pela paciência e confiança depositada, mas sobretudo pelo companheirismo, pelo carinho e por desde sempre ser o meu exemplo a seguir. À Lisete pelo alojamento e paciência.

A todos os meus amigos que me neste percurso académico, sobretudo ao Carlos Queirós, ao João Moura, ao Nuno Soares e ao Ricardo Ferreira, bem como a todos aqueles que cresceram a meu lado e com os quais partilho uma longa e forte amizade, são eles o Diogo Soares, a Mara Silva, o Marcos Alves e o Riccardo Azevedo. A todos eles lhe agradeço o apoio, companheirismo e bons momentos que partilhámos até agora.

Por fim, uma palavra mais especial à Daniela. A ela lhe devo mais do que posso exprimir, por todas as vezes que me iluminou o caminho quando era mais difícil de percorrer, por ser a minha confidente, pelo amor que sempre me reconfortou, pelo apoio e inspiração, pela motivação e pelo orgulho que sempre me mostrou.

José Pedro Martinho Queirós

*“A alma é divina e a obra é imperfeita.
Este padrão signala ao vento e aos céus
Que, da obra ousada, é minha a parte feita:
O por fazer é só com Deus.*

*E ao imenso e possível oceano
Ensinam estas Quinas, que aqui vês,
Que o mar com fim será grego ou romano:
O mar sem fim é portuguez.”*

Padrão de Fernando Pessoa

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Objetivos	1
1.2	Estrutura da dissertação	2
2	Isoladores Cerâmicos	5
2.1	Coordenação de isolamento	5
2.2	Isoladores de campânula e espigão	7
2.3	Isoladores de porcelana	12
2.4	Isoladores de vidro	14
3	Isoladores Compósitos	17
3.1	Constituição física e design	18
3.1.1	Terminais de ligação	18
3.1.2	Núcleo	21
3.1.3	Revestimento	22
3.2	Constituição do revestimento	22
3.2.1	Design	24
3.2.2	Polímeros base	26
3.2.3	<i>Fillers</i>	31
4	Degradação da estrutura	33
4.1	Monitorização e manutenção	34
4.2	Tipos de envelhecimentos dos isoladores compósitos	36
4.2.1	Danos nos isoladores	41
4.3	Modos de avaria	45
4.4	Defeitos nos isoladores cerâmicos	48
5	Solicitações em Serviço	53
5.1	Fatores ambientais	54
5.1.1	Poluição atmosférica	54
5.1.2	Radiação ultravioleta	57
5.1.3	Gelo	58
5.2	Atividade elétrica	59
5.2.1	Efeito Coroa	60
5.2.2	Descargas em bandas secas	64
5.3	Esforços mecânicos	67

6	Casos de Aplicação e Vantagens Tecno-Económicas	69
6.1	Vantagens dos isoladores compósitos	71
6.2	Vantagens dos isoladores cerâmicos	74
6.3	Aplicações práticas de compósitos	75
6.3.1	Salt River Project	75
6.3.2	Public Service Electric and Gas	76
6.3.3	Xcel Energy	76
6.3.4	NorthWestern Energy	77
6.3.5	Florida Power and Light	77
6.3.6	Qatar General Electricity and Water Corporation	77
6.3.7	Saudi Electricity Company	78
6.3.8	State Grid Corporation of China e China South Grid	79
6.3.9	Electric Israel	79
6.3.10	Rede Elétrica Nacional	81
7	Laboratório de Alta Tensão	83
7.1	Constituição do LAT	83
7.1.1	Medidas de segurança passivas	84
7.1.2	Medidas de segurança ativas	86
7.2	Gerador de choque	87
7.2.1	Ensaio à onda de impulso	89
7.3	Equipamento de ensaio à frequência industrial	91
7.3.1	Ensaio à frequência industrial	93
7.4	Montagens elétricas e procedimento para ensaios de isoladores	94
7.4.1	Montagem de isoladores de suporte	95
7.4.2	Montagem de isoladores de linha	95
8	Ensaio Elétrico	97
8.1	Objetos de estudo	97
8.2	Montagens realizadas	100
8.3	Procedimento	101
8.4	Análise dos resultados	106
9	Conclusões e Trabalhos Futuros	109
9.1	Considerações finais	109
9.2	Trabalhos futuros	112
	Referências	113

Lista de Figuras

2.1	Linha de fugas de um isolador compósito (esq) e de um isolador de suspensão do tipo cãmpanula e espigão [2].	8
2.2	Distância de arco dos isoladores compósitos (esq) e de uma cadeia de suspensão (dir) [2].	8
2.3	Conexão entre campânula e espigão.	9
2.4	Configuração de um isolador de campânula e espigão [3].	10
2.5	Cálculo da distribuição do tensão mecânica (em MPa) num isolador de porcelana com 80 kN de carga: o valor A=-16, B= -11, C=-8, D=-4, E=0, F=4, G=8, H=12 e I=16 (adaptado de [3]).	11
2.6	Exemplo de colagem de areia a garantir maior aderência entre o cimento e o material dielétrico.	12
2.7	Isoladores de porcelana para suporte de linhas elétricas, sendo que o exemplar da direita foi revestido com borracha de silicone em toda a sua superfície.	14
3.1	Componentes típicos de um isolador compósito (adaptado de [6])	19
3.2	Sistemas de Ligação entre núcleo fibroso e terminais por (a) compressão, (b) colagem e (c) cunha interna [3]	20
3.3	Corte axial do terminal de ligação tipo compressão de um isolador compósito [7]	20
3.4	Exemplo de Fratura Frágil [8]	22
3.5	Estrutura molecular polímero EPM	23
3.6	Exemplos da estrutura do revestimento: a) diretamente moldado no núcleo; b) Peças múltiplas; c) peças múltiplas ligadas a núcleo com bainha [3].	25
3.7	Espécimens de teste para comparação dos efeitos das abas: a) Núcleo; b) Isolador de saias iguais; c) isolador de abas alternadas. [9].	26
3.8	A) Polímero sem tensão, onde os pontos simbolizam as interligações entre cadeias; b) Polímero sobre tensão. Quando for retirada a carga voltará à situação A.	27
3.9	Amostras de diferentes composições de EPDM e SiR por percentagem de peso [15]	29
3.10	Efeitos das diferentes misturas na resistência à tração em comparação com: a) resistência ao rastejamento; b) rigidez dielétrica [15]	30
3.11	Efeitos das diferentes misturas na resistência à tração em comparação com: a) resistividade superficial; b) resistividade volumica [15]	30
3.12	Principais variações nas propriedades elétricas e mecânicas da mistura 50:50 em relação com 100% de SiR [15]	31
3.13	Principais variações nas propriedades elétricas e mecânicas da mistura 50:50 em relação com 100% de SiR [18]	32
4.1	Caso de branqueamento do isolador compósito com especial incidência numa das faces [21].	37

4.2	Exemplo de mudança de cor do revestimento de um isolador compósito [22].	37
4.3	Exemplo de fissuras nas abas do revestimento [22].	38
4.4	Exemplo de fissuras nas abas do revestimento [22].	38
4.5	Exemplo de escamação avançada (esquerda) e ligeira (direita) [21].	39
4.6	Erosão ligeira numa aba perto do terminal metálico [21].	39
4.7	Caso de desunião entre aba e revestimento [22].	40
4.8	Deformação do perfil das abas adquirindo forma ondulada [22].	40
4.9	Fuga de massa em locais de contacto entre aba e revestimento do núcleo [21].	41
4.10	Corrosão no terminal metálico, à qual é atribuída a classificação de B [21]	41
4.11	Perda parcial de hidrofobia localizada perto dos terminais metálicos. [21]	42
4.12	Caso de ocorrência de rastejamento severo perto do terminal metálico [21].	42
4.13	Interligação queimada devido a contornamento [21].	43
4.14	Exemplo de pequena perfuração no revestimento do isolador na parte inferior, o qual pode rapidamente expandir-se para uma situação semelhante à do topo [21].	44
4.15	Desunião entre aba e revestimento do núcleo [21].	44
4.16	Caso de erosão severa na aba e revestimento do núcleo [21].	44
4.17	Degradação severa do revestimento e exposição do núcleo, resultante de ações de atividades elétricas na superfície [21].	45
4.18	Exemplificação de fratura frágil com registo de planos fratura, laminação e espigão [21].	46
4.19	Vara FRP seccionada axialmente com registo de rastejamento devido a disrupções internas [21].	47
4.20	Carbonização da vara FRP e conseqüente falha mecânica [21].	48
4.21	Separação do núcleo dos terminais metálicos devido à decomposição da matriz de resina e excesso de carga mecânica [21].	48
4.22	Caso de múltiplas perfurações no volume de porcelana, identificáveis pela cor mais escura [29].	50
4.23	Classificação de zonas de maior probabilidade de ocorrência de fenómenos de perfuração em isoladores do tipo campânula e espigão [29].	51
4.24	Exemplo de fratura radial devido ao crescimento do volume do cimento [29].	51
5.1	Caso de transferência de propriedade hidrofóbica para camada de poluição [30].	55
5.2	Formação de camada vertical de gelo num isolador cerâmico com perfil alternado [35].	59
5.3	Ocorrência de efeito coroa num isolador compósito [29].	61
5.4	Aumento do campo elétrico no ponto de junção tripla [6]	61
5.5	Distribuição do campo elétrico ao longo de uma superfície polimérica seca (esq), com uma gota ao centro (meio) e com cinco gotas (dir) [37].	62
5.6	Simulação do campo elétrico médio ao longo da superfície do isolador em superfície seca (azul) e molhada (verde) [38].	62
5.7	Comportamento de gotas de água na presença de diferentes intensidades de campo elétrico [39].	63
5.8	Exemplo de aplicação de anel de coroa num isolador compósito [21].	64
5.9	Cálculo da distribuição de campo elétrico ao longo do isolador compósito com e sem anel de coroa [38].	65
5.10	Seqüência de eventos para formação de descargas em banda seca.	66
5.11	Forma incorreta de içar um isolador compósito. A corda deve ser atada nos terminais metálicos por forma a não danificar as abas [42].	68

6.1	Grafismo onde são indicados o número de registos para cada tipo de falha dos isoladores compósitos por classificação das empresas ou EPRI. A parcela N/A corresponde a situações para as quais não foi possível atribuir uma causa específica por falta de informação ou por ainda se encontrar em investigação. Note-se que o número de registos mundiais é reduzido, visto que o inquérito incidiu sobretudo em empresas norte-americanas [42].	71
6.2	Linha de transmissão chinesa de 1000 kV AC com isoladores compósitos [47].	79
6.3	Número de saídas de serviço anuais de linhas de alta tensão por 100 km conseqüentes de poluição acumulada nos isoladores e causas desconhecidas, após implementação de isoladores compósitos [48].	80
6.4	Evolução do número de apoios com isoladores compósitos (valores acumulados) [49].	81
7.1	Pontos de ligação das terras do LAT ao barramento de cobre.	84
7.2	Interligação entre anel superior e anel principal.	85
7.3	Pormenor do barramento de terra na travessa da porta de entrada para a sala de comando e ligação da rede de proteção ao mesmo.	85
7.4	Áreas do LAT e disposição dos equipamentos na sala de ensaios. Ambos os sistemas possuem mobilidade para avançar para o centro ou recuar ao canto por forma a manter as distâncias de segurança.	86
7.5	Quadro de controlo de equipamentos do LAT e representação dos níveis de segurança do mesmo.	87
7.6	Equipamentos do sistema de gerador de impulsos: a) torre de gerador (esq) e divisor de tensão (dir); b) retificador; c) unidade de controlo.	88
7.7	Ligações e interrupções necessárias para limitação de andares do gerador de choque: 1) barra metálica de curto-circuito entre andares; 2) interrupção das resistências em série; 3) curto-circuito entre terminais do primeiro condensador não usado; 4) último condensador carregado; 5) últimas resistências em paralelo.	89
7.8	Onda de impulso completa com definição do tempo de subida (T_1), tempo de cauda (T_2) e origem virtual (O_1) [50].	90
7.9	Onda de impulso cortada na frente e determinação do tempo de corte [50].	91
7.10	Equipamentos do sistema de frequência industrial: a) transformador (esq) e divisor de tensão (dir); b) regulador; c) unidade de controlo.	93
7.11	Montagem de isolador de suporte segundo os parâmetros estipulados pela norma IEC 60168, e relação entre os tamanhos dos seus constituintes: h é a altura do isolador; L a da largura chapa U; d o diâmetro das ferragens; k a altura da base; t o tamanho do tubo; M o tamanho da chapa U.	96
7.12	Montagem de isolador em suspensão segundo os parâmetros estipulados pela norma IEC 60383, e relação entre os tamanhos dos seus constituintes: h designa a altura da cadeia, e d o diâmetro do isoladores.	96
8.1	Isoladores para realização de ensaios dielétricos: a) isolador compósito novo (esq) e usado (direita); b) cadeia de isoladores de porcelana. A deposição de sedimentos no isolador usado é destacada pela cor castanha adquirida.	98
8.2	Pormenor de hidrofobia dos isoladores compósitos: a) isolador compósito novo; b) isolador compósito usado e coberto com sedimentos.	99
8.3	Configuração da montagem efetuada para ensaio dos isoladores. Note-se que a descida do condutor de terra deve ficar suficientemente distante do tubo sob tensão, por forma a não ocorrerem descargas intempestivas.	101

- 8.4 Comparação gráfica dos valores médios de tensão de ruptura obtida entre ensaios a seco e superfície molhada para os equipamentos em causa. 106
- 8.5 Coalescência da água pulverizada nas extremidades do isolador de porcelana. . . 107

Lista de Tabelas

4.1	Condição e prioridade de manutenção de um isolador compósito segunfo EPRI [21]	37
5.1	Descrição aproximada de em ambientes típicos para os vários níveis de poluição [31]	56
7.1	Tolerâncias permitidas entre os valores especificados e valores obtidos [50].	91
8.1	Características físicas e mecânicas dos isoladores compósitos ensaiados.	99
8.2	Características físicas e mecânicas de cada unidade de isolador de porcelana da cadeia ensaiada.	100
8.3	Valores dos expoentes m e w como função do parâmetro g [50]	103
8.4	Dados relativos à medição das condições atmosféricas e resultados dos coeficientes necessários à normalização da tensão de contornamento.	104
8.5	Valores de tensão de ruptura registados (U) para os ensaios realizados em kV e respetivos correcções para as condições atmosféricas normalizadas (U_0), bem como o valor médio dos resultados obtidos.	105
8.6	Tempo necessário ao contornamento com 90% e 95% do valor médio de tensão de ruptura para os isoladores ensaiados, com limite de aplicação de 1 minuto.	105

Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas:

ATH	Alumina Trihydrate
CEI/IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional / International Electrotechnical Commission
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
EPM	Ethylene Propylene Monomer
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer
EPRI	Electrical Power Research Institute
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FRP	Fibre Reinforced Polymer
g/m^3	grama por metro cúbico
hPa	hectopascal
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LFE	Linha de Fuga Efetiva
kg	kilograma
kJ	kilojoule
kN	kilonewton
kV	kilovolt
mm	milímetro
mm/kV	milímetro por kilovolt
nm	nanometro
seg	segundos
Si-C	Ligação química entre moléculas de silicone e carbono
Si-O	Ligação química entre moléculas de silicone e oxigénio
SiR	Silicone Rubber
UV	Ultravioleta

Lista de Símbolos:

σ	Densidade relativa do ar calculada
ε_r	Permeabilidade elétrica relativa
h	Humidade absoluta calculada
h_0	Humidade absoluta de referência
$h\%$	Humidade relativa medida
k_1	Coefficiente de correção da densidade do ar
k_2	Coefficiente de correção da humidade do ar
k_t	Coefficiente de correção da tensão de disrupção calculado
p	Pressão atmosférica absoluta medida
p_0	Pressão atmosférica absoluta de referência
t	Temperatura medida
t_0	Temperatura de referência
U	Valor de tensão de disrupção obtido
U_0	Valor de tensão corrigido em função das condições atmosféricas presentes
U_{50}	Valor de tensão cuja probabilidade de disrupção é de 50%
U_{F-F}	Tensão Fase-Fase
U_{F-T}	Tensão Fase-Terra

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

O projeto de linhas elétricas envolve a escolha e dimensionamento de vários equipamentos necessários à funcionalidade do sistema de transmissão de energia, dos quais se destacam os isoladores pela dupla funcionalidade de suporte dos condutores elétricos e separação dos pontos de fixação com diferentes potenciais. Em condições normais estes equipamentos garantem o isolamento entre as linhas elétricas e as estruturas de suporte ligadas à terra. Porém, essa capacidade pode ser comprometida pelas condições ambientais e de serviço a que estes estão sujeitos, permitindo descargas disruptivas entre os seus terminais. A ocorrência do curto-circuito leva à saída de serviço das linhas de transmissão, afetando o fornecimento de energia elétrica e os elevados níveis de confiança exigidos. Portanto, o dimensionamento dos isoladores é um fator deveras relevante durante a projeção dos troços de linhas elétricas, visto ser necessário garantir a maior fiabilidade possível ao sistema em função das solicitações a que estes equipamentos vão ser sujeitos durante o seu tempo de vida útil.

A proliferação dos materiais poliméricos permitiu desenvolver uma tecnologia concorrente aos isoladores cerâmicos, largamente utilizados para os vários níveis de tensão e tipos de aplicação. Os isoladores compósitos apresentam-se como uma alternativa cada vez mais fiável, com provas de mérito reconhecidas em vários casos de aplicação prática. No entanto, o facto do revestimento exterior ser um material orgânico pode originar degradações da sua estrutura ao longo do tempo de serviço. Esta possibilidade de envelhecimento suscita suspeitas quanto ao seu desempenho após alguns anos de atividade, nomeadamente nas suas capacidades mecânicas.

Durante várias décadas, o desenvolvimento e desenho dos isoladores estiveram estagnados, muito devido aos fundos reduzidos na investigação, conseqüentes da grande concorrência e baixos preços de venda. Já durante a década de 60, o desenvolvimento das cadeias de polímeros prometiam fortes desempenhos mecânicos e elétricos quando aplicadas em isoladores. Nesse período, os processos de produção rudimentares e os tipos de materiais utilizados tornavam os isoladores suscetíveis a grande degradação, surgindo inúmeros relatos de falhas estruturais e de isolamento

que comprometiam a estabilidade dos sistemas elétricos. Não obstante, a performance encorajadora dos materiais poliméricos levou a investigações em grande escala por forma a estender a sua duração média de vida para lá dos 30 anos. A sua evolução consistiu no desenvolvimento e teste de vários materiais, designs e métodos de produção, onde foram atingidos padrões importantes para um funcionamento mais fiável e de longa duração, ultrapassando as dificuldades iniciais.

Quatro décadas passadas desde as suas primeiras aplicações, e muitos estudos ainda decorrem por forma a avaliar a fiabilidade desta nova tecnologia que ainda cai em descrédito, apesar das várias vantagens já comprovadas.

No presente trabalho pretende-se caracterizar a constituição dos equipamentos mais comuns nas linhas elétricas, com especial ênfase ao estado atual dos isoladores compósitos. Para tal, é efetuada uma revisão bibliográfica dos estudos científicos dedicados à análise do seu comportamento face a diferentes agentes de deformação, abordando também relatos de concessionárias elétricas sobre aplicações práticas. Posto isto, são apresentadas as diferentes vantagens tecno-económicas mais marcantes dos isoladores cerâmicos e compósitos.

Ao longo do período de realização deste trabalho foram acompanhadas as operações de montagem do novo Laboratório de Alta Tensão da FEUP, o qual foi fundamental para a realização de ensaios elétricos à frequência industrial por forma a comparar a rigidez dielétrica entre isoladores compósitos e cerâmicos em condições de superfície seca e molhada através de pulverização manual. Pretende-se avaliar o comportamento de ambas as tecnologias face à condensação matinal a que podem ser sujeitos.

1.2 Estrutura da dissertação

O documento pretende fornecer ao leitor um conhecimento avançado da constituição física dos isoladores compósitos e da sua eficiência face aos diversos agentes degradantes a que estes podem estar sujeitos.

No capítulo 2 é apresentada a importância dos isoladores no projeto de linha elétricas, bem como a estrutura dos isoladores do tipo campânula e espigão, os quais são largamente empregues neste tipo de infraestruturas. Posto isto, são apresentadas as principais características dos dielétricos aplicados neste tipo de equipamentos, ou seja, da porcelana e vidro.

Por sua vez, no capítulo 3 é feita uma descrição das peças constituintes de um isolador compósito, e apresentam-se as principais características do revestimento exterior destes equipamentos.

Já no capítulo 4 demonstra-se a importância da monitorização dos isoladores em serviço e os métodos mais comuns para rastreio da sua condição física. Com recurso a casos ilustrados, são também apresentados os principais sinais de degradação e dano passíveis de serem encontrados nos isoladores compósitos e cerâmicos.

No capítulo 5 são expostos os agentes responsáveis pelo envelhecimento dos isoladores, nomeadamente fatores ambientais, elétricos e mecânicos. Descrevem-se alguns dos fenómenos, sua formação e as consequências que estes representam para a estabilidade da estrutura do isolador.

Em certos casos apontam-se possíveis soluções para a diminuição das solicitações aplicadas por esses agentes.

Reunidas as informações acerca dos principais tipos de isoladores, no capítulo 6 demonstram-se vantagens técnicas e económicas relativas ao uso de cada tipo de tecnologia. Além disso, apresentam-se vários relatos de experiências práticas com isoladores compósitos por parte de concessionárias eléctricas nos mais variados ambientes e tipos de aplicação.

No capítulo 7 realiza-se uma exposição da constituição do Laboratório de Alta Tensão através da descrição dos equipamentos presentes e do seu modo de operação. Descreve-se também os procedimentos e montagens necessárias à realização de ensaios a isoladores com suporte em normas internacionais da IEC, as quais são aplicadas nas experiências efetuadas aos isoladores.

Desta feita, no capítulo 8 são enumerados os equipamentos a ser ensaiados e suas características físicas. São realizados ensaios à rigidez dielétrica a dois isoladores compósitos para 150 kV, um novo e outro retirado de serviço de uma linha da REN, sendo que este último apresenta a superfície completamente coberta por sedimentos. É efetuada uma comparação da tensão suportada entre ambos os compósitos bem como com uma cadeia de 10 isoladores cerâmicos a seco e com a superfície molhada por meio de pulverização. Pretende-se com isto simular o efeito da condensação em ambientes com nevoeiros matinais frequentes e avaliar a resistência dielétrica dos exemplares descritos.

Por fim, no capítulo 9 são retiradas as conclusões sobre a informação apresentada neste trabalho e expostos possíveis trabalhos futuros dentro deste tema.

Capítulo 2

Isoladores Cerâmicos

Os isoladores são equipamentos essenciais na estrutura de linhas de transmissão aéreas para os vários níveis de tensão explorados. Apesar de representarem um custo relativamente baixo comparativamente ao custo total dos projetos de linhas aéreas, a sua função é determinante para garantir a fiabilidade do sistema. De facto, uma grande percentagem das saídas de serviço de circuitos de tensão elevada deve-se à falha de isolamento destes equipamentos. Todos os isoladores têm uma função mecânica de suporte das linhas e fixação às estruturas de apoio e isolamento elétrico entre os condutores e as partes ligadas à terra. Essa função é alcançada pelo uso de materiais não condutores com perfil adequado para garantir uma distância no ar suficientemente longa para que não ocorram descargas disruptivas às estruturas ligadas à terra.

2.1 Coordenação de isolamento

O ar é um dielétrico com características variáveis no tempo em função das condições atmosféricas envolventes, com propriedades autorregenerativas, ou seja, adquire rapidamente as propriedades isolantes após a ocorrência de uma descarga disruptiva. Se a estrutura do isolador não for comprometida, o equipamento pode manter-se em serviço com garantias de estabilidade de funcionamento. Todavia, a degradação ou destruição parcial da sua estrutura leva a uma redução da sua capacidade de isolamento elétrico e ao aparecimento de descargas disruptivas com valores de tensão mais reduzidos. Assim sendo, em condições normais a cadeia de isoladores equivale a um circuito de impedância teórica infinita a fenómenos de descargas disruptivas, verificando-se, no entanto, circulação de correntes de fuga ao longo da sua superfície durante o período de serviço. No entanto, quando o campo elétrico é suficientemente elevado para estabelecer uma grande diferença de potencial entre os terminais do isolador, essa impedância pode não ser suficientemente elevada para impedir a ocorrência de um contornamento. À capacidade de um material dielétrico resistir a um valor limite de campo elétrico aplicado entre dois pontos sem que ocorra uma condução elétrica designa-se de rigidez dielétrica e é expressa em kV/mm. O valor da rigidez dielétrica é influenciado pela variação de parâmetros como:

- O aumento da temperatura do material causa maior agitação das partículas e, consequentemente, facilita a ocorrência de descargas elétricas entre dois pontos, diminuindo a capacidade de isolamento.
- Magnitude, forma, duração e polaridade da tensão aplicada. Quanto maior for a duração da aplicação de uma sobretensão ao material, maior será o risco de descarga devido à ionização que ocorre no mesmo.
- Distribuição do campo elétrico ao longo do isolador. A homogeneidade da distribuição das linhas de equipotenciais ao longo do dielétrico promove menores riscos de descargas disruptivas e maior fiabilidade no dimensionamento do material.
- Tipo de material isolador: gasoso, líquido, sólido ou combinação dos três. A liberdade molecular e maiores concentrações de íons reduzem a resistividade do material.
- Estado físico do material, ou seja, pressão, condições ambientais, stress mecânico, condutividade, deformações, entre outros.

A designação do tipo de descarga disruptiva depende do meio de propagação do arco elétrico:

- **Escorvamento** — descarga disruptiva que ocorre num meio gasoso ou líquido;
- **Contornamento** — descarga disruptiva que ocorre na superfície de um dielétrico através de um meio gasoso ou líquido;
- **Perfuração** — quando ocorre uma descarga disruptiva através de um dielétrico sólido.

No caso dos isoladores de linha, o efeito das condições ambientais como a humidade, pluviosidade e contaminação da superfície são determinantes para a rigidez dielétrica do equipamento. Normalmente, o valor da tensão que origina a descarga disruptiva para um determinado caminho no ar aumenta com o aumento quer da humidade relativa quer da densidade do ar. Contudo, quando a humidade relativa ultrapassa os 80%, a tensão de disrupção torna-se irregular, uma vez que a condensação na superfície do isolador aumenta a sua condutividade, facilitando o contornamento. A sucessiva ionização do ar, ou dos materiais depositados na superfície do isolador, leva ao crescimento dos canais ionizados com capacidade de condução de corrente elétrica. Quando um ou mais desses canais estabelecem contacto entre os terminais do isolador, constitui-se um caminho condutor e autossustentável para a potência presente nas linhas de transmissão, o qual só pode ser eliminado pela atuação das proteções a montante.

As sobretensões que ocorrem no sistema, com origem em fenómenos atmosféricos ou por seccionamento de circuitos, representam um risco para a integridade de grande parte dos equipamentos que o compõem. O tipo e local de ocorrência de defeitos não é um dado adquirido, logo, na conceção das redes de transmissão de energia deve-se atender a um isolamento correto dos pontos mais importantes do sistema. O sobreisolamento levaria à propagação dessas sobretensões pela rede, correndo o risco de danificar equipamentos. Assim sendo, designam-se locais ao longo dos

circuitos onde se acredita haver menor impacto local, e cria-se um ponto de isolamento intencionalmente mais fraco por forma a escoar esses defeitos do sistema. A coordenação de isolamento procura definir o tipo de equipamentos e a sua capacidade de isolamento por forma a garantir a melhor relação técnico-económica.

Geralmente, a percepção das solicitações elétricas esperadas ao longo do tempo de serviço dos equipamentos são apoiadas em dados meteorológicos e pela experiência nos vários níveis de tensão. Posto isto, estabelece-se uma probabilidade de ocorrência de uma sobretensão através de uma curva de distribuição de probabilidade normal, bem como uma curva de probabilidade acumulada da cedência quando sujeita a uma sobretensão. O produto de ambas define um risco de falha dielétrica para qualquer valor de sobretensão, o que permite avaliar o comportamento dielétrico de um equipamento selecionado segundo esse risco admitido, já que não é economicamente fiável escolher equipamentos capazes de suportar todas as solicitações [1]. A probabilidade de cedência de material isolador é fruto do conhecimento adquirido após a realização de ensaios dielétricos do comportamento segundo tensões com frequência industrial e tensões de impulso para condições a seco, chuva e poluição.

O dimensionamento dos vários tipos de isoladores é determinado segundo as certas características do desenho do equipamento, nomeadamente a linha de fugas e a distância de arco. Define-se linha de fuga como a distância mínima ou a soma das distâncias mínimas entre duas partes metálicas com diferentes potenciais ao longo da superfície de um isolador (Figura 2.1). Pretende-se que a linha de fuga seja suficientemente longa de tal forma que dificulte a passagem de correntes de baixa magnitude que se estabelecem entre os terminais dos isoladores, especialmente quando a superfície fica sujeita a uma camada condutora devido à poluição envolvente. Por sua vez, define-se distância de arco como a distância mínima entre os dois terminais do equipamento através do meio envolvente, que no caso dos isoladores aéreos se trata do ar (Figura 2.2).

A escolha da linha de fugas necessária para conferir uma rigidez dielétrica segura está intimamente relacionada com o nível de poluição presente no local de instalação, uma vez que a camada depositante pode originar contornamentos para a tensão nominal a 50 Hz. Portanto, o ensaio dielétrico à frequência industrial com e sem poluição é essencial para conhecer a capacidade de isolamento para diferentes concentrações de materiais poluentes. A escolha apropriada da linha de fugas é feita segundo sugestões internacionais, tal como será analisado na secção 5.11, e, por vezes, da aplicação de um fator de segurança assumido pelo projetista. Por sua vez, a distância de arco é um parâmetro para considerações quanto à necessidade de resistência a tensões de impulso, como é o caso de sobretensões de origem atmosférica e de manobra.

2.2 Isoladores de campânula e espigão

O formato dos isoladores resulta das exigências mecânicas que vão ser solicitadas em serviço, resultando num grande leque de desenhos e funcionalidades de aplicação no sistema elétrico. No caso das linhas de transmissão, as solicitações mecânicas são satisfeitas com o acoplamento de várias unidades, distribuindo as forças de tração impostas pelos condutores pelas dielétricos,

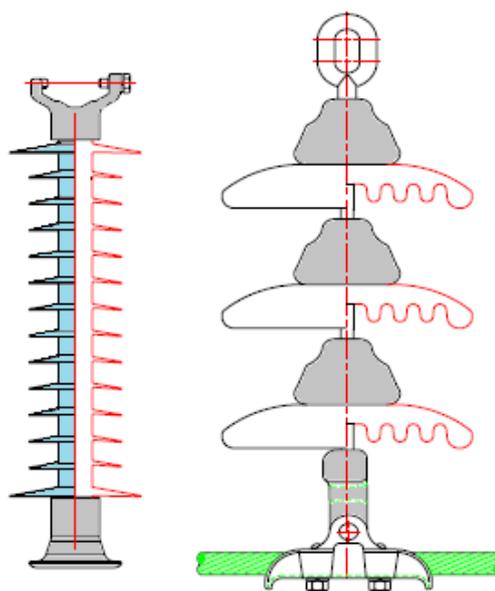


Figura 2.1: Linha de fugas de um isolador composto (esq) e de um isolador de suspensão do tipo câmpnula e espigão [2].

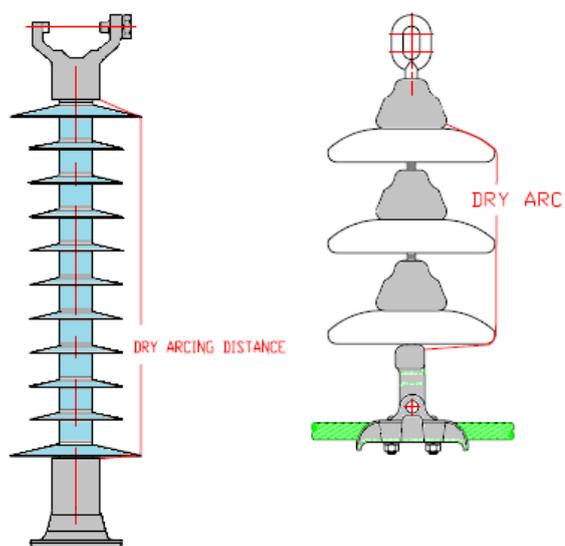


Figura 2.2: Distância de arco dos isoladores compostos (esq) e de uma cadeia de suspensão (dir) [2].

e assim formando uma cadeia de isoladores. Essas unidades são isoladores do tipo câmpnula e espigão (em inglês *cap and pin*), os quais possuem capacidade de interligação fácil e eficaz através da conexão do espigão do isolador do topo com a câmpnula do adjacente (Figura 2.3), o que permite grande flexibilidade no ajustamento do tamanho da cadeia conforme as necessidades específicas. Estes equipamentos são constituídos por três peças principais, expostas na Figura 2.3:

- **Dielétrico** — neste caso trata-se de um material de porcelana ou vidro, não condutor, que resiste a tensão AC ou DC permanentemente aplicada, e dificulta a circulação de correntes de fuga ao longo da sua superfície. Deve assegurar a resistência à tensão de impulso sem que se registem perfurações no seu corpo. Além disso, assegura a transferência de carga mecânica do espigão ao distribuí-la ao longo do seu volume.
- **Espigão** — peça metálica que permite a ligação com um outro isolador da cadeia ou terminal metálico. A ligação entre o espigão e o material dielétrico é assegurada pela introdução de cimento na cavidade inferior da saia. A expansão do cimento deve ser de tal forma correta que estabeleça uma ligação forte entre ambos, sem criar pontos de grande densidade de força que provoque a fratura do material dielétrico.
- **Campânula** — ferragem metálica que abraça a parte superior do dielétrico, a qual é fixada através do uso de cimento ao longo de toda a superfície. Tal como no espigão, a qualidade da ligação deve ser elevada por forma a garantir resistência mecânica à tensão nominal.



Figura 2.3: Conexão entre campânula e espigão.

Ao longo dos vários anos de aplicação deste tipo de equipamento, foram testados inúmeros métodos de configuração dos principais constituintes, por forma a otimizar o desempenho mecânico de cada unidade. O desenho dos terminais metálicos procura tirar proveito das características mecânicas dos cerâmicos, uma vez que estes são materiais isotrópicos e mais fortes na compressão do que na tração. Portanto, há uma transferência de forças de tensão provocada pelos condutores para forças de compressão ao longo do volume do cerâmico através do cimento [3]. O dielétrico possui zonas de forças de compressão junto do espigão e zonas de expansão na sua parte superior compreendida entre o espigão e a campânula.

Os contornos do topo do espigão é fulcral para assegurar uma transferência desses esforços mecânicos de forma distribuída, sem pontos de grande concentração de forças para evitar a fratura do cimento. Se o ângulo da cabeça do espigão for demasiado pequeno, há pouca comutação de esforços e corre o risco de ser arrancado da estrutura. Por outro lado, uma cabeça grande representa um risco de fratura do isolador devido à diferença de constantes térmicas dos materiais

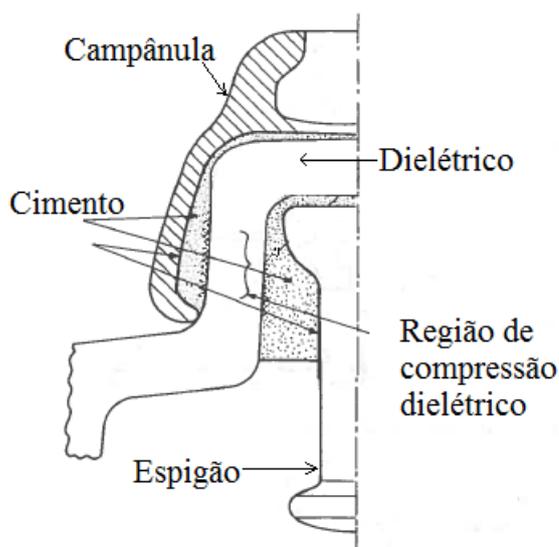


Figura 2.4: Configuração de um isolador de campânula e espigão [3].

presentes nessa zona. Certos produtores apostam pela produção de espigões com duas saliências com o mesmo raio, com prejuízos no comportamento durante a dilatação do metal. Na expansão do cimento deve-se garantir uma vedação consistente em redor do espigão, garantindo que não há possibilidade de infiltração de água, a qual é capaz de provocar a oxidação do metal, e, conseqüentemente, a sua expansão. Esta ocorrência levanta sérias preocupações para a estabilidade do equipamento, de tal forma que, por vezes, aposta-se na introdução de um anel de zinco envolvendo o espigão para que a corrosão ocorra preferencialmente nesse material. Tanto a campânula como o espigão devem ser galvanizados para conferir maior proteção contra a oxidação resultante da passagem das correntes de fuga ao longo do isolador.

A campânula suscita preocupações semelhantes quanto à sua forma. Na Figura 2.4 é perceptível a forma de garra na parte inferior da mesma, a qual garante o isolamento do cimento ao meio exterior, protegendo-o de ataques químicos do meio envolvente, e assegura que não ocorra fratura da ligação entre a parte metálica e o cimento devido a cargas mecânicas. Essa interligação é ainda assegurada pela escolha de ângulos baixos da abertura da campânula, mas não demasiado reduzidos que não permitam transferência de carga.

Por sua vez, o dielétrico é sujeito a várias modificações no seu desenho, na procura de diminuir pontos com grande stress mecânico e proporcionar robustez mecânica nas interligações com as peças metálicas. Na Figura 2.4 é apresentado um perfil vertical com uma ligeira inclinação para a direita, ou seja, possui um ângulo de inclinação maior que 90° . Ora, este formato não apresenta as melhores capacidades do isolador às cargas mecânicas, porque não garante a melhor transferência das forças mecânicas para o material cerâmico. A linha mais verticalizada procura diminuir a concentração de esforços no Joelho inferior do dielétrico, local onde termina a ligação com a campânula. Na Figura 2.5 é apresentada uma distribuição dos esforços mecânicos ao longo da estrutura do dielétrico, onde é possível verificar que os Joelhos são as zonas com maior concentração

de pressão e expansão. Já um perfil com linha vertical com ângulo menor que 90° permite maior transferência de carga para o dielétrico, porque há maior zona de compressão tanto por parte do espigão como da campânula. Contudo, um perfil desses provoca grande tensão mecânica no joelho inferior, de tal forma que, se o ângulo for demasiado reduzido, pode levar à fratura do dielétrico.

A interligação das peças é garantida por uma mistura de cimento geralmente do tipo Portland, mas com grandes variações na composição entre produtores. Normalmente, são colados materiais rugosos no dielétrico, como por exemplo areias, para garantir maior fixação entre este e o cimento (Figura 2.6). Pode ainda ser pintada com betume principalmente nos isoladores de vidro [3].

A evolução dos desenhos dos isoladores para linhas elétricas tem sido feita à custa de sucessivos avanços e recuos na procura pela satisfação dos esforços mecânicos e elétricos. Os ajustes nas dimensões e formatos das principais peças deste tipo de isoladores, bem como as composições químicas e métodos de fabrico são fruto de uma longa experiência adquirida pela sua implementação em linha elétricas, o que confere grande fiabilidade e maturidade a este tipo de tecnologia.

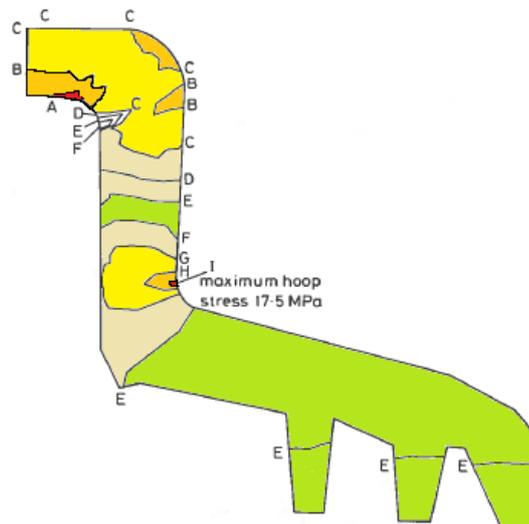


Figura 2.5: Cálculo da distribuição da tensão mecânica (em MPa) num isolador de porcelana com 80 kN de carga: o valor A=-16, B= -11, C=-8, D=-4, E=0, F=4, G=8, H=12 e I=16 (adaptado de [3]).

A versatilidade destes equipamentos permite a sua aplicação quer em sistemas de amarração quer em suspensão de condutores. Assim sendo, este tipo de equipamento apresenta vantagens como:

- Grande capacidade mecânica de cada unidade;
- A rigidez dielétrica da cadeia aumenta com o incremento do número de discos que a constitui, o que permite a sua aplicação para qualquer nível de tensão;
- Se um dos discos da cadeia for danificado, não provoca a ineficiência dos restantes, podendo este ser substituído mantendo os demais em serviço.



Figura 2.6: Exemplo de colagem de areia a garantir maior aderência entre o cimento e o material dielétrico.

- Flexibilidade de tamanho da cadeia, e conseqüente versatilidade na aplicação no sistema elétrico.

A classe elétrica pode ser modificada com alteração do perfil do equipamento. O aumento do diâmetro da saia do dielétrico permite obter maior linha de fuga para cada unidade, tal como o aumento das saliências da superfície inferior. O aumento da linha de fuga não deve ser de tal forma elevado que comprometa a aerodinâmica da cadeia. Já o aumento do diâmetro do espigão leva a maiores capacidades mecânicas por unidade. Também é possível efetuar montagens de cadeias em paralelo por forma a conferir maior resistência à tração, a qual pode ser aplicada em casos de vãos extensos, cabos pesados, deposição de neve e ação de ventos fortes.

2.3 Isoladores de porcelana

Caracteriza-se um material cerâmico como sendo inorgânico com ponto de fusão elevado e que resulta de uma manufatura a frio que é submetida a um longo processo de secagem a temperaturas elevadas. Apenas após a secagem total da peça esculpida é que o material se encontra pronto para usos técnicos. Apresentam grande solidez, robustez à compressão, resistência a ataques químicos, e geralmente são quebradiços. Possuem grande energia superficial devido à quantidade de minerais ionizados, o que se traduz numa grande aderência de água e contaminantes presentes na atmosfera.

A porcelana para fins elétricos consiste na mistura de vários minerais para formação de uma pasta, dos quais se destacam o quartzo, feldspato e argila. Cada um destes componentes tem uma influência predominante em aspetos térmicos, dielétricos e térmicos:

- **Quartzo** — influencia o comportamento térmico da mistura, sendo que, quanto maior for a sua quantidade relativa, maior será a temperatura suportada pela porcelana.

- **Feldspato** — determina o comportamento dielétrico do volume de porcelana através do aumento da rigidez dielétrica.
- **Argila** — atribui maior capacidade de resistência a esforços de compressão em função da quantidade percentual presente na massa.

A formação da pasta obedece a processos de produção e controlo de qualidade rigorosos para garantir que as partículas presentes possuam tamanhos adequados e homogeneidade de distribuição. As principais características físicas e químicas são determinadas pela composição do material cru e pelos ciclos de aquecimentos a que são sujeitos durante a produção, enquanto os detalhes de forma resultam de processos complexos de maquinaria e manufatura [3]. À mistura é adicionada água para garantir a plasticidade necessária ao torneamento da pasta e configuração do desenho. A quantidade de água presente na massa é controlada com grande rigor, visto que, se for muito húmida, a forma adquirida durante o torneamento tende a desfigurar-se, enquanto se for muito seca não permite um trabalho eficiente. Portanto, o controlo da plasticidade da massa ao longo do processo de fabrico é essencial à estabilidade do produto trabalhado, sendo que o produto final será totalmente isento de humidades. Deve-se garantir que a secagem da massa é o mais homogénea possível.

Após o torneamento, operação onde se esculpe a forma do dielétrico, a massa é mergulhada numa solução vítrea e secada em fornos durante longos períodos. Neste processo, toda a água ainda presente na mistura é evaporada e regista-se uma contração do produto, ou seja, ocorrem grandes mudanças nas dimensões da peça. O aquecimento dos fornos é realizado através de curvas específicas para evitar fraturas internas da porcelana. O produto final apresenta uma matriz vítrea responsável pela aglomeração das partículas, a qual deve garantir porosidades abeta nula, boa distribuição dos materiais e inexistência de microfaturas, caso contrário pode comprometer a estabilidade mecânica e a rigidez dielétrica da peça. Quanto menores forem os poros (fechados) existentes na estrutura vítrea e menores forem as partículas presentes, maior será a robustez mecânica do dielétrico.

A rigidez dielétrica da porcelana pode ser ultrapassada em casos de incidências de impulsos atmosféricos, caracterizados por frentes de onda muito rápidas, que podem perfurar o material e estabelecer um caminho condutor através do seu volume. Essa perfuração provoca uma diminuição efetiva do isolamento elétrico do elemento afetado, reduzindo para valores muito baixos a tensão necessária para provocar a descarga disruptiva entre os seus terminais. Permite ainda a penetração de água que pode levar a aumentos de solicitações mecânicas e consequente fratura do dielétrico. Há uma correlação entre o aumento da temperatura para lá dos 100°C e stress mecânico com a queda da tensão necessária à perfuração [3].

A porcelana é sem dúvida o tipo de material dielétrico mais usado para isoladores de todos os tipos nos sistemas elétricos. A maturidade tecnologia adquirida após várias décadas de experiência técnica, o conhecimento da sua atuação e a resistência a ataques químicos por partes dos elementos naturais e de origem humana levam a um domínio significativo do mercado dos isoladores. No entanto, em ambientes com poluição elevada, a superfície é facilmente coberta por contaminantes

que diminuem a resistividade superficial do isolador. Neste caso, a amplitude das correntes de fuga tende a aumentar, com consequências para a estabilidade mecânica e elétrica do isolador. O processo de oxidação das partes metálicas pode ser acelerado, de tal forma que pode ocorrer queda dos condutores por falha mecânica. Se se verificarem condensações na superfície, a rigidez dielétrica fica seriamente comprometida e pode levar à ocorrência de contornamentos à tensão nominal.

Locais de grande atividade industrial, zonas costeiras, zonas tropicais, desertos, e áreas agrícolas são locais onde registam-se falhas na continuidade do fornecimento de energia graças aos contornamentos dos isoladores cerâmicos. O comportamento hidrofóbico dos isoladores compósitos tem mostrado grandes vantagens técnicas nestas circunstâncias. Como tal, a indústria procurou fundir a estabilidade mecânica dos cerâmicos com a hidrofobia dos compósitos através de revestimentos da superfície de isoladores de porcelana e vidro com borracha de silicone, tal como é possível verificar na Figura 2.7. A rigidez dielétrica é incrementada de forma significativa em situações de forte poluição sem grande ocorrência de chuvas ou ventos que contribuam para a limpeza do isolador [4]. Este tipo de solução tem sido adotada por várias companhias elétricas, em detrimento dos isoladores compósitos, justificada pela falta de experiência ou receios face ao comportamento mecânico destes últimos. Apesar de apurar o comportamento face à poluição, estes equipamentos continuam a apresentar desvantagens quanto ao seu peso e fragilidade da estrutura, contrariamente aos compósitos, além de que o processo de pintura necessário geralmente é caro.



Figura 2.7: Isoladores de porcelana para suporte de linhas elétricas, sendo que o exemplar da direita foi revestido com borracha de silicone em toda a sua superfície.

2.4 Isoladores de vidro

Tal como os isoladores de porcelana, os isoladores de dielétrico de vidro possuem várias décadas de serviço em linhas de transmissão de energia, o que lhes confere crédito nas escolhas do material empregue em novos projetos. Nos últimos anos regista-se uma tendência crescente no uso destes materiais em linhas de tensões mais elevadas, justificadas pela fiabilidade mecânica, mas

sobretudo pelo facto destes estilhaçarem quando ocorre uma fratura no seu volume. Este comportamento permite determinar empiricamente se as cadeias de isoladores possuem alguma unidade danificada, que no caso dos isoladores de porcelana pode ser impossível de detetar a olho nu. Os isoladores de porcelana podem ocultar perfurações que comprometem a rigidez dielétrica até ser realizada uma inspeção mais atenta à estrutura.

Os isoladores de vidro usados até à década de 80 apresentavam comportamentos erráticos porque por vezes estilhaçavam espontaneamente, mesmo sem qualquer tipo de esforço mecânico ou elétrico. Mais tarde, a modificação dos métodos de produção originaram um vidro mais resistente e robusto, designado de vidro temperado. O aquecimento para lá do ponto de fusão da mistura, seguido de um arrefecimento brusco, leva a que a superfície contraia enquanto o interior, ainda quente, ainda possui forças de expansão. Portanto, a peça encontra-se com distribuições de força muito distintas, mas presas pela contração rápida da superfície num equilíbrio dinâmico. Caso as forças de expansão vençam a compressão efetuada (através de fratura ou erosão) toda a energia armazenada é libertada de uma só vez, estilhaçando todo o corpo da saia do isolador. Tal não compromete a união da cadeia, uma vez o vidro abraçado pela campânula permanece unido pelo cimento. A sua composição química resulta em constantes térmicas muito próximas dos metais, cerca de 35% menor, o que confere maior equilíbrio ao isolador durante os períodos de maior aquecimento a que o isolador está sujeito em serviço [3].

Uma vez que a rigidez dielétrica dos isoladores de porcelana está diretamente relacionada com a qualidade da matriz de vidro que une as partículas, encontram-se semelhanças no comportamento elétrico com os isoladores de vidro. Ambos possuem baixas permeabilidades elétricas e a resistência à perfuração diminui com o aumento da temperatura. Apesar disso, como o vidro não possui descontinuidades na sua estrutura, tende a ser mais resistente à perfuração.

O aumento da temperatura provoca ainda o aumento da condutividade superficial, de tal forma que, em casos de poluição elevada, a corrente de fuga que se estabelece entre os terminais pode causar erosões fortes na estrutura do material. Com efeito, os isoladores de vidro são mais suscetíveis a danos devido a atividades elétricas na sua superfície, com especial ênfase em contornos.

Os isoladores de vidro têm conquistado um lugar no mercado das linhas de alta tensão, mas têm pouco significado em outras aplicações no sistema elétrico, como em subestações, onde os isoladores de porcelana representam a grande maioria dos equipamentos.

Capítulo 3

Isoladores Compósitos

Os isoladores compósitos para aplicações exteriores apresentaram-se comercialmente nos anos 60 e, desde então, vários foram os casos de aplicações a linhas de transmissão um pouco por todo o mundo. Nesse período, os processos de produção rudimentares e os tipos de materiais utilizados tornavam os isoladores suscetíveis a grande degradação, tanto por exigências mecânicas como elétricas. Consequentemente, surgiram inúmeros relatos de falhas estruturais e de isolamento que comprometiam a estabilidade dos sistemas elétricos. Porém, o desempenho encorajador dos materiais poliméricos conduziu a investigações de grande escala por forma a estender a sua duração média de vida para lá dos 30 anos. A sua evolução consistiu no desenvolvimento e teste de vários materiais, designs e métodos de produção, onde foram atingidos padrões importantes para um funcionamento mais fiável e de longa duração, ultrapassando as dificuldades iniciais.

Os estudos efetuados nos materiais dielétricos promoveram um aumento significativo da estabilidade do isolador, proporcionando uma alternativa tecnicamente interessante aos materiais cerâmicos. Apesar de inicialmente o material polimérico ter sido consideravelmente mais caro, as suas características mecânicas e elétricas ofereciam eventuais poupanças durante o período útil de vida, quer na instalação quer na manutenção [5] do equipamento. Portanto, este balanço económico permitiu aos isoladores compósitos competir num mercado fortemente dominado pelos materiais convencionais. Com o desenvolvimento das técnicas de produção e o aumento da competitividade industrial, verificou-se uma diminuição dos preços de venda deste tipo de equipamentos, aumentando expressivamente a sua competitividade.

Na verdade, o surgimento de isoladores compósitos apresentou novas oportunidades de desenvolvimento para os isoladores convencionais. Em 1912, nos Estados Unidos, o preço médio dos isoladores de porcelana primitivos era de 6.25 cêntimos por libra, quando um dia de salário se aproximava de 2.50 dólares. Já em 1980, com remuneração média diária de 80 dólares por dia de trabalho, o preço de isoladores altamente desenvolvidos era pouco mais do que em 1912, e, portanto, o preço efetivo havia caído por um fator aproximado de 30. Desta feita, o preço dos isoladores convencionais era deveras baixo como consequência da elevada concorrência no mercado. As receitas baixas levaram à escassez de fundos para investigação e desenvolvimento destes equipamentos. As concessionárias elétricas previligiam o custo de aquisição, desconsiderando

a qualidade do material. De certo modo, a relação entre preço e qualidade dos compósitos veio modificar a atitude das empresas perante os isoladores, privilegiando poupanças durante o período de vida útil e estabilidade de funcionamento [3].

Apesar da experiência com este tipo de equipamento se aproximar das quatro décadas, a sua fiabilidade após vários anos em serviço e esperança média de vida não são totalmente conhecidas, gerando muitas vezes controvérsia. Como qualquer outro tipo de isolador, o seu desempenho estará diretamente dependente do seu dimensionamento, das exigências mecânicas e elétricas, bem como do tipo de poluição a que está exposto. É de aceitação global que este tipo de isoladores, quando sujeito a combinações de solicitações elétricas fortes e níveis elevados de poluição, sofre alterações físicas visíveis e moleculares que levam à diminuição do seu comportamento dielétrico, conhecido como envelhecimento do isolador. O envelhecimento ambiental deve-se sobretudo a fatores como radiação ultravioleta da luz solar, chuva ácida, deposição orgânica e ozono. Na verdade, a interação entre essas duas exigências é complexa e nem sempre entendida. A degradação do material polimérico manifesta-se através da perda gradual de hidrofobia, que é a chave para o ótimo desempenho dielétrico destes isoladores. Quanto mais hidrofóbico, mais discretas serão as gotas de água e maior será o ângulo de contacto. Por outro lado, quanto mais hidrófilo, maiores serão os fios de água e, conseqüentemente, maiores serão as correntes de fuga e degradação por efeitos elétricos. Neste sentido, procura-se estudar a evolução do seu comportamento para vários tipos de exigência após envelhecimento, a fim de determinar os casos mais severos e o grau de confiança para serviços de períodos longos.

3.1 Constituição física e design

A forma dos isoladores compósitos assemelha-se aos clássicos isoladores de fuste comprido (*longrod*), mas com construção especial no núcleo e cerca de 90% mais leve. Na sua constituição é possível identificar três peças fundamentais: os terminais metálicos de ligação, o núcleo em vara de fibra de vidro reforçada (FRP) e ainda o revestimento ou *housing* em material polimérico. A Figura 3.1 mostra a montagem e relação desses três componentes, sendo ainda realçada a posição da bainha de proteção à intrusão de humidades na vara.

3.1.1 Terminais de ligação

Tal como no caso dos isoladores cerâmicos, os terminais de ligação têm como função o suporte e ligação dos condutores às torres de transmissão, e são compostos pelas mesmas classes de materiais, ou seja, aço forjado, alumínio moldado, forjado ou maquinado, e ferro maleável, sendo aço (galvanizado) o caso mais comum. Esta escolha deve-se sobretudo à densidade elevada do material e energia necessária para a sua fratura. Não obstante, para os isoladores compósitos, os metais devem ser mais dúcteis devido à compressão e cravação das varas fibrosas. De facto, as diferenças mecânicas entre os cerâmicos e os compósitos fibrosos (FRP) influenciam o design dos terminais. Enquanto os primeiros são quebradiços, isotrópicos e mais resistentes na compressão

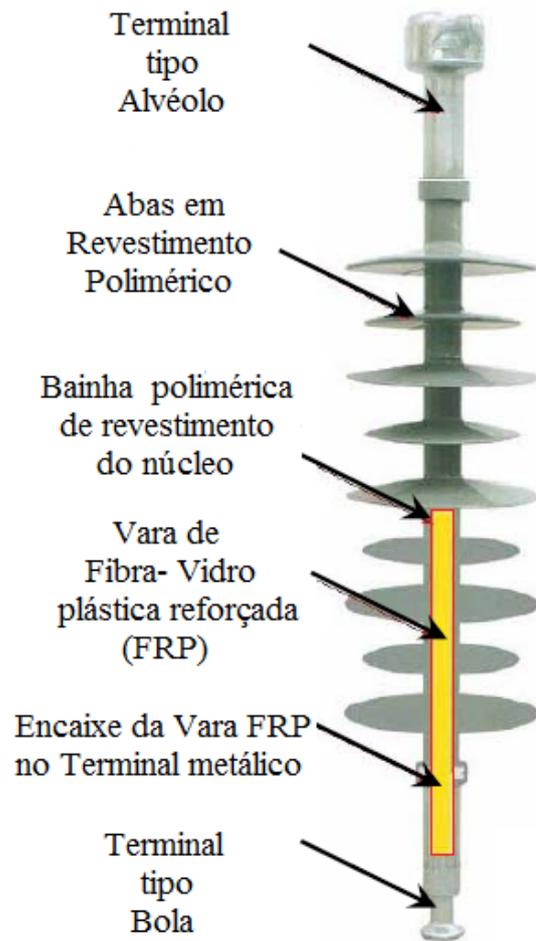


Figura 3.1: Componentes típicos de um isolador composto (adaptado de [6])

do que na tração, os segundos são não quebradiços, superiores na tração e altamente anisotrópicos. À parte do uso de secções cónicas, poucas são as características comuns no seu formato [3]. Neste tipo de isoladores é possível verificar a forma cónica tanto nas peças metálicas como na vara.

A fixação do núcleo pode ser alcançada através de três processos representados na Figura 3.2

- **Colagem** — A vara é revestida com uma resina que garante a fixação à peça metálica de forma cónica que permite distribuir a tensão do núcleo ao longo da boca metálica. O ângulo de abertura deve aproximar-se dos 5° para otimização da distribuição de forças;
- **Compressão** — A boca metálica é paralela à vara e assegura a ligação por compressão e uso de resina ou cimento. Este é o processo de fabrico mais comum devido à estabilidade em mudanças de temperaturas e elevada resistência mecânica.
- **Cunha metálica** — O encaixe da vara à boca cónica é alcançada através de uma cunha metálica que a perfura no centro, separando-a axialmente. Este processo é desaconselhável por

não garantir um encaixe correto. Além disso, a introdução da cunha provoca o gretamento do núcleo, o que provoca fragilidades mecânicas e elétricas.

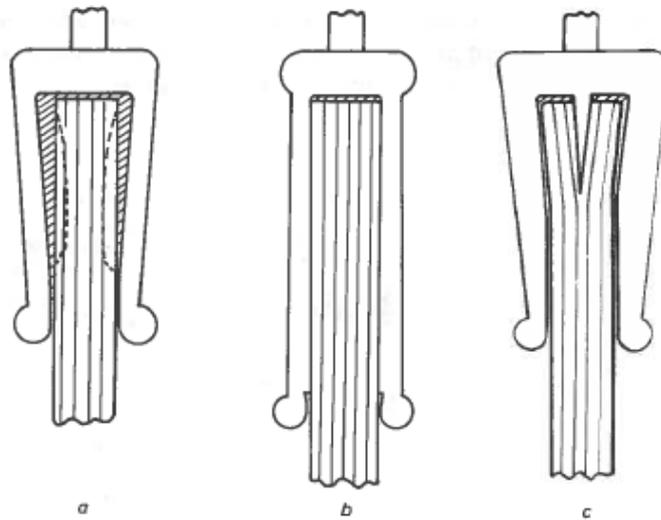


Figura 3.2: Sistemas de Ligação entre núcleo fibroso e terminais por (a) compressão, (b) colagem e (c) cunha interna [3]

Os terminais metálicos geralmente envolvem a vara com uma superfície de contacto longa, cerca de 4 a 5 vezes o diâmetro do núcleo, por forma a garantir uma progressão gradual da carga do metal para as fibras compósitas (Figura 3.3). Podem ser aplicados anéis de coroa para proteção do revestimento (*housing*), visto que minimizam a intensidade de campo elétrico junto dos terminais.

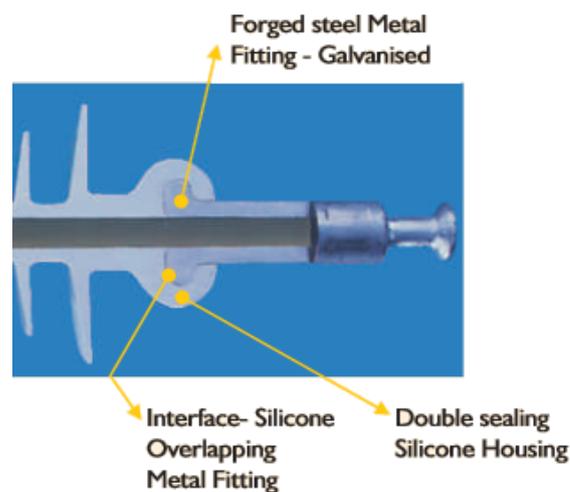


Figura 3.3: Corte axial do terminal de ligação tipo compressão de um isolador composto [7]

3.1.2 Núcleo

A sustentabilidade mecânica nos isoladores compósitos é assegurada por uma vara de material fibroso que garante razões elevadas entre resistência à tração, volume e peso. Um núcleo de 22 mm de diâmetro possui o mesmo grau de resistência à tensão que um núcleo de 75 mm de porcelana. Tal deve-se ao facto do primeiro se encontra 12 vezes mais comprimido que o segundo, o que permite estender-se quase 20 vezes mais, ou seja, o seu módulo de elasticidade é muito superior. Todavia, devido à secção reduzida, o comportamento à compressão não é tão marcante, contrariamente aos materiais convencionais.

Para aplicações em alta tensão, o material mais comum para o núcleo é a fibra de vidro do tipo E-glass reforçada com resinas epoxicas, em detrimento a resinas de poliéster. A resina forma uma matriz plástica que envolve os vários fios e tem como função proteger as fibras contra invasões bem como transferir a tensão daquelas que estão quebradas. Tanto as resinas de poliestirenos como epoxicas são viscoelásticas sendo sensíveis à temperatura e tendem a alterar as suas características ao longo do tempo. Da mesma forma, as fibras de vidro, que em algum momento da produção podem produzir imperfeições, estão sujeitas a perdas de propriedades mecânicas ao longo do tempo, agravadas pelo envelhecimento das resinas. A escolha da resina deve ter em conta o facto de existirem três tipos de materiais com coeficientes de dilatação térmica diferentes (FRP, resina e revestimento ou bainha). Posto isto, o processo de fabrico deve atender a altos padrões de qualidade, quer nos processos realizados, quer no tipo de materiais empregues, nomeadamente na qualidade e quantidade da matriz plástica aplicada.

Na sua constituição, grande parte dos núcleos de FRP são formados por milhões de fibras de vidro expostas unidireccionalmente, em paralelo ao eixo axial, banhadas pela matriz plástica, conferindo uma distribuição anisotrópica, com grande pressão mecânica e resistência à tração.

Apesar de vantajosa, a pressão a que o material se encontra é deveras sensível à presença de água. De facto, as resinas epoxicas são relativamente permeáveis à humidade, contudo, esta permeabilidade natural nunca foi apontada como causa de falha do núcleo sem que se verificassem fissuras no revestimento exterior que permitissem a entrada de água líquida. A penetração de água na vara leva à perda da resistência mecânica e conseqüente fratura do núcleo da direção normal ao eixo axial, seguido da possibilidade de queda da linha. Este fenómeno é conhecido como fratura frágil (*brittle fracture*) e está relacionado sobretudo com a corrosão originada pela presença de ácidos, os quais podem encontrar-se na atmosfera ou serem produto de descargas elétricas juntamente com água. A vara enfraquecida perde a resistência à carga que suporta e quebra (Figura 3.4). Trata-se de um processo de degradação contínuo e acelerado com grandes exposições da vara ao meio ambiente.

Existem acontecimentos documentados de falha por fratura frágil, principalmente nos primórdios desta tecnologia, transversais a quase todos os fabricantes. Efetuaram-se esforços de refinação das fibras de vidro de forma a tornar a FRP mais resistente aos ataques ácidos. A solução passa pela diminuição ou eliminação da concentração de boro e a sua substituição por outras substâncias como o magnésio, óxido de zinco (ZnO) e/ou rutilo, que atribuem sete vezes mais

resistência a ataques químicos, com penalidades nos custos.

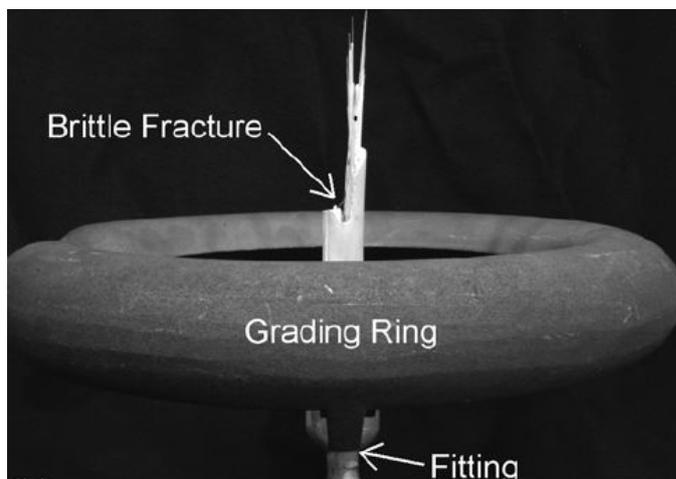


Figura 3.4: Exemplo de Fratura Frágil [8]

3.1.3 Revestimento

O revestimento exterior por materiais poliméricos é a peça mais característica deste tipo de isoladores e tem como função principal proteger o núcleo dos mais variados impactos ambientais, correntes de fuga, descargas elétricas, além de fornecer uma linha de fuga segura para condições de chuva e humidade. Este objeto encontra-se sob stress elétrico e ambiental contínuo que origina degradação gradual do material, e, portanto, o seu estudo e desenvolvimento são vitais para o funcionamento correto e duradouro da estrutura. Em serviço, o polímero deve ser capaz de resistir às condições meteorológicas sem comprometer as propriedades elétricas e mecânicas, ou seja, deve resistir às variações ocasionais de carga (nevões, ventos,..) e temperaturas entre -40°C e 120°C , sem que se verifique envelhecimento precoce e espontâneo.

Assiste-se a várias formas de abas, tipos de polímeros usados, tratamentos de reforço e processos de fabrico, variações justificadas pela complexidade das possibilidades e procura das propriedades desejadas ou mais indicadas para as circunstâncias de funcionamento. A configuração do revestimento determinará a sua resistência a fenómenos de elétricos e perfis das correntes de fuga, que, se mal dimensionados, podem levar à modificação das propriedades da superfície e aumento da condutividade da mesma em condições adversas. Por tudo isto neste trabalho é feita uma análise mais detalhada da sua constituição e quais as dificuldades mais frequentes em serviço.

3.2 Constituição do revestimento

Tal como nos cerâmicos, os polímeros básicos são compostos por átomos com quatro ligações de valência, sobretudo silício e carbono, capazes de formar estruturas longas com diferentes propriedades. O carbono é capaz de se combinar consigo mesmo, além do hidrogénio, oxigénio,

entre outros elementos, formando cadeias de elevada variedade, complexidade e de repetições cíclicas (monómeros). Os polímeros puros contêm apenas um tipo de molécula e raramente são usados como revestimento nos isoladores [3]. Na verdade, a prática universal consiste no enriquecimento da estrutura base com outros tipos de moléculas de diferentes complexidades, por forma a alcançar as exigências mecânicas e elétricas desejadas. A reação entre grupos básicos diferentes, isto é, diferentes monómeros, origina um novo grupo básico designado de copolímero, tal como é apresentado na Figura 3.5 na agregação de etileno e propileno. Quanto maior forem as cadeias de ligação, maior será o peso molecular, consequentemente melhores serão as características mecânicas. Cada polímero é nomeado mediante a(s) molécula(s) base utilizada(s) ou o tipo de comportamento mecânico.

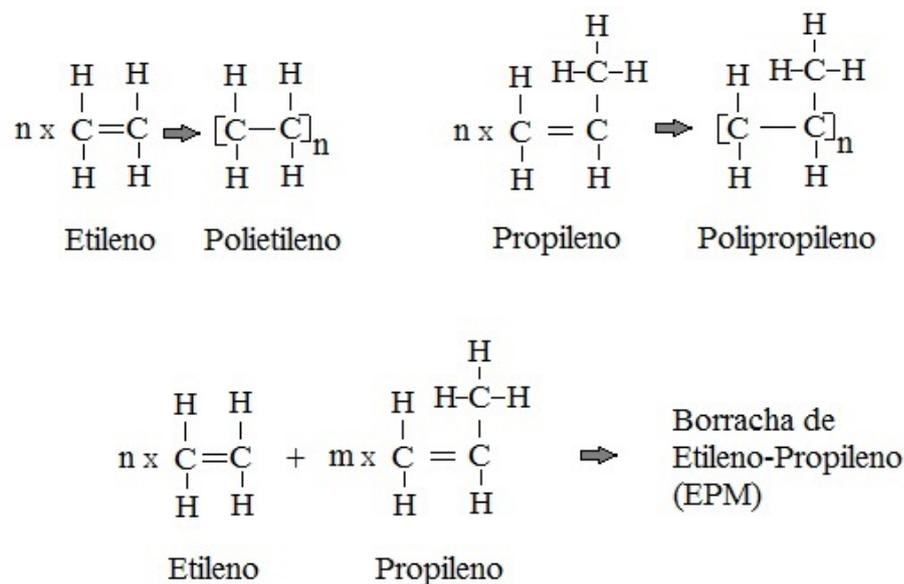


Figura 3.5: Estrutura molecular polímero EPM

A estrutura carbónica das cadeias poliméricas são facilmente decompostas com algumas centenas de graus centígrados devido às ligações de baixa energia que estabelecem entre si. Por essa mesma razão são suscetíveis a ataques químicos por reação com o oxigénio e ozono atmosférico e consequente degradação. Porém, e ao contrário das cerâmicas, essas mesmas ligações proporcionam um comportamento não quebradiço e com baixa energia livre na sua superfície.

A sua estabilidade energética superficial permite um comportamento extraordinário quanto à aderência da água, tornando-a altamente hidrofóbica e com excelente desempenho face à poluição, logo, mais resistente a contornamento em situações de chuva. Esta propriedade será tanto maior, quanto maior for a difusão das cadeias de baixo peso molecular. Neste ponto destacam-se as cadeias formadas por silicone e oxigénio, muito usadas como polímero base.

A ausência de uma estrutura cristalina permite às cadeias de polímeros alguma liberdade de movimento ao longo de todo o volume. Ainda que possa ocorrer uma perda temporária da hidrofobia por influência de condições severas, a mobilidade das cadeias permite alcançar novamente

esse comportamento após um período suficiente com menores solicitações físicas, nomeadamente de descargas elétricas [6].

Enquanto cadeias com grande peso molecular providenciam bons comportamentos mecânicos, baixo peso molecular alcança maior hidrofobia. O desempenho dos polímeros puros não é suficientemente satisfatório para ser empregue em massa nos revestimentos. A combinação de polímeros base com aditivos é um processo um tanto ou quanto facultativo em medida do que se procura obter numa mistura, com mais de dez ingredientes, capaz de responder às necessidades físicas e químicas. A escolha passa sobretudo pelo tipo, concentração, processo e qualidade de:

- **Polímero Base** — Trata-se da composição base do revestimento e deve ser escolhida consoante as características desejadas. Os compósitos mais frequentes são a borracha silicone (SiR) e a borracha EPDM, as quais serão caracterizadas com mais pormenor adiante neste trabalho;
- **Agente de Vulcanização** — Reatores químicos para a solidificação estável da borracha para várias temperaturas através da criação e ligação entre cadeias de moléculas. Os peróxidos orgânicos são os agentes mais usados para formação do revestimento, em detrimento ao clássico enxofre, já que criam ligações carbono-carbono mais rapidamente;
- **Plastificantes** — Protegem as ligações intermoleculares criadas e aumentam a flexibilidade do polímero para baixas temperaturas;
- **Fillers** — Substâncias inorgânicas responsáveis pelo aumento da resistência mecânica e elétrica do polímero, logo de grande importância para o desempenho do isolador. Em certos casos a sua adição é um compromisso entre o aumento da resistência à erosão e a perda de hidrofobia, tal como será visto mais à frente.

3.2.1 Design

A forma dos isoladores compósitos procura estabelecer uma relação entre economia de produção e fiabilidade de serviço. O perfil do caminho de fugas será determinante para a resistência a contornos em condições adversas e para o grau de envelhecimento do revestimento. As características físicas dos isoladores compósitos não são rígidas, mas sim resultado de estudos e ensaios segundo as condições ambientais a que estará sujeito.

Contudo, é incorreto assumir que qualquer forma pode ser empregue, porque o perfil está limitado ao que se pode retirar de moldes caros. O revestimento é moldado numa só peça ou em várias peças que são coladas entre si. Para uma peça completa o design deve ser simples e sem pontos de interrupção que necessitem de vedações extras. Para um revestimento de múltiplas peças, o caminho de fugas deve ser constituído por dois tipos diferentes de polímeros, um para o revestimento, e outro para as uniões dos vários elementos que garanta o isolamento e a coesão da peça completa. A Figura 3.6 b) e c) ilustra a ligação entre diferentes abas e o núcleo através de vedantes. Como visto anteriormente, a baixa energia livre destes materiais torna-os não aderentes,

o que prejudica a garantia de uma união eficaz entre peças vizinhas. Em termos económicos, a produção em peças múltiplas é substancialmente mais cara devido aos moldes amovíveis e ao tempo gasto no processo. O molde único é desvantajoso apenas no caso de alteração do seu perfil. Veja-se que a produção por peças múltiplas apresenta sérias desvantagens físicas pelo número elevado de pontos de interrupção suscetíveis a invasões e conseqüentes degradações. De facto, não se pode esperar o mesmo desempenho mecânico e elétrico por parte destes dois tipos de produção. Apesar de mais limitado na forma, a produção numa só peça é mais económica e fisicamente mais fiável ao evitar pontos de infiltração, e por isso a mais usada.

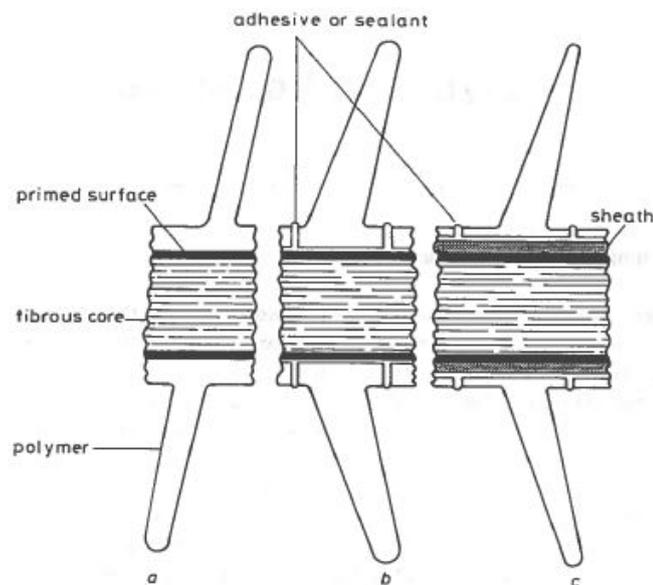


Figura 3.6: Exemplos da estrutura do revestimento: a) diretamente moldado no núcleo; b) Peças múltiplas; c) peças múltiplas ligadas a núcleo com bainha [3].

O tamanho, forma e inclinação das abas estão diretamente relacionadas com a diminuição da intensidade de correntes de fuga perante as diversas condições ambientais, as quais são responsáveis por processos eletroquímicos que provocam erosão do compósito. O aumento do número e tamanho das abas proporciona maior caminho de fugas e regiões secas. Já a inclinação das mesmas garante um escoamento das águas. Porém, deve-se compreender que tamanhos e inclinações exageradas fornecem locais secos propícios a formação de bandas secas (*dry bands*) que podem causar erosão e perfuração do revestimento, tal como será visto na secção 5.2.2. A solução passa pelo uso alternado de abas mais pequenas (perfil alternado), de preferência inclinadas, para minimizar descargas por pingas.

No artigo [9] foram conduzidas experiências para conclusão dos efeitos da configuração das abas no envelhecimento do revestimento, através da comparação de três espécimens de borracha de silicone com o mesmo tipo de *fillers*: um sem abas (núcleo), um com abas alternadas e outro com abas iguais, tal como é perceptível na Figura 3.6. Após 50 ciclos de envelhecimento em condições de ambiente salino, foram observadas erosões no tronco apenas nos isoladores com

abas, sendo bastante superiores no exemplar com saias iguais. Apesar de apresentarem o mesmo caminho de fugas, as diferenças entre os isoladores com abas é notória, e podem ser explicadas pela ocorrência de descargas parciais na superfície do revestimento, nomeadamente as de banda seca. Portanto, conclui-se que a configuração alternada resulta em desempenhos mais adequados quanto à resistência e preservação do material compósito. Este estudo poderia ser complementado com a comparação de exemplares com abas inclinadas, por forma a mostrar qual a sua influência na formação de descargas elétricas e consequente deformação.

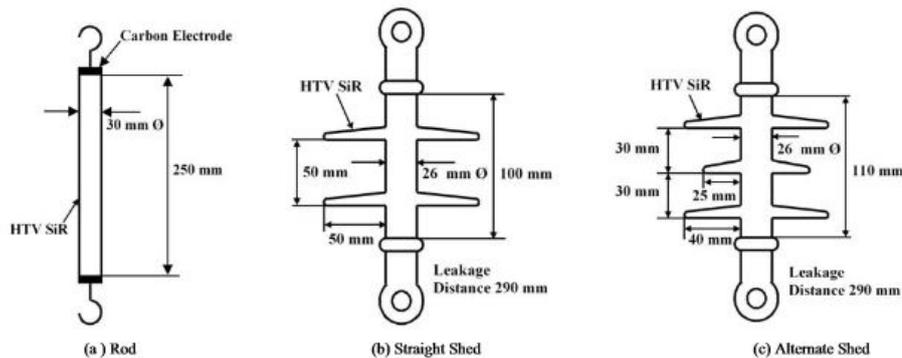


Figura 3.7: Espécimens de teste para comparação dos efeitos das abas: a) Núcleo; b) Isolador de saias iguais; c) isolador de abas alternadas. [9].

Os isoladores de linhas de transmissão são caracterizados por núcleos de diâmetro reduzido, substancialmente menores que o tamanho das abas, representando cerca de um quarto do tamanho total. Na bibliografia [10], os autores procuraram perceber a influência da razão entre as abas e o diâmetro do núcleo na ocorrência de descargas parciais, através da comparação de isoladores de perfil alternado com diferentes tamanhos de saia e núcleo em ambiente de envelhecimento acelerado. Conclui-se que as descargas parciais ocorrem mais facilmente em isoladores com grandes rácios, ou seja, quando as abas são muito maiores que o núcleo. No exemplar com menor núcleo foram observadas descargas parciais contínuas ao longo da sua superfície, enquanto nos restantes apenas foram registados fenómenos de coroa nas gotas de água. Além disso, foram obtidos resultados interessantes num exemplar com o tronco pintado com tinta semicondutora. Desta feita, aumentar o diâmetro do núcleo pode contribuir para a melhoria da resistência à erosão por efeitos de descargas elétricas. Apesar de importantes, as conclusões deste estudo devem ser empregues com ponderação, visto que devem ser mantidos os níveis de aerodinâmica da cadeia de isoladores. Quanto maior for a superfície de contacto, maior será a força exercida pelos ventos incidentes nos isoladores, representando uma carga mecânica adicional.

3.2.2 Polímeros base

Os polímeros de uso em engenharia são mecanicamente mais robustos que os comerciais e apresentam maior resistência a temperaturas elevadas, com penalizações no preço do material. São classificados em três categorias tendo em conta o seu comportamento mecânico e térmico:

termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros. No caso dos isoladores frequentemente são empregues elastómeros, que são polímeros sintéticos ou naturais com longas cadeias de moléculas, com vários pontos de interligação entre si, e que podem retomar a forma original em caso de deformação não excessiva (Figura 3.8). Dos vários tipos existentes destacam-se as borrachas de silicone (SiR) e o copolímero de EPDM.

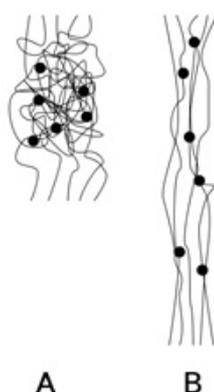


Figura 3.8: A) Polímero sem tensão, onde os pontos simbolizam as interligações entre cadeias; b) Polímero sobre tensão. Quando for retirada a carga voltará à situação A.

As borrachas de silicone são um tipo próprio de elastómeros, porque possuem um esqueleto molecular composto por ligações de silício e oxigénio em vez da típica estrutura de carbono. Pertence ao mesmo grupo químico do carbono, com quatro eletrões de valência, mas energeticamente mais estável. Apresenta propriedades marcantes na resistência a temperaturas extremas, mantendo flexibilidade e boas propriedades elétricas para temperaturas entre -55°C e $+300^{\circ}\text{C}$. De facto, os silicones são os elastómeros mais resistentes a altas temperaturas e os mais flexíveis a baixas temperaturas. Possuem ainda maior resistência a ataques químicos por oxidação e ozono [11]. Contudo, após longos períodos sob influências externas, pode ocorrer envelhecimento com a rutura das cadeias moléculas e das interligações entre elas.

Como se tratam de cadeias saturadas, ou seja, não possuem radicais livres para efetuar novas ligações, a superfície mostra níveis altamente satisfatórios de hidrofobia e baixa retenção de humidade, que, como visto anteriormente, são essenciais ao desempenho do isolador em condições adversas. Juntamente com elevada resistividade óhmica superficial e volúmica, estabilidade mecânica, excelente comportamento face à poluição e resistência à erosão, leva a que este material seja de grande interesse na aplicação em alta tensão, particularmente em aplicações de linhas sujeitas a níveis elevados de poluição.

A borracha de Etileno-Propileno-Dieno (EPDM) é um composto orgânico da família dos EPM (Figura 3.5), mas com três monómeros base. Este composto apresenta resistência mecânica à tração superior ao SiR, conferindo maior robustez aos isoladores. O seu custo é cerca de doze vezes mais baixo que o do silicone. As propriedades deste elastómero apontam para conservação do material contra ataques de oxigénio, ozono e clima, ligeiramente superior aos isoladores de

SiR. Além disso, a borracha EPDM parece ser mais indicada para instalações de tensão contínua, uma vez que os isoladores de SiR são severamente afetados nessas circunstâncias, apresentando maior degradação do revestimento quando exposto a este tipo de tensão [12]. Nos estudos de envelhecimento acelerado, é demonstrado que o envelhecimento é independente do tipo de tensão, ou seja, as modificações físicas em tensão contínua e alternada são semelhantes, contrariamente aos compósitos de silicone.

Na teoria, a borracha EPDM seria a eleita para a composição do revestimento, já que oferece vantagens físicas que reduzem a possibilidade de envelhecimento precoce da superfície [13], e por um preço reduzido. Todavia, este material não fornece as mesmas características elétricas que o silicone, e, sobretudo, não dispõe do mesmo nível de hidrofobia nem da capacidade de transferir essa hidrofobia para uma camada de poluição que se encontre à superfície do isolador [14]. Apesar de pouco percebido, este facto é marcante na eficiência dielétrica dos isoladores de SiR em condições de poluição severa. A estrutura molécula do silicone, nomeadamente o seu baixo peso molécula, conferem a este material a possibilidade de regenerar a sua hidrofobia após perda parcial, contrariamente ao que acontece com o EPDM.

Efetivamente, ambos os compostos apresentam vantagens estruturais e dielétricas para o revestimento dos isoladores. Na prática, efetua-se a mistura de ambos os polímeros (SiR+EPDM) para produzir um material com boas características dielétricas, estabilidade térmica, resistência mecânica e maior defesa contra ataques químicos. Mais, como a borracha EPDM tem custo reduzido, a mistura será muito mais barata em comparação com um revestimento de apenas SiR. As quantidades envolvidas de cada polímero na mistura determinam as características mecânicas e elétricas, e, portanto, deve existir uma ponderação entre maiores concentrações de EPDM ou SiR.

Por forma a compreender o efeito das proporções de cada tipo de polímero nas características do novo material, na publicação [15] foram preparadas sete amostras com diferentes percentagens por peso (Figura 3.9), e determinadas as suas características mecânicas e dielétricas através de testes orientados segundo normas internacionais, nomeadamente:

- **Resistência a Rastejamento ou *tracking*** — Oposição à formação gradual de um caminho condutor que é produzido na superfície ou dentro de uma material isolante, devido a efeitos combinados de solicitações elétricas e contaminação eletrolítica [16];
- **Resistividade Volúmica** — Resistência à circulação de corrente pelo corpo de um material isolante;
- **Rigidez dielétrica** — Quociente entre a tensão máxima aplicada sem registo de falha, pela distância entre partes condutoras segundo determinadas condições de teste [16];
- **Resistência ao arco** — Habilidade de um material isolante resistir à influência de um arco elétrico ao longo da sua superfície segundo determinadas condições [16];

- **Índice de resistência ao rastejamento** — Valor numérico da tensão máxima a que um material resiste sem apresentar rastejamento nem ocorrência de chamas persistentes sobre certas condições de teste [16];
- **Constante dielétrica ou permissividade (ϵ_r)** — Esta propriedade do material é a medida da energia armazenada num material isolante, devido à organização dos dipolos elétricos por influência de um campo elétrico;
- **Fator de dissipação ou tangente de perdas ($\tan(\delta)$)** — Valor absoluto da razão entre a parte imaginária e real da permissividade relativa de um material isolante [16]. Exprime as perdas dielétricas causadas num material pelo movimento dos dipolos expostos sobre um campo elétrico. Estas perdas aparecem sob a forma de calor no material.

Os resultados obtidos sugerem melhorias em todas as características elétricas com o aumento da borracha de silicone. Entre as características mecânicas, a resistência à tração da mistura diminui com o aumento da percentagem total de SiR, enquanto a percentagem de alongamento do material no momento de quebra aumenta, representando menores resistências mecânicas devido ao aumento da plasticidade. Portanto, procurou-se identificar a composição ótima entre EPDM e SiR na mistura com o compromisso entre as vantagens mecânicas e elétricas que os compósitos fornecem, respetivamente.

Silicone rubber (in percentage by weight)	EPDM (in percentage by weight)	Dicumyl Per oxide (in phr)	Blend Notation.
0	100	2.5	A
10	90	2.5	B
30	70	2.5	C
50	50	2.5	D
70	30	2.5	E
90	10	2.5	F
100	0	2.5	G

Figura 3.9: Amostras de diferentes composições de EPDM e SiR por percentagem de peso [15]

Como é possível observar na Figura 3.10 a), o tempo de resistência ao rastejamento do silicone puro (amostra G) é 60% maior do que EPDM puro (amostra A). Por outro lado, a resistência à tração do primeiro é quase 1/10 do segundo composto. Esta última aumenta de forma proporcional com a quantidade de EPDM, contrariamente à resistência ao rastejamento que diminui com o aumento da mesma. Em relação às propriedades da amostra G, numa mistura de 50:50 (amostra D) obtém-se uma redução de 16% de resistência ao rastejamento e um aumento de 366% na resistência à tração máxima [15].

Como as ligações entre o silicone e o oxigénio são mais fortes que as ligações entre dois átomos de carbono presente nos polímeros orgânicos (EPDM), há um aumento da rigidez dielétrica

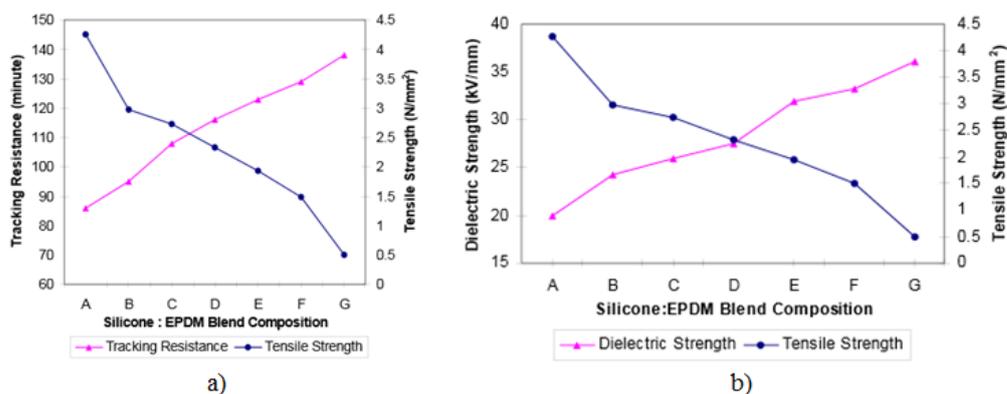


Figura 3.10: Efeitos das diferentes misturas na resistência à tração em comparação com: a) resistência ao rastejamento; b) rigidez dielétrica [15]

proporcional à quantidade de SiR. Na Figura 3.10 b) é perceptível que o encontro entre as duas curvas ocorre para a concentração 50:50, representando apenas 24% de perdas na rigidez dielétrica em comparação com o silicone puro.

Tanto a resistividade superficial como a resistividade volúmica não apresentam um aumento tão linear em função da presença de silicone na mistura. Na Figura 3.11 é perceptível que estes parâmetros crescem significativamente para concentrações acima de 70% de SiR. Não obstante, como visto, para esses valores a resistência à tração é deveras baixa, ou seja, há uma penalização grave nas características mecânicas para atingir os valores mais elevados de resistividade elétrica.

De forma geral, a bibliografia [15] aponta como solução ótima a mistura com 50% de cada polímero, justificado pelo aumento substancial do fator de alongamento e diminuição da resistência à tração, os quais podem comprometer a estabilidade mecânica do isolador. As penalizações nas características elétricas que ocorrem pela adição de EPDM são baixas e aceites pelo aumento substancial da resistência à tração. A Figura 3.12 resume as variações nas propriedades da mistura 50:50 em relação a 100% de SiR.

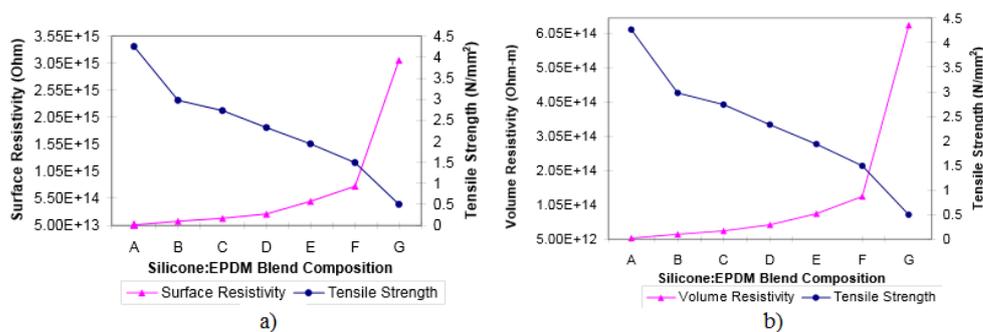


Figura 3.11: Efeitos das diferentes misturas na resistência à tração em comparação com: a) resistividade superficial; b) resistividade volumica [15]

Na prática, efetuam-se misturas destes polímeros, mas cada fabricante aposta numa combinação própria sem revelar quais as quantidades envolvidas. Os revestimentos dos isoladores são predominantemente constituídos por borrachas de silicone, às quais são adicionados *fillers* para melhorar as suas qualidades físicas. Neste sentido, o estudo [15] fornece outra possibilidade de fabrico, com características interessantes e preço reduzido, mas não inclui o efeito que outros aditivos podem trazer ao revestimento dos isoladores.

Sl. No.	Characteristics	% increase(+) (or) % decrease(-)
1	Tensile Strength	+366
2	Tracking resistance	-16
3	Dielectric strength	-24
4	Arc resistance	-40
5	Comparative tracking index	-9

Figura 3.12: Principais variações nas propriedades elétricas e mecânicas da mistura 50:50 em relação com 100% de SiR [15]

3.2.3 *Fillers*

Os materiais poliméricos usados para o revestimento de isoladores são usualmente formulados com elementos designados *fillers*, os quais proporcionam melhorias nos comportamentos mecânicos e ajudam a minimizar os efeitos derivados das solicitações elétricas a que estas peças estão sujeitas em serviço. São peças fundamentais na composição do revestimento, sobretudo para isoladores de borracha de silicone, já que estes possuem baixa resistência à tração. São usados para atingir requisitos fundamentais para manutenção de qualidade de serviço, nomeadamente aumento da resistência à tração, condução térmica, aumento da temperatura máxima suportável e redução de custo. Geralmente os *fillers* são classificados em duas classes principais tendo em conta a sua funcionalidade: *fillers* de reforço para resistência mecânica, ou *fillers* de extensão para propriedades de combate à degradação da superfície.

A sílica e o carbono negro (fuligem) são exemplos de *fillers* de reforço que aperfeiçoam propriedades mecânicas de SiR através das ligações moleculares que estabelecem com o silicone. Distinguem-se ainda sílica fumada e sílica precipitada, sendo que a primeira contribui para aumentos mais significativos de propriedades como dureza e resistência à carga, enquanto a segunda proporciona maiores níveis de hidrofobia. A presença de humidade na sílica precipitada leva a menores resistividades volúmicas, maiores constantes dielétricas e fator de dissipação [17].

O quartzo e o hidróxido de alumínio (Al_2O_3) ou ATH são *fillers* de extensão inorgânicos muito usados na composição do revestimento. O ATH é usado como retardador de chamas, porque

quando a temperatura atinge aproximadamente 220°C, este liberta a água, arrefecendo a superfície do isolador e prevenindo aumentos rápidos da sua temperatura. Assim, quando presente na composição, atua como uma camada protetora dificultando a formação de caminhos condutores por rastejamento e erosão da superfície. Em [17] concluiu-se que existe a necessidade de concentrações altas de hidróxido de alumínio para resistência a rastejamento. Quando as quantidades são reduzidas, produzem-se erosões com cerca de 3mm de profundidade, porém, com o aumento dessas quantidades, atinge-se um valor crítico e as erosões mantêm-se perto de 1mm de profundidade. Assim, para cada mistura parece existir um ponto de saturação de ATH para o qual concentrações acima desse valor não proporcionam melhorias ao composto. Como se tratam de materiais baratos, há todo o interesse em adicionar a maior quantidade possível de *fillers* no composto. No entanto, o facto das ligações moleculares do ATH com o silicone serem bastante pobres, leva a que o aumento contínuo da porção deste material comprometa a resistência à tração e hidrofobia do polímero. Logo, o ATH não pode ser adicionado em excesso porque resulta em propriedades mecânicas pobres que comprometem a estabilidade dos isoladores.

Este filler atua como uma barreira à difusão das cadeias de baixo peso molecular, e, portanto, diminui a capacidade de hidrofobia, bem como a rapidez de propagação desta propriedade para as camadas de poluição. É necessário ponderar os argumentos técnicos referentes à quantidade de hidróxido de alumínio: aumentar as porções para melhorar a resistência a rastejamento e erosão ou diminuir as porções por forma a manter a propriedade hidrofóbica do composto. Neste trabalho entende-se que a hidrofobia é a característica mais apelativa dos isoladores compósitos, e, como é responsável pela diminuição de correntes de fuga, ajuda na conservação do material através do controle de fenómenos de descargas parciais.

A eficácia da adição dos *fillers* está ainda dependente do tamanho das partículas. O facto da sílica fumada possuir uma estrutura mais fina do que a sílica precipitada, e maiores cadeias, confere maior homogeneidade e dispersão. A Figura 3.13 fornece um resumo dos *fillers* mais comuns e as suas funções na proteção do revestimento.

Filler	Property Modification	Engineering Insulation Improvement
Al ₂ O ₃ .3H ₂ O SiO ₂	Thermal Conductivity	Resistance to dry band arcing, partial discharge & Corona
BaTiO ₃ BaTiO ₃ + Al	Relative Permittivity	Electric field grading
SiC Varistor (ZnO) Sb ₂ O ₃ + SnO	Electrical Conductivity	Contamination performance Electric field grading

Figura 3.13: Principais variações nas propriedades elétricas e mecânicas da mistura 50:50 em relação com 100% de SiR [18]

Capítulo 4

Degradação da estrutura

Quando em serviço, todos os isoladores são confrontados com algum tipo de perturbação que pode comprometer a sua fiabilidade operacional a curto ou longo prazo. Pretende-se que o isolador apresente rigidez dielétrica elevada ao longo do seu serviço, sem que tal represente custos elevados de manutenção ou de substituição resultantes do desgaste por parte dos potenciais agentes de degradação. A natureza dessas perturbações é variada e com diferentes graus de severidade, dependendo das circunstâncias da instalação em que o material se encontra. Fatores como o nível de tensão, grau de poluição, tipo de clima, dimensionamento do isolador e qualidade de material são determinantes no período de vida útil. O tempo de serviço de um isolador terminará quando as solicitações a que está sujeito provoque avarias mecânicas, transformações que reduzam significativamente a sua resistência a contornamento ou evidências de envelhecimento que comprometam a segurança em serviço. De forma geral, as perturbações podem ser agrupadas em três categorias, nomeadamente, elétricas, mecânicas e ambientais, cada uma com diferente severidade de ataques e velocidade de envelhecimento do isolador.

A resistência a estes agentes de desgaste diferem entre os isoladores cerâmicos e os polímeros e é determinante na escolha do tipo de material a utilizar atendendo às circunstâncias esperadas na instalação. Por um lado, os cerâmicos são mais resistentes a ataques químicos e descargas parciais, mas quebradiços e facilmente contaminados por poluição. Já os polímeros, devido à sua estrutura orgânica, sofrem desgaste tanto por ação de alguns compostos químicos como por descargas elétricas, mas apresentam hidrofobia, resistência à poluição e não são quebradiços. A velocidade de desgaste dos isoladores compósitos está diretamente relacionada com as escolhas técnicas e métodos de fabrico adotados por cada produtor. De facto, a falta de uniformização e regulamentação da produção destes equipamentos origina uma grande variedade de comportamentos deste tipo de isoladores, impulsionada por mudanças constantes nas misturas, design, técnicas de fabrico, entre outros. Os produtores podem aumentar os seus lucros com substituição de materiais ou pela sua redução, o que pode causar menores margens de segurança e redução do tempo médio de vida esperado. Cabe ao comprador avaliar a informação técnica do isolador e escolher aquele que mais se ajusta às suas exigências e disponibilidade financeira.

4.1 Monitorização e manutenção

A monitorização da condição dos isoladores ou a previsão da necessidade de manutenção ao longo do serviço são vitais para a garantia de um funcionamento eficiente. As previsões são elaboradas tendo em conta o historial da tecnologia em causa e as circunstâncias de operação, isto é, se se tratar de um isolador cerâmico numa zona industrial ou costeira a necessidade periódica de limpeza é fundamental para garantir resistência a correntes de fuga, visto que rapidamente se verificam depósitos de impurezas que facilitam contornamentos. Porém, as previsões podem não representar verdadeiramente as condições de serviço em que os isoladores se situam e favorecer a modificação ou mesmo falha dos mesmos. Já uma inspeção visual confere, em certa medida, uma determinação mais apurada da qualidade do material, sobretudo no caso dos isoladores compósitos. Já que são mais resistentes a ataques químicos, os isoladores cerâmicos dificilmente apresentam transformações notáveis no seu visual, apesar de por vezes existirem microfraturas ou corrosões nas partes metálicas que representam perigo de avaria. Podem ser utilizadas várias técnicas de análise do estado físico e dielétrico dos isoladores, nomeadamente:

- **Inspeção visual** — com auxílio de binóculos ou vigilância através de câmaras é possível determinar o estado da superfície do isolador, grau aparente de hidrofobia, grau de deposição de contaminação e ainda a exposição do núcleo dos isoladores compósitos.
- **Termografia** — através do uso de câmaras de infravermelhos avalia-se a variação de temperatura ao longo do isolador, detetando possíveis perfurações das abas, quebras, absorção de humidades, rastejamentos (compósitos) e localização de descargas parciais. O aparecimento de pontos com temperatura elevada está diretamente relacionado com fenómenos de descargas parciais e formação de rastejamento ou erosões [19]. Todavia, esta técnica é um pouco sensível às condições térmicas ambientais do mesmo modo que é afetada por ventos fortes, nevoeiro e chuva. Posto isto parece ser mais conveniente efetuar as medições térmicas durante a noite.
- **Raio-X** — uso de aparelhos portáteis ou fixos que permitem identificar danos internos ou modificações na estrutura interna que possam comprometer o funcionamento normal. Podem detetar quebras nos núcleos de fibra de vidro, separação do mesmo com os terminais metálicos, e ainda estado de acoplamento entre os pinos e as partes cerâmicas.
- **Medição do campo elétrico** — a distribuição do campo elétrico ao longo do isolador é influenciada pela permissividade e condutividade dos materiais usados, bem como da sua geometria. Além disso, a presença de defeitos, poluição e humidade também afeta de alguma forma essa distribuição. Assim, um desvio elevado entre os valores medidos e os valores esperados pode indicar aumento de micro fraturas, perfurações ou quebras nos isoladores cerâmicos. Já nos compósitos aponta para absorção de humidade no interior, separação entre revestimento e núcleo, rastejamento ou ainda quebras e outros danos mecânicos. Diagnósticos de falhas através deste tipo de técnica podem ser dificultados pela presença de água,

uma vez que as gotas na superfície modificam significativamente a distribuição de campo [19].

- **Medição da corrente de fugas** — o aumento da corrente de fugas pela superfície do isolador evidencia o aumento da deposição de contaminação, perda da resistividade e ainda diminuição da hidrofobia. Como tal, diagnostica-se um envelhecimento da superfície dos compósitos e conseqüente perda de capacidades dielétricas, bem como a necessidade de efetuar limpeza do isolador.
- **Deteção de interferência rádio** — esta técnica de diagnóstico permite detetar ocorrência de descargas elétricas parciais (efeitos coroa por exemplo) através da emissão de radio-frequências as quais, dependendo do tipo de descarga e da sua intensidade, podem originar a degradação da superfície.

Muitas outras técnicas podem ser utilizadas, sobretudo com maior complexidade em termos de material necessário à sua realização, algumas das quais são de aplicação especial para os compósitos. As inspeções às condições estruturais e dielétricas em tensão são de grande importância para a fiabilidade do sistema, visto que avaliam o estado do isolador sem interrupção do serviço. Os exames laboratoriais são realizados após a substituição do isolador, e permitem determinar as influências que o meio envolvente tem sobre o mesmo e as causas de falha, se esse for o caso. Assim é possível estabelecer indicadores fundamentais à determinação das condições do material em futuras inspeções visuais, bem como as medidas a serem tomadas face às transformações registadas.

A informação proveniente da monitorização é fulcral para decisões quanto a melhorias no design, especificações de construção, transporte e instalação, além de diferenciar qualitativamente os diferentes produtores. Presentemente, os isoladores compósitos registam maior acompanhamento em serviço, justificado pela possibilidade de envelhecimento e menor conhecimento da sua evolução. As vantagens inerentes da sua utilização levam à procura de padrões de comportamento e envelhecimento para diferentes circunstâncias. O tratamento desta informação permite uma evolução tecnológica em concordância com a experiência adquirida no terreno e assim minimizar as influências do meio envolvente.

Quando instalados em ambientes de elevada poluição, estes equipamentos podem ser sujeitos a programas de limpeza a fim de retirar a acumulação excessiva de contaminantes nas suas superfícies, responsáveis pela modificação das suas características de isolamento. Estas manutenções são programadas consoante o grau e tipo de poluição registados numa região, a pluviosidade média e a classe de material utilizado. Deve avaliar-se o efeito dos contaminantes na modificação do desempenho dielétrico, bem como no envelhecimento dos materiais. Preferencialmente são efetuadas com a linha em tensão para maximizar a fiabilidade do sistema

Como visto anteriormente, os isoladores compósitos, sobretudo os de SiR, têm excelentes comportamentos face à poluição devido à superfície de baixa energia livre e, portanto, necessitam de menores cuidados quanto à deposição de partículas comparativamente aos isoladores cerâmicos. Há uma grande vantagem económica com o uso de isoladores compósitos devido às ações de

limpeza menos frequentes. Caso se registem evidências de ocorrência elevada de descargas parciais ou perda de hidrofobia, são efetuadas limpezas à superfície na esperança de recuperar algumas dessas propriedades e adiar a sua substituição. Porém, as limpezas não devem ser realizadas caso se verifiquem danos estruturais como rastejamento, erosão, separação de abas, vandalismo ou exposição do núcleo, com risco de permitir a infiltração de líquidos para o interior do núcleo fibroso e assim comprometer a sua estabilidade.

Na publicação [20] o IEEE estabelece as formas de limpeza a serem empregues, tanto para os isoladores cerâmicos como para os compósitos. Os cerâmicos podem ser lavados tanto em tensão como fora dela segundo várias formas, nomeadamente: água a alta pressão, água a média pressão, água a baixa pressão em corrente ou bico, ar comprimido, varrido ou à mão. Por sua vez, a limpeza dos compósitos deve ser efetuada com aconselhamento prévio do produtor acerca dos métodos a serem usados. Geralmente, podem ser lavados com água, sendo que a pressão usada depende do tipo de molde usado (uma peça ou multi peças) e do polímero em causa. Quando em tensão podem ser limpos com ar comprimido segundo um processo de abrasão a seco, similar a jatos de areia, mas é desaconselhado para isoladores do tipo SiR, já que pode destruir a hidrofobia da superfície.

4.2 Tipos de envelhecimentos dos isoladores compósitos

A categorização das transformações ocorridas e o grau de perigo que as mesmas representam para a estabilidade do isolador compósito está relacionada com o local onde essas ocorrem. Defeitos no núcleo significam maiores riscos devido à fragilidade da vara interna. Por exemplo, atos de vandalismo através de armas de fogo nas abas deste tipo de isolador frequentemente não implicam riscos ao seu funcionamento normal. Por outro lado, quando os projecteis perfuram o revestimento do núcleo, é necessário efetuar a substituição do equipamento, visto que num futuro próximo pode ocorrer fratura frágil ou descargas elétricas que arruinem a vara. O envelhecimento destes equipamentos tende a apresentar uma certa regionalização dos diferentes defeitos, ou seja, para cada constituinte de um isolador compósito existem degradações específicas, com diferentes graus de perigo e necessidade de intervenção. A EPRI defende uma classificação de prioridade de intervenção de quatro níveis, resultante de avaliações à localização e progressão da degradação/dano, as quais são apresentadas na Tabela 4.1 [21]. As classificações A e B representam degradações, devendo monitorizar-se o desenvolvimento das mesmas, enquanto C e D são rotulados como dano e obrigam à substituição do equipamento.

Branqueamento (*whitening*)

Regista-se o aparecimento de pó branco na superfície do isolador devido à libertação de alguma quantidade de fillers do polímero (Figura 4.1). Geralmente a degradação não é homogénea, ocorre tanto nas abas como no núcleo, e prevalece sobretudo perto dos terminais de ligação e do lado com maior incidência solar. Não representa risco ao funcionamento do equipamento e não são necessárias precauções especiais, logo possui uma classificação de A.

Prioridade de Manutenção	Definição	Ação
A	Bom ou como novo	Não necessita de intervenção
B	Pouco desgaste ou decadência	Monitorizar evolução da degradação
C	Grau moderado de dano	Considerar substituição
D	Grau elevado de dano	Remover isolador de serviço

Tabela 4.1: Condição e prioridade de manutenção de um isolador compósito segundo EPRI [21]

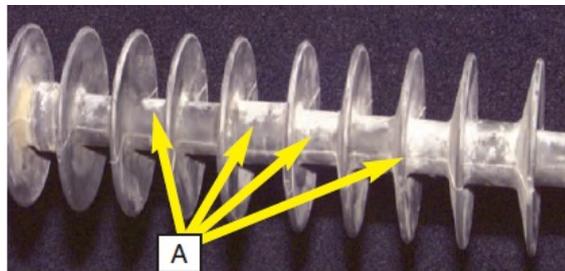


Figura 4.1: Caso de branqueamento do isolador compósito com especial incidência numa das faces [21].

Mudança de Cor (*Color Change*)

A mudança da cor base do revestimento pode ser causada através de oxidação, exposição a ultravioleta, contaminantes e/ou descargas parciais (Figura 4.2). Não representa perigo para o funcionamento estável do isolador. Note-se que, como qualquer tipo de envelhecimento, há diminuição de algumas propriedades do material.



Figura 4.2: Exemplo de mudança de cor do revestimento de um isolador compósito [22].

Fissuração (*cracking*)

Ocorrência de fissuras com profundidades superiores a 0.1 mm (Figura 4.3). Justifica-se através da exposição a ambientes severos e baixa qualidade de produção, que permitem rupturas das ligações químicas mais fracas do compósito e consequente propagação. O risco inerente a este fenómeno está diretamente relacionado com a profundidade das fissuras e local de ocorrência. Assim sendo, este fenómeno pode ser classificado como nível B se a fissuração ocorrer apenas nas abas, ou em casos ligeiros no núcleo.



Figura 4.3: Exemplo de fissuras nas abas do revestimento [22].

Gretamento (*crazing*)

São micro fraturas na superfície de revestimento, dispersas, com aparência de rede, e profundidades baixas (limite de 0.1 mm), derivadas principalmente de atividades elétricas (Figura 4.4). Não representam perigo para o isolador, desde que não avancem para fissuras no núcleo.



Figura 4.4: Exemplo de fissuras nas abas do revestimento [22].

Escamação (*Aligatoring*)

Esta degradação consiste na propagação generalizada dos fenómenos de gretamento e fissuração pelo revestimento do isolador, que torna a superfície frágil ao toque. Está limitada às primeiras gerações de isoladores compósitos, que devido às técnicas pobres de fabrico permitiam grandes

perdas de fillers quando sujeitas aos agentes ambientais. O risco à estabilidade do isolador é baixo, todavia, em casos de grande degradação, é aconselhável a substituição antecipada. A Figura 4.5 ilustra dois tipos de textura da superfície resultantes de escamação, cada uma com diferentes níveis de prioridade de intervenção.

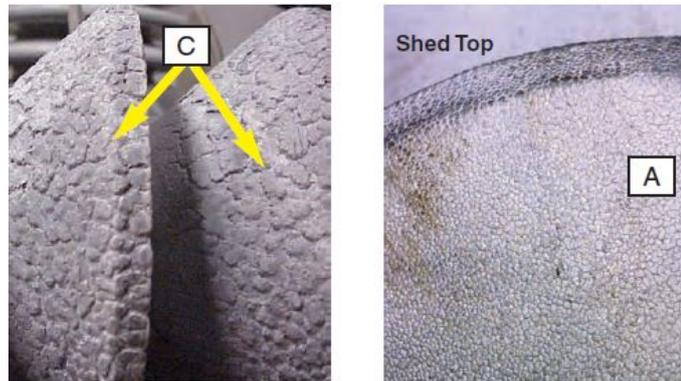


Figura 4.5: Exemplo de escamação avançada (esquerda) e ligeira (direita) [21].

Erosão Ligeira (*Light Erosion*)

Consiste na perda irreversível de material compósito na superfície do revestimento com penetrações menores a 1 mm (Figura 4.6). Esta degradação ocorre sobretudo nas proximidades dos terminais metálicos devido às exigências elétricas a que essa zona está sujeita. Pode ocorrer intensificação da erosão de forma acelerada caso as condições de serviço sejam severas, e nesse caso será considerado dano.



Figura 4.6: Erosão ligeira numa aba perto do terminal metálico [21].

Desunião ligeira (*Minor debonding*)

Ocorre entre diferentes componentes do isolador e é considerado como degradação desde que o núcleo não esteja exposto. Esta ocorrência verifica-se sobretudo em isoladores com múltiplas peças com adesivos de fraca qualidade, nomeadamente nas ligações entre abas e o restante revestimento (Figura 4.7). Pode resultar do mau armazenamento ou manuseamento incorreto durante a

instalação. Segundo [22] trata-se de um problema exclusivo a um determinado produtor, o qual foi identificado e corrigido. Adianta ainda que não foram registadas falhas devido a este problema.



Figura 4.7: Caso de desunião entre aba e revestimento [22].

Ondulação das saias (*Shed ondulation*)

As saias podem adquirir forma ondulada quando sujeitas a temperaturas elevadas ou devido a condições incorretas de armazenamento/manuseamento. Esta modificação estrutural não apresenta riscos para o funcionamento normal do isolador, porém, o encurtamento da distância entre abas pode facilitar a ocorrência de descargas parciais entre elas.



Figura 4.8: Deformação do perfil das abas adquirindo forma ondulada [22].

Fuga de massa de silicone (*Grease leakage*)

Alguns produtores apostam no uso de massa de silicone para garantir a fixação dos componentes que constituem um isolador de multi peças (Figura 3.6 b) e c)). Esta massa com função de adesivo e isolamento encontra-se sob pressão e, por vezes, ocorre à superfície através dos locais de uniões das peças. Como se trata de um material viscoso, ao longo do tempo agarra as poeiras e detritos e ganha uma cor negra (Figura 4.9). Esta ocorrência não impõe a substituição do isolador, a não ser que esta brote de locais onde não existem pontos de interligação de peças, o que pode indicar perfuração do revestimento por projecteis, por exemplo. Como tal, este tipo de defeito é circunscrito a isoladores que são fabricados por vários moldes e requerem várias uniões.

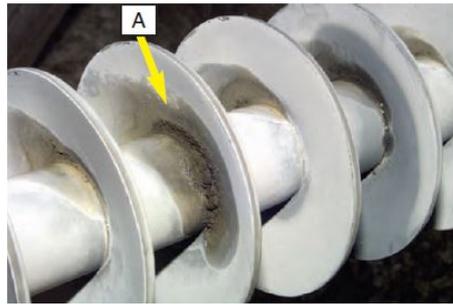


Figura 4.9: Fuga de massa em locais de contacto entre aba e revestimento do núcleo [21].

Corrosão (*Corrosion*)

Degradação dos terminais metálicos consequentes das reações químicas ocorridas com o meio envolvente (Figura 4.10). Se a galvanização das peças metálicas for fraca, a corrosão avançará a um ritmo avançado, colocando em questão a segurança mecânica do isolador. Num estado inicial, esse perigo é reduzido, mas a sua evolução deve ser acompanhada, merecendo a classificação de B segundo a EPRI.

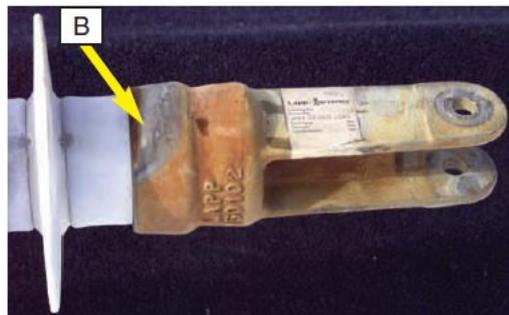


Figura 4.10: Corrosão no terminal metálico, à qual é atribuída a classificação de B [21]

Perda de hidrofobia (*Loss of hydrofobicity*)

A perda de hidrofobia é um sinal claro de agressões ao revestimento do isolador, tanto por ações do meio ambiente como por atividades elétricas. Após períodos de repouso, algum desse comportamento hidrofóbico pode ser recuperado, contudo, à medida que o isolador envelhece, a sua degradação é evidente e, de forma gradual, verificam-se maiores acumulações de água na superfície do isolador (Figura 4.11). Esta ocorrência pode ser generalizada, mas verifica-se sobretudo perto dos terminais metálicos devido à intensificação das solicitações elétricas.

4.2.1 Danos nos isoladores

Define-se dano (damage) como transformações irreversíveis na constituição física do isolador, resultantes da sua exposição prolongada a condições severas ou atos isolados de caráter violento.

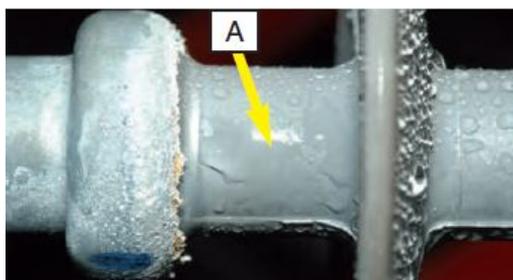


Figura 4.11: Perda parcial de hidrofobia localizada perto dos terminais metálicos. [21]

Quando expostas a condições adversas por longos períodos, as degradações podem levar ao aparecimento de defeitos que comprometam a estabilidade estrutural e funcional do isolador, ou seja, reduzindo drasticamente o seu desempenho dielétrico e o seu tempo médio de vida útil, ou até mesmo conduzindo à sua avaria. Como as monitorizações do estado físico dos isoladores são feitas esporadicamente, o aparecimento de danos representa riscos elevados na continuidade de serviço do componente, porque, durante esse período, ações como descargas atmosféricas violentas ou eventos meteorológicos podem causar modificações significativas na sua estrutura. Por esse motivo, em certos casos, a diferença entre classificar uma pequena transformação como deformação ou dano é ténue, já que rapidamente pode evoluir para um estado mais avançado e revelar-se perigoso. Veja-se por exemplo a oxidação dos terminais metálicos ou registo de erosões. Por vezes, os isoladores são danificados de tal forma que mantê-los em serviço representa riscos inaceitáveis para o sistema elétrico e devem ser substituídos. De seguida são apresentados vários tipos de danos na estrutura do isolador e classificados segundo [21] [23].

Rastejamento e queimadura (*Tracking and burning*)

Trata-se de uma degradação irreversível que consiste na formação de um caminho condutor na superfície do material polímero (Figura 4.12), com aparência carbonizada, e que dificilmente é removido, continuando a conduzir mesmo quando o revestimento está seco. Deve-se à ocorrência de correntes de fuga elevadas numa superfície altamente contaminada. Este caminho condutor representa uma fragilidade do revestimento e facilita a formação de contornamentos.



Figura 4.12: Caso de ocorrência de rastejamento severo perto do terminal metálico [21].

Dano por contornamento (*Power Arc Damage*)

As disrupções elétricas são fenômenos momentâneos caracterizados por correntes elevadas que produzem elevações significativas na temperatura do material polimérico, vara fibrosa e até mesmo nas partes metálicas. Mais uma vez, a parte mais afetada situa-se na interligação entre os terminais metálicos e o revestimento (Figura 4.13), devido às condições de campo elétrico aí presentes. A danificação deste ponto leva à exposição da vara de fibra de vidro a atividade elétrica e água, que como visto, pode originar a destruição da mesma, e, por fim, a falha mecânica do isolador.



Figura 4.13: Interligação queimada devido a contornamento [21].

Perfuração (*Puncture*)

A perfuração num isolador compósito define-se como dano no material polimérico devido a descargas disruptivas através do material dielétrico que causam perda permanente de rigidez dielétrica. Num estado inicial, este dano identifica-se como um pequeno orifício profundo no revestimento, normalmente na interligação entre as abas e o revestimento do núcleo, resultante de descargas elétricas intensas, que permite a violação da vara. Assim, quando se regista este dano num isolador, este deve ser prontamente substituído, caso contrário o equipamento poderá falhar prematuramente ou evoluir para danos mais visíveis e com maior exposição do interior (Figura 4.14).

Desunião (*Debonding*)

Separação de diferentes peças do isolador devido à falha do adesivo responsável pela interligação (Figura 4.15). Regista-se entre peças de borracha ou na ligação com os terminais metálicos, devido à baixa qualidade do adesivo ou manuseamento incorreto. É potencialmente perigoso para o isolador, visto que a vara pode ficar exposta aos agentes de degradação.

Erosão (*Erosion*)

Considera-se a erosão como dano quando a profundidade por perda de material polimérico no núcleo do revestimento ultrapassa 1 mm. Nesta situação, a redução da espessura do revestimento



Figura 4.14: Exemplo de pequena perfuração no revestimento do isolador na parte inferior, o qual pode rapidamente expandir-se para uma situação semelhante à do topo [21].



Figura 4.15: Desunião entre aba e revestimento do núcleo [21].

fragiliza a resistência do material aos ataques dos agentes de degradação, o que pode provocar exposição da vara. A Figura 4.16 mostra um caso de erosão severa no fim do revestimento, com início na aba e propagação para o revestimento do núcleo.



Figura 4.16: Caso de erosão severa na aba e revestimento do núcleo [21].

Exposição da vara (*Exposure of FRP*)

Consiste na exposição da vara de fibra de vidro às condições ambientais, devido a fenómenos que danificam o revestimento do núcleo (Figura 4.17), tais como erosão, rastejamento, perfuração, projéteis, desuniões, condições incorretas de manuseamento/instalação, entre outros. Acontece em casos de extrema atividade elétrica na superfície do revestimento, ambientes de poluição severa e/ou fraca qualidade do material do polímero. Neste caso, deve-se efetuar a substituição do isolador com urgência, visto que este acontecimento antecipa uma falha iminente.



Figura 4.17: Degradação severa do revestimento e exposição do núcleo, resultante de ações de atividades elétricas na superfície [21].

4.3 Modos de avaria

A falha estrutural de um isolador compromete a continuidade de serviço de uma linha de transmissão de energia, de forma não programada, durante o período necessário à sua substituição. A falta de monitorização do estado físico, a fraca qualidade do compósito, e exposições prolongadas a poluição severa e esforços elétricos elevados podem resultar em danos sérios e, nos piores dos casos, em falha mecânica do isolador. As falhas mais preocupantes dos isoladores estão diretamente relacionadas com o fracasso da vara de fibra de vidro interna, conseqüente dos ataques a que esta está sujeita após violação do seu revestimento. De facto, e como visto anteriormente, geralmente as degradações nas abas não comprometem a estabilidade mecânica do isolador. Todavia, quando se verificam envelhecimentos no revestimento do núcleo, há um risco inerente à violação da FRP por infiltrações de água ou exposição a descargas elétricas, com especial atenção em regiões próximas dos terminais metálicos.

A perceção do tipo de falhas destes equipamentos é fundamental para a evolução da confiança, estabilidade e tempo médio de vida. Neste sentido, a EPRI leva a cabo questionários às empresas de fornecimento de energia acerca dos problemas que encontram nos isoladores compósitos uma vez em serviço. Esta informação é então compilada e tratada numa base de dados, onde são realçadas as principais causas e tipo de falhas dos isoladores compósitos, as quais são diferenciadas segundo causas mecânicas ou elétricas. Procura-se estabelecer o peso percentual que falhas como

fratura frágil, disrupção interna, destruição por atividade elétrica, quebra do núcleo e desacoplamento dos terminais representam nos acontecimentos relatados. De seguida são apresentadas as falhas mais comuns dos isoladores.

Fratura frágil (*Brittle fracture*)

Trata-se de uma falha mecânica do núcleo de FRP por separação completa, em duas ou mais partes, de forma transversal, resultante da combinação de ataques químicos com a tensão mecânica exigida ao isolador em serviço. Foi demonstrado que os agentes presentes nas resinas epoxies que impregnam as fibras de vidro da vara podem tornar-se ácidos na presença de água [24]. Como visto anteriormente, a resistência da fibra de vidro a estes ataques depende do tipo de material que a constitui e ainda do valor de concentração de ácido e da tensão mecânica a que o núcleo está sujeito. Num estado inicial, o ataque dos ácidos leva à rutura das fibras de vidro, originando fraturas internas que se desenvolvem transversalmente ao eixo axial. Esse desenvolvimento prolongar-se-á até ao momento em que a secção não suporta a tensão exigida e quebra. A fratura caracteriza-se por uma ou mais superfícies planas, sobretudo perpendiculares ao eixo, dando aparência que a vara foi cortada. Verifica-se ainda a separação de conjuntos de fibras segundo o eixo axial, designado de laminação (*delamination*). Frequentemente, a propagação da quebra do núcleo pela parte mais resistente origina o aparecimento de um espigão (*broomstick*), tal como demonstrado na Figura 4.18.

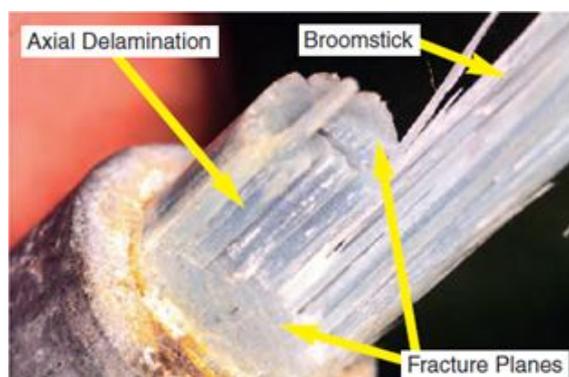


Figura 4.18: Exemplificação de fratura frágil com registo de planos fratura, laminação e espigão [21].

Disrupção interna (*Flashunder*)

A disrupção interna é uma avaria elétrica que ocorre quando a humidade entra em contacto com o núcleo de fibra de vidro e proporciona a formação de um caminho condutor pelo interior do isolador através do aumento gradual de condutividade. Portanto, trata-se da formação de rastejamento através do interior da vara FRP ou na sua interface com o revestimento, que compromete a capacidade de resistir à diferença de potencial a que o isolador está sujeito. Quando as ações dos

agentes degradantes se estendem para lá de uma distância crítica dentro do núcleo, o isolador não resiste à tensão elétrica aplicada e ocorre uma disrupção interna através de um caminho resistividade elevada. Muitas vezes, após esta ocorrência e religação da linha de transmissão, o isolador pode providenciar isolamento suficiente e prevenir um defeito imediato. Tal deve-se ao facto da disrupção secar o interior do isolador e aumentar a resistência do isolador defeituoso. Contudo, com o tempo e nova infiltração o equipamento fica sujeito a novos defeitos, até ao ponto em que se regista a destruição da vara. Este tipo de falhas caracteriza-se pela manifestação de danos no revestimento que exponham a vara às condições atmosféricas, como é o caso pontos de perfuração, erosões, desuniões e outros. Além disso, o núcleo FRP adquire uma cor negra no percurso do caminho condutor, tal como é exposto na Figura 4.19.



Figura 4.19: Vara FRP seccionada axialmente com registo de rastejamento devido a disrupções internas [21].

Destruição por descargas elétricas

Consiste na destruição do núcleo e consequente falha mecânica devido a descargas elétricas intensas através de caminhos condutores formados pela penetração de água na estrutura interna do isolador. Deve-se ao prolongamento ou intensificação das disrupções internas, as quais podem carbonizar a fibra de vidro e causar o enfraquecimento da sua resistência à tração, de tal forma que o núcleo não é capaz de suportar a carga e cede (Figura 4.20). Tem especial incidência nas interligações entre os terminais metálicos e o revestimento polimérico graças à combinação da infiltração de água com as exigências elétricas.

Desacoplamento do núcleo

Como visto na secção 3.1.1, a ligação entre a vara FRP e os terminais metálicos é um processo deveras importante para assegurar a estabilidade do isolador ao garantir coesão de ligação e distribuição dos esforços mecânicos exigidos. O aquecimento excessivo da vara FRP, decomposição da matriz da resina e falta de compressão são exemplos de erros no processo de produção que, em combinação com cargas mecânicas, podem originar falhas quando em serviço. Nestes casos



Figura 4.20: Carbonização da vara FRP e consequente falha mecânica [21].

o núcleo separa-se dos terminais metálicos ou falha por quebra, tal como demonstrado na Figura 4.21.



Figura 4.21: Separação do núcleo dos terminais metálicos devido à decomposição da matriz de resina e excesso de carga mecânica [21].

4.4 Defeitos nos isoladores cerâmicos

As diferenças estruturais dos isoladores cerâmicos relativamente aos compósitos conferem comportamentos distintos face aos agentes degradantes. De forma geral, os cerâmicos são vulneráveis a danos por impacto, já que o material dielétrico é quebradiço, todavia altamente resistente a ataques químicos e descargas elétricas, com especial ênfase nos isoladores de porcelana, uma vez que o vidro é mais suscetível a ataques por parte de descargas [25]. O cumprimento da sua tarefa é especialmente ameaçada em ambiente de clima tropical, onde as condições atmosféricas são caracterizadas por humidade relativa persistente e acima de 80%, em que a corrosão pode levar à falha dos isoladores. A condensação da humidade na superfície diminui a impedância do caminho de fugas e facilita a circulação de correntes de fuga com amplitudes mais elevadas bem como maiores termos harmónicos [26], e, portanto, ocorrência de disrupções que causam corrosões nas partes metálicas como os espigões. Esta corrosão ocorre sobretudo na interface tripla de materiais metálicos, cimento e ar, causando a dilatação da parte enferrujada e aumento do stress na zona de ligação com o cimento. Além disso, a contaminação atmosférica pode contribuir tanto

para a diminuição da resistividade do caminho de fugas como para ataques ao cimento, com especial atenção para compostos salinos. Mais, a ocorrência de abrasão excessiva na superfície dos isoladores aumenta a rugosidade das abas e diminui a capacidade do isolador resistir à poluição, além de que compromete a galvanização das partes metálicas da cadeia. A deposição de sal forma um caminho condutor eletrolítico que aumenta a probabilidade de ocorrência de contornamento quando a superfície se encontra molhada. Logo, o combate à fixação de contaminantes em ambientes com poluição elevada é fundamental para a resistência a disrupções e prevenção de degradação antecipada, sendo que a solução passa, por exemplo, pelo aumento do perfil da parte inferior das abas. Testes de envelhecimento acelerado a isoladores cerâmicos mostram taxas de falha 15 a 30 vezes superior em casos de nevoeiro com partículas de sal em comparação com nevoeiro livre de contaminantes [27].

O aparecimento de corrosão e aumento da pressão na zona de interligação do cimento com porcelana pode danificar a coesão do dielétrico e causar fissuras radiais e perfuração. Testes de performance elétrica e mecânica a isoladores com estas falhas internas mostram reduções consideráveis nas propriedades dos isoladores de porcelana [27]. Falha de unidades dentro de uma cadeia de isoladores cerâmicos contribui para a diminuição do caminho de fugas, aumento da probabilidade de ocorrência de disrupções elétricas, bem como aumento das solicitações elétricas aplicadas aos equipamentos são, o que leva à aceleração do processo de degradação, e no pior dos casos, à avaria e queda dos condutores.

A monitorização do estado físico das cadeias assume um papel preventivo quanto à possibilidade de falha das cadeias de isoladores, até porque grande parte dos equipamentos em serviço já ultrapassaram ou estão perto de ultrapassar o tempo médio de serviço de 30 anos [28]. Em alguns casos este período já foi largamente ultrapassado. A identificação de danos nos isoladores de vidro são facilmente perceptíveis, visto que a saia danificada estilhaça restando apenas resíduos junto da cabeça metálica. A libertação rápida das forças de expansão no interior do vidro temperado é responsável pelo estilhaço espontâneo da saia, enquanto a parte superior é contida pela campânula metálica. Tal ocorre sobretudo por deformação adquirida durante o processo de fabrico ou por atos de vandalismo. Por sua vez, defeitos em cadeias de isoladores de porcelana não são facilmente perceptíveis, uma vez que ocorrem maioritariamente dentro da campânula metálica. O número de defeitos e a sua dimensão aumentam com o tempo e podem causar perfuração. Portanto, a deteção de eventuais fragilidades passa pelo uso de equipamentos de trabalho em tensão, descritos anteriormente, os quais requerem mais recursos financeiros que uma simples inspeção visual.

De facto, os isoladores cerâmicos são objetos com larga aplicação e registam muitos anos de experiência, o que permite padronizar os seus comportamentos consoante as circunstâncias de serviço. A variedade de degradações e danos destes equipamentos é substancialmente menor que nos isoladores compósitos, mas não os torna necessariamente mais fiáveis, visto que a sua falha também compromete a estabilidade da linha de transporte. Os longos anos de aplicação desta tecnologia permitem esperar defeitos específicos na estrutura dos isoladores, os quais são apresentados de seguida.

Perfuração

Consiste na perda de rigidez dielétrica pela diminuição do caminho de fugas através de um percurso menos resistivo pelo interior do material cerâmico, ou seja, permite a ocorrência de disrupções elétricas através do material dielétrico (Figura 4.22). Estas ocorrências resultam de falhas no interior do dielétrico resultantes de fenômenos de sobretensões (choque atmosférico e sobretensões de manobra) ou de defeitos adquiridos durante o fabrico. Um transitório de frente rápida pode exceder a rigidez dielétrica do cerâmico de tal forma que não permite o contornamento pela aba e atravessa o seu volume, devido ao elevado gradiente de subida da tensão aplicada. Portanto, trata-se de um fenómeno dependente de frequências elevadas.



Figura 4.22: Caso de múltiplas perfurações no volume de porcelana, identificáveis pela cor mais escura [29].

Cria-se um caminho propício à penetração de água e ponto de fragilidade a stress mecânicos, sem evidências visíveis. A ocorrência de perfuração num isolador de vidro leva a que este se desintegre. Nos isoladores de campânula e espigão estes fenómenos ocorrem com maior frequência no topo da interligação entre cerâmica e partes metálicas devido às solicitações elétricas mais intensas, e com menor frequência pertos das abas, tal como mostra a Figura 4.23, numerado de 1 a 3 por ordem decrescente de ocorrência.

Crescimento e erosão do cimento

A composição de cimento usada nos isoladores para unir a cerâmica às partes metálicas é capaz de reagir com certos elementos atmosféricos e assim influenciar o volume de expansão ou contração do material. O aumento desse volume aplica forças de compressão à cerâmica numa zona de maior stress mecânico, originando uma fratura radial e conseqüente propagação ao longo do dielétrico (Figura 4.24). Como se trata de uma fratura, nos isoladores de vidro este acontecimento resulta no estilhaço da respetiva saia. A estrutura química de cimentos hidratados é de tal

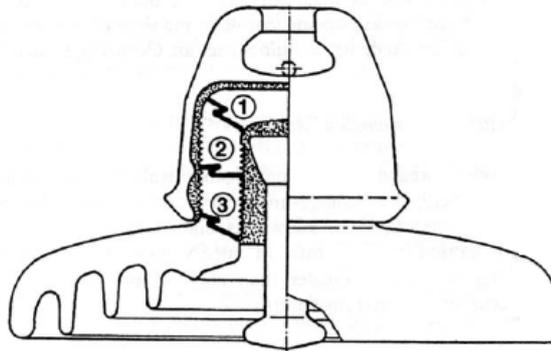


Figura 4.23: Classificação de zonas de maior probabilidade de ocorrência de fenômenos de perfuração em isoladores do tipo campânula e espigão [29].

forma complexa que se torna difícil diagnosticar com rigor quais as condições que levam à expansão do cimento [3], sendo apenas possível identificar possíveis reagentes como óxidos de cálcio e magnésio. Este problema tende a ser específico de um lote de produção.

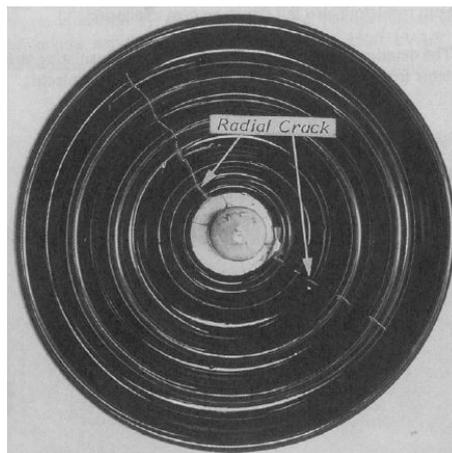


Figura 4.24: Exemplo de fratura radial devido ao crescimento do volume do cimento [29].

Por outro lado, um cimento de fraca qualidade sujeito a ocorrência de fenômenos de coroa pode erodir de tal forma que deixa de garantir a união entre a cerâmica e as partes metálicas. Fica especialmente enfraquecido na presença de contaminantes atmosféricos como sal e certos sulfatos, ambos conhecidos por atacar o cimento [3]. Neste caso, o isolador perde resistência mecânica à tração e as partes que o constituem desacoplam-se, interrompendo a continuidade de uma cadeia.

Corrosão das partes metálicas

A galvanização das peças metálicas pode ser enfraquecida pela ação de detritos presentes no ar, o que permite a sua corrosão de forma rápida, especialmente em casos de corrente contínua (devido à deslocação de cargas elétrica e criação de diferença de potencial permanente na parte metálica)

e com humidade elevada. Espigões envelhecidos tendem a apresentar corrosão nos pontos de interceção entre o cimento e ar o que comporta um enfraquecimento da resistência mecânica. Esta degradação leva ao aumento do volume dos metais e conseqüente pressão na interligação com o cimento. Portanto, há uma perda de resistência mecânica e possibilidade de fraturas tanto no cimento como na cerâmica. A corrosão ligeira no corpo da campânula não representa riscos à estabilidade, porém serve diagnóstico de falha de galvanização destas peças.

Vandalismo

Muitas vezes as especificações técnicas dos isoladores cerâmicos indicam a capacidade, em joules, destes resistirem a impactos de projecteis ou quedas. De facto, a propriedade quebradiça dos cerâmicos torna-os alvo de vandalismos através de tiros de armas de fogo ou arremessos de pedras, com especial ênfase nos isoladores de vidro, visto que estes estilhaçam. Como tal, há uma redução do caminho de fugas e aumento da probabilidade de contornamento, porém, no caso dos isoladores de vidro, não existe necessariamente redução instantânea da capacidade mecânica da cadeia, uma vez que as partes metálicas continuam a assegurar as ligações entre os componentes. Para certas empresas de distribuição e transporte de energia, o facto de estes equipamentos serem alvo de grande número de ataques por diversão, justifica a sua substituição por isoladores compósitos.

Capítulo 5

Solicitações em Serviço

As condições de operação de uma linha de distribuição ou transporte representam solicitações comportamentais aos isoladores que afetam o grau de isolamento ou fiabilidade ao longo do tempo. A atuação dos isoladores exteriores é função das circunstâncias ambientais, tais como a poluição atmosférica ou níveis de precipitação, que ao longo do tempo podem reduzir efetivamente a capacidade de isolamento da linha sob tensão para a estrutura de suporte com potencial nulo, e assim comprometer o funcionamento contínuo do sistema elétrico. De facto, a falha de operação de isoladores representa grande parte das saídas de serviço das linhas elétricas. É essencial identificar as principais causas de envelhecimento e degradação dos equipamentos através da perspetivação das solicitações esperadas aquando em serviço para cada local de implementação. Além disso, o tipo de tecnologia utilizada diferencia a reação do isolador aos esforços aplicados, isto é, enquanto os cerâmicos são inertes à degradação das suas abas por parte de agentes químicos, os compósitos podem apresentar alguma degradação, porém, estes últimos possuem melhor comportamento dielétrico em ambientes de poluição elevada. A escolha do equipamento deve ter em conta as fraquezas de cada material e ponderar as possíveis vantagens tecno-económicas em função do tempo esperado de operação.

O envelhecimento dos isoladores e conseqüente perda de propriedades dielétricas deve-se à ação combinada de agentes de várias naturezas que ao longo do tempo afetam a estrutura dos equipamentos. Estas naturezas podem ser categorizadas segundo influências elétricas, mecânicas e ambientais. Por vezes as relações entre estes agentes são pouco perceptíveis devido à complexidade de intervenientes, tal como o grau de severidade que certas condições representam. Além disso, estão dependentes da qualidade e formato dos equipamentos utilizados. Estas incertezas são mais elevadas no caso dos isoladores compósitos porque as cadeias poliméricas do material de revestimento são dinâmicas e, dependendo do tipo de composição, capazes de recuperar algumas das características afetadas, nomeadamente hidrofobia e novas ligações moleculares, após algum tempo sem adversidades. O envelhecimento do polímero do revestimento é ditado pela quebra das cadeias poliméricas ou das interligações existentes entre elas, resultando em segmentos menores e conseqüentes perdas físicas.

Para melhor compreensão dos processos de degradação, são efetuados estudos com processos

de envelhecimento artificial acelerado, os quais perspetivam a velocidade e diferentes etapas de degradação. Trata-se de uma prática especulativa e muitas vezes com resultados mais severos do que aqueles que se verificam num envelhecimento natural. Veja-se, por exemplo, que na degradação artificial não é concedido tempo e condições para que o material recupere alguma das suas propriedades, tal como poderia acontecer quando exposto às condições de serviço. Enquanto no primeiro as condições ambientais são programadas e expostas durante períodos de tempo específicos, no segundo são variáveis e incertas, o que possibilita períodos de menores solicitações e possibilidade de regeneração parcial. Desta forma, os testes laboratoriais procuram determinar quais as solicitações mais prejudiciais para diferentes tipos de compostos poliméricos, por forma a identificar possíveis avanços tecnológicos e assim aumentar a sua fiabilidade em serviço.

5.1 Fatores ambientais

A poluição ambiental é uma das maiores ameaças a sistemas de isolamento exteriores, e está diretamente relacionada com a geografia da localização das linhas de transmissão. Consoante a sua localização e área envolvente, um isolador pode encontrar diferentes tipos de poluentes capazes de formar gradualmente uma camada sólida de contaminação, a qual influencia significativamente o desempenho dielétrico a curto e longo prazo. Para além disso, os equipamentos estão sujeitos a condições atmosféricas que podem levar à modificação da sua estrutura molecular.

5.1.1 Poluição atmosférica

Partículas como areia e outros elementos do solo, substâncias metálicas e químicas de zonas industrializadas e/ou agrícolas, bem como cristais salinos são exemplos de contaminantes passíveis de se depositar na superfície das abas. No caso de contaminantes solúveis, juntamente com humidade ou chuva ligeira, cria-se um caminho condutor que leva ao aumento da corrente de fugas ao longo da superfície do isolador. Por conseguinte, dá-se um aumento da temperatura da superfície possibilitando a ocorrência de fenómenos elétricos de banda seca, bastante prejudiciais nos isoladores compósitos. Assim, as zonas tropicais, devido à sua humidade relativa elevada, são mais severas para a estabilidade do equipamento, com maior incidência nos isoladores cerâmicos. Todavia, a intensidade de corrente de fugas nos isoladores de porcelana numa atmosfera salina em clima tropical está diretamente relacionada com a concentração de sal, enquanto nos compósitos depende sobretudo com a da intensidade de pluviosidade [2]. Neste sentido, os isoladores poliméricos apenas apresentam valores mais elevados de correntes de fuga para situações de chuva mais intensa ou de grandes concentrações de sal juntamente com humidade elevada. Tal explica-se pelo facto das gotas se distribuírem de forma discreta ao longo da superfície do revestimento polimérico, além de que a propriedade hidrofóbica sobrepõe-se à camada de contaminantes (Figura 5.1), dificultando a circulação dessas correntes. Não obstante, a perda progressiva da hidrofobia leva a que a contaminação depositada contribua para a formação de um caminho condutor.

A deposição de sedimentos e a criação de camadas de poluição distorcem ainda mais o campo elétrico ao longo dos isoladores, proporcionando locais de maior solicitação elétrica e consequente



Figura 5.1: Caso de transferência de propriedade hidrofóbica para camada de poluição [30].

ocorrência de fenômenos de coroa e descargas parciais. Este é um exemplo claro das relações interdependentes entre agentes de degradação.

Em outros casos, os isoladores podem estar sujeitos a fontes de humidade com propriedades condutoras tais como água salgada, nevoeiro industrial ácido, misturas químicas e fertilizantes, e chuvas ácidas, grande parte dos quais oriundos de atividades humanas. Estas substâncias eletrolíticas podem provocar aumentos instantâneos da intensidade de correntes de fuga e assim permitir fenômenos de contornamento sem necessidade de deposição de outros contaminantes na superfície do equipamento [6].

A contaminação biológica também contribui para a diminuição da resistência do caminho de fugas, bem como alteração da distribuição do campo elétrico. Bolores ou fungos são organismos capazes de se desenvolver na superfícies dos isoladores, sobretudo orientados para norte, devido à ausência de incidência direta de luz solar [15].

Com efeito, a caracterização das zonas de instalação segundo o nível de poluição ambiental é fundamental no projeto das linhas de alta tensão, por forma a dimensionar corretamente a distância mínima de fugas do isolador em função da tensão em causa, e assim garantir maior resistência a descargas disruptivas. A normalização dos ambientes típicos de poluição apresentada na IEC 60815 [31] subdivide-se em cinco níveis de classificações segundo registos de densidade de deposição de contaminantes ao longo de um período mínimo de um ano: a) muito ligeira; b) ligeira; c) média; d) elevada; e) muito elevada (Tabela 5.1). Esta auxilia ainda na escolha do tipo de tecnologia e perfis de design mais indicados para diversos tipos de poluição. Por sua vez, e de uma forma mais compacta, a IEC 60071-2 [1] classifica quatro cenários possíveis de classificação, com linhas de fuga específicas mais reduzidas, visto ser apoiada ainda numa versão anterior da norma IEC 60815. O dimensionamento máximo da IEC 60071 é de apenas 31 mm/kV enquanto a versão mais recente da IEC 60815 sugere um dimensionamento em função das medições de poluição obtida, sendo valor central para o caso mais elevado de 53,7 mm/kV.

Como é perceptível, estas classificações não têm em conta os ambientes propícios à formação de gelo, sendo este tema bastante diversificado em soluções, as quais podem ser orientadas pela

bibliografia [32] da CIGRE. Após considerações das possíveis circunstâncias ambientais no local de instalação, e assumindo uma relação direta entre o caminho de fugas e a tensão suportável do equipamento, o projetista deve atender de forma ponderada às especificações na escolha da distância mínima de caminho de fugas.

Nível de Poluição	Exemplos de ambientes típicos	Caminho de fuga mínimo recomendado (mm/kV)
Muito Ligeira	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas sem indústria e com baixa densidade de casas, distanciadas de pelo menos 10 km de qualquer tipo de poluição humana. - Áreas distanciadas de pelo menos 50 km de qualquer mar, deserto ou terra seca. <p>Estes valores podem ser reduzidos caso o vento prevalecente não seja direto de fontes de poluição e/ou a zona verifique chuvas mensais.</p>	22
Ligeira	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas sem indústria e com baixa densidade de casas, distanciadas entre 5 a 10 km de qualquer tipo de poluição humana. - Zona a 10-50 km de qualquer mar, deserto ou terra seca. <p>Estes valores também podem ser reduzidos tal como no caso anterior.</p>	27,8
Média	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas distanciadas de 3 a 10 km de qualquer mar, deserto ou terra seca. - Local a 1-5 km de fontes de poluição com origem humana. - Ocorrência de nevoeiros, e/ou Chuvas com condutividade elevada, após longos períodos de época seca com acumulação de poluentes. 	34.7
Elevada	<ul style="list-style-type: none"> - Local até 3 km de qualquer mar, deserto ou terra seca, e/ou 1 km de fontes de poluição de atividade humana. - Ocorrência de nevoeiros, e/ou Chuvas com condutividade elevada, após longos períodos de época seca com acumulação de poluentes. 	43.3
Muito Elevada	<p>Semelhante ao caso de poluição elevada mas sujeitos a influências como:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Brisas marítimas ou nevoeiros salinos de forma direta; - Contaminantes de alta condutividade ou poeira de cimento, frequentemente molhados pelo nevoeiro; 	53.7

Tabela 5.1: Descrição aproximada de em ambientes típicos para os vários níveis de poluição [31]

Quanto aos perfis das saias dos isoladores, a norma IEC 60815 refere a preferência de declives baixos para casos de deposição por ação do vento (desertos e zonas industriais), com ângulos inferiores a 20° entre a perpendicular do núcleo e a linha de aba, por forma a permitir a limpeza natural por chuvas e vento, bem como em ações de manutenção. Declives mais acentuados são indicados para áreas costeiras onde se verifica deposição por pulverização, vento ou nevoeiro. O perfil alternado é recomendado sobretudo para locais de grande pluviosidade, visto que permite aumentar o caminho de fugas com o mesmo comprimento total. Da mesma forma, os isoladores cerâmicos apresentam perfis mais abertos para melhores condições de limpeza por ação do vento ou perfis inferiores maiores para dificultar a deposição de sedimentos. Estas escolhas são fundamentais para garantir estabilidade no funcionamento quando em serviço e menores efeitos de degradação no corpo do equipamento.

5.1.2 Radiação ultravioleta

Os isoladores compósitos exteriores estão sujeitos à influência da radiação ultravioleta da luz solar capaz de pôr em causa a qualidade do revestimento exterior após longos períodos de exposição. Aproximadamente 43% da radiação está na zona de infravermelhos e apenas aquece a superfície do isolador, tal como grande parte da zona de radiação visível (53%), enquanto os últimos 5% de UV (400 a 290 nm) excitam as cadeias poliméricas. Este processo de transformação é muitas vezes designado por fotodegradação e é acelerado na presença de poluição, menores concentrações de ozono e temperaturas elevadas [13].

Observações a isoladores após 15 anos de serviço no Reino Unido relatam degradações assimétricas na estrutura, isto é, a parte da aba orientada a Sul estava manchada e com perda de cor, sobretudo na parte superior das abas, porque a exposição solar era direta [26]. Já a face orientada para Norte, sem incidência direta, apresentava crescimento de compostos orgânicos. A situação é agravada com a aproximação ao equador terrestre, uma vez que as temperaturas são mais elevadas juntamente com as condições atmosféricas mais exigentes. Dependem ainda de fatores como altitude, estação do ano e altura do dia.

Quando colidem com a superfície dos isoladores, os fótons libertam energia suficiente para quebrar as interligações das cadeias poliméricas nas ligações Si-C (301 kJ/mol), mas não as Si-O (447 kJ/mol) [26]. Além das quebras das ligações moleculares, o revestimento pode ser oxidado como resultado da ionização das moléculas e consequente fixação de oxigénio atmosférico na sua estrutura (foto-oxidação). Os aditivos presentes na mistura de produção do revestimento (secção 3.2) podem ser suscetíveis à influência da radiação UV devido às suas ligações mais fracas, e assim, reduzem a resistência da superfície do polímero. O ATH é um ponto controverso, porque aparentemente é resistente a este tipo de ataque, mas análises à sua concentração por vezes mostram algumas variações difíceis de compreender.

A absorção de UV resulta em degradações químicas e mecânicas da estrutura polimérica, reduzindo a resistência a fenómenos de descargas parciais, esforços de tração e possível aumento de degradações por parte de fenómenos sinérgicos. Os efeitos visuais desta degradação consistem

em: gretamento, fissuração e descoloração, bem como perda gradual das propriedades hidrofóbicas. Posto isto, a exposição do isolador a radiações elevadas de UV juntamente com os efeitos de outros fatores ambientais e elétricos podem ser a chave para o início da degradação dos materiais compósitos.

5.1.3 Gelo

O gelo e neve são agentes degradantes naturais que representam risco para a segurança das linhas de transporte de energia elétrica, visto que fenómenos de maior escala podem danificar mecanicamente as estruturas de apoio bem como reduzir a capacidade de isolamento. A ocorrência destes fenómenos e o tipo de severidade estão diretamente relacionados com o clima local, a topologia e o grau de poluição. De facto, zonas com poluição elevada e sem capacidade de limpeza dos isoladores por ação das chuvas, como é o caso das regiões mais frias, possibilitam a dissolução de frações de contaminantes no gelo ou neve, o que leva ao aumento da condutividade elétrica e consequente aumento da probabilidade de descargas disruptivas, as quais degradam a estrutura dos isoladores.

A condutividade aumenta drasticamente quando a temperatura do gelo ou neve se aproxima do ponto de fusão (entre -1°C e 0°C), altura até à qual a poluição é embebida na sua constituição e então libertada para a superfície. Além disso, a condutividade aumenta fortemente com o aumento da grossura e tamanho da camada de forma na superfície do isolador. Mais, com o aumento da altitude e, com efeito, diminuição da pressão de ar, a tensão necessária para ocorrência de disrupção diminui [33].

A ocorrência de contornamentos nos isoladores está relacionada com as distâncias no ar das camadas de gelo ou neve que se formam na superfície. Posto isto, a configuração do tamanho e forma das abas determina o comportamento dos isoladores consoante o grau de severidade do fenómeno. Quanto maior for o diâmetro das saias, menor será a intensidade de campo elétrico em situações de gelo, logo menor a probabilidade de ocorrência de contornamentos [34]. Todavia, esta relação não é proporcional visto que a intensidade de campo elétrico tende a diminuir cada vez menos com o aumento desse diâmetro. Por forma a diminuir a probabilidade de formação de camadas que interliguem as diferentes saias e assim diminuir a linha de fugas, são utilizadas configurações de perfil alternado, tipicamente com três diâmetros diferentes ou duas abas iguais consecutivas (Figura 5.2). Este tipo de configurações é especialmente interessante para camadas de gelo com espessuras superiores a 10 mm.

Para acumulações moderadas ou elevadas, a linha de fugas fica muitas vezes drasticamente reduzida através das pontes de gelo que se formam entre as abas, de tal forma que não oferece garantia de resistência a sobretensões pouco elevadas. Logo, a seleção do equipamento a utilizar nestes ambientes passa sobretudo pelo sobredimensionamento da linha de arco. Neste ponto, os isoladores compósitos oferecem maiores vantagens comparativamente aos cerâmicos, visto que os produtores podem oferecer uma gama vasta de perfis de diâmetros e espaçamentos das saias, enquanto os cerâmicos, de forma geral, apresentam um perfil mais rígido quanto às distâncias entre isoladores.



Figura 5.2: Formação de camada vertical de gelo num isolador cerâmico com perfil alternado [35].

Situações de contornamento por acumulação de neve têm merecido menor atenção por parte dos investigadores comparativamente a contornamentos por gelo, visto que os primeiros são menos frequentes. Desde que a neve se mantenha seca e fria não produz grandes modificações na resistência dielétrica. Ainda assim, a acumulação de neve aumenta os esforços mecânicos nos isoladores e torres, podendo mesmo levar à rutura de cadeias de isoladores danificados ou ainda à deformação das abas dos isoladores compósitos. Estas deformações podem causar pontos de maior concentração de campo elétricos e descargas parciais localizadas.

Posto isto, a formação de camadas de gelo representa maiores riscos à integridade dos isoladores, especialmente compósitos, uma vez que facilita a ocorrência de contornamentos através das pontes que se originam entre as abas. Estes contornamentos podem levar a registos de rastejamento ou erosão. Já nos isoladores cerâmicos, o risco de degradação é menor, porém a sua rigidez dielétrica tende a ser menor devido às limitações de perfil.

5.2 Atividade elétrica

O desempenho dielétrico dos isoladores de alta tensão depende da distribuição do campo eléctrico ao longo da sua estrutura. Campos eléctricos muito intensos ou deveras disformes fomentam a ocorrência de descargas parciais sob a forma de efeito coroa, descargas de banda seca e contornamentos, as quais podem acelerar rapidamente o processo de envelhecimento e degradação, ou até mesmo destruir o equipamento. A frequência e intensidade destes fenómenos estão intimamente relacionadas com o tipo e nível de poluição a que os isoladores estão sujeitos. De facto, as descargas parciais são apontadas como causa principal de envelhecimento dos isoladores compósitos [25]. A resistência do revestimento exterior polimérico é reforçada pela adição de fillers, sendo o ATH o mais importante, porque previne degradações mais severas ao decompor-se em alumina

e água aos 220°C, auxiliando na refrigeração da superfície. Contrariamente ao verificado com a radiação UV, as descargas elétricas possuem energia suficiente para quebrar as ligações entre o silicone e oxigênio [26].

5.2.1 Efeito Coroa

O facto dos isoladores cerâmicos possuírem peças metálicas ao longo da sua cadeia proporciona uma distribuição mais uniforme do campo elétrico comparativamente aos isoladores compósitos. A constituição física destes últimos apresenta baixa permeabilidade ao campo elétrico, o que origina distribuições disformes com especial incidência nas proximidades dos terminais metálicos. Aí a intensidade de campo elétrico é várias vezes superior à registada no meio da estrutura. Como tal, quando a linha se encontra sob tensão, o revestimento exterior está sujeito a solicitações elétricas relativamente constantes com intensidade dependente do nível de tensão e comprimento do equipamento. Após alguns anos em serviço podem ser registadas diferenças quanto ao estado do revestimento entre zonas mais próximas dos terminais e do meio do isolador compósito devido à ocorrência de descargas parciais [25]. Da mesma forma, os isoladores cerâmicos também podem apresentar maiores degradações nas pontas das cadeias, sobretudo nas interligações entre peças metálicas e cimento.

O efeito coroa consiste na ionização de um fluido quando exposto a um campo elétrico intenso, em que a sua intensidade visual (arco) e sonora (zumbido) depende da intensidade desse campo e resulta numa mistura de energia térmica, radiação (Figura 5.3) e compostos iónicos como ozono e óxidos nitrosos, os quais podem converter-se em ácido nitroso na presença de humidade [36]. O ataque químico por parte destes ácidos ao revestimento, juntamente com a ação da radiação, provoca a degradação da superfície do isolador compósito. A degradação térmica não é um problema inerente à ocorrência de efeito coroa, uma vez que a temperatura não atinge valores entre os 200°C e 300°C necessários ao início desse processo. Os principais sinais de envelhecimento por efeito coroa são: gretamento, fissuração, perda significativa de hidrofobia no local de descarga ou erosão ligeira. No caso dos cerâmicos ocorre oxidação nas partes metálicas.

A extinção e reaparecimento deste tipo de fenómeno estão particularmente relacionados com a variação da polaridade de correntes de fuga alternadas fortes ao longo da superfície do isolador. A intensificação do campo elétrico, como consequência de maiores níveis de tensão, leva ao aumento da intensidade dessas correntes e, conseqüentemente, ao aparecimento de efeitos de coroa cada vez mais audíveis e visualmente mais marcantes. Portanto, o valor da corrente de fuga é um fator de grande influência no estado do arco, uma vez que, se o seu valor for muito elevado, a energia acumulada no processo de descarga será maior, necessitando de mais tempo para deionizar. Neste caso, o arco não se extingue por completo quando a corrente atingir o valor nulo, formando um plasma que facilmente reacende a descarga no novo ciclo. Por outro lado, para valores mais reduzidos de corrente de fugas, mas suficientemente elevados para iniciar o processo, a descarga elétrica apresenta um comportamento intermitente, ou seja, extingue-se e reaparece [37]. A intensificação do efeito de coroa pode anteceder a ocorrência de uma descarga disruptiva, uma

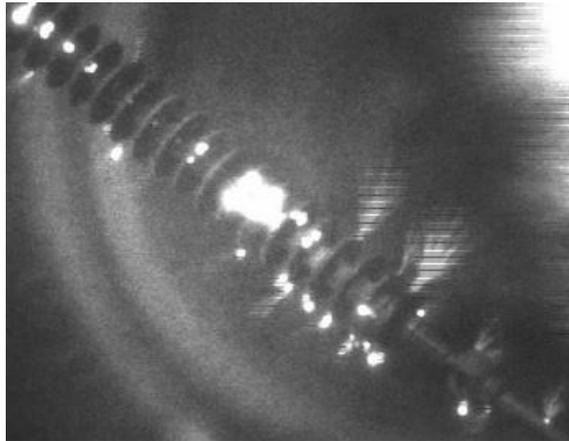
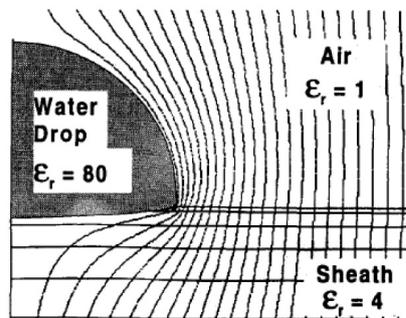


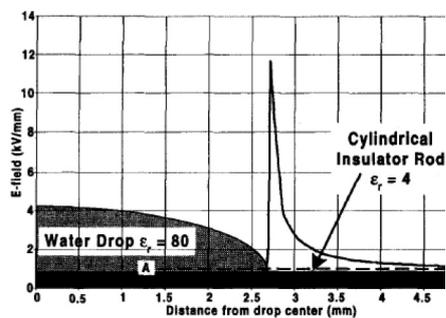
Figura 5.3: Ocorrência de efeito coroa num isolador composto [29].

vez que possibilitam a ionização do ar através de um processo cumulativo, de tal forma que facilite o contornamento do isolador.

A degradação da superfície do isolador leva ao aparecimento de teores harmônicos elevados na forma de onda das correntes de fugas, sobretudo quando o revestimento está molhado [25]. Frequências elevadas facilitam o aparecimento de fenômenos elétricos, contribuindo para a degradação do isolador.



(a) Equipotential lines



(b) Electric field profile

Figura 5.4: Aumento do campo elétrico no ponto de junção tripla [6]

A presença de gotas de água na superfície do isolador proporciona o aumento da atividade elétrica, sobretudo quando há depósito de poluição que contribua para o aumento da sua condutividade. Como apresentam grande permeabilidade elétrica, contrariamente à superfície cerâmica ou polímera, as gotas provocam o aumento localizado da intensidade do campo elétrico. É conhecido que o ponto de junção tripla entre a água (líquido), dielétrico (sólido) e ar (gás), que devido às diferentes permeabilidades, provoca aumentos dos valores máximos do campo elétrico disforme (Figura 5.4) [37]. Quanto maior for o número de gotas na superfície, maiores serão as distorções do campo, levando inclusive à intensificação da magnitude do campo perto dos terminais metálicos (Figura 5.5). Numa perspetiva global do isolador, o facto da superfície se encontrar molhada, provoca aumentos na intensidade média do campo elétrico ao longo de toda a estrutura, tal como é possível verificar na Figura 5.6 [38]. Nas experiências realizadas em [37] registaram-se aumentos de 1.22 a 1.44 vezes da intensidade do campo elétrico comparativamente ao caso de superfície seca. A presença de várias gotas e intensidades fortes de campo levam a que os fenómenos de coroa se desenvolvam entre os vários pontos de junção tripla, desde os extremos do isolador até à secção do meio, podendo ocorrer contornamento.

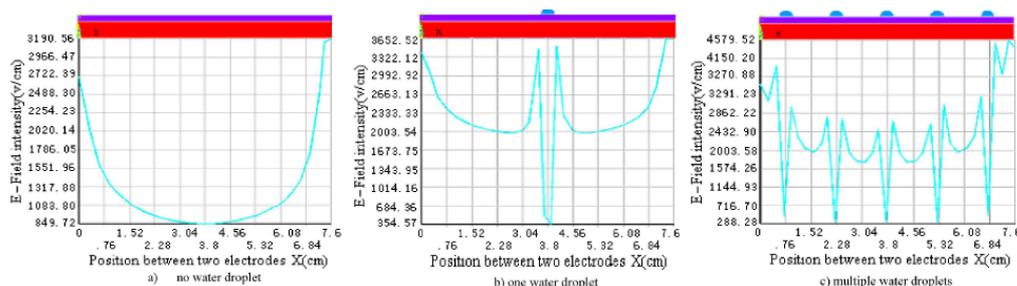


Figura 5.5: Distribuição do campo elétrico ao longo de uma superfície polimérica seca (esq), com uma gota ao centro (meio) e com cinco gotas (dir) [37].

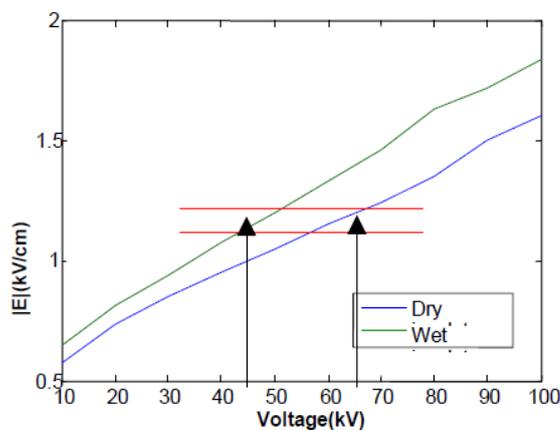


Figura 5.6: Simulação do campo elétrico médio ao longo da superfície do isolador em superfície seca (azul) e molhada (verde) [38].

Além disso, a intensificação do campo elétrico produz movimentos nas gotas de água que causam alterações nas suas formas (extensão, vibração, ondulação, ressonância), localização, quantidade e volume (evaporação, coalescência). Por conseguinte, a junção tripla tende a alongar-se com o achatamento das gotas (Figura 5.7) providenciando maior área de ocorrência do efeito coroa. A forma que as gotas tomam na presença do campo elétrico depende ainda de fatores como a inclinação, nível de hidrofobia, energia livre da superfície e temperatura [39]. A condutividade e volume das gotas influenciam significativamente os efeitos coroa. O aumento da condutividade consiste em maiores concentrações de íons capazes de distorcer mais o campo elétrico, além de diminuir a resistência à passagem da corrente de fugas e, portanto, mais facilmente ocorrem fenômenos elétricos. Por sua vez, o aumento do volume de água provoca distorções do campo mais alongadas devido ao diâmetro da gota. Todos estes fatores influenciam a tensão necessária para a ocorrência de descargas de efeito coroa assim como o seu poder e frequência.

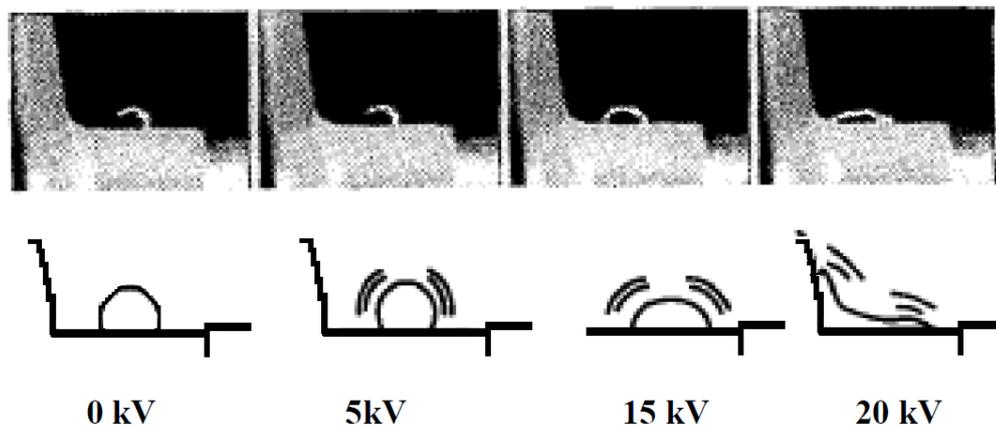


Figura 5.7: Comportamento de gotas de água na presença de diferentes intensidades de campo elétrico [39].

Uma forma de controlar as solicitações elétricas registradas perto dos terminais metálicos passa pela aplicação de anéis de coroa, os quais consistem numa peça em alumínio com forma de anel tubular de superfície lisa (Figura 5.8). A escolha do alumínio deve-se ao facto de este material apresentar maiores vantagens quanto ao peso da peça, bem como maior resistência à corrosão. Não obstante, algumas empresas de distribuição substituem o alumínio pelo aço, visto que o segundo apresenta ponto de fusão superior. A presença do anel de coroa provoca uma redistribuição do campo elétrico para uma situação de menor concentração de linhas equipotenciais nas zonas de maior risco de ocorrência de degradação no ponto de interceção entre dielétrico, terminal metálico e ar. De facto, há uma diminuição substancial da magnitude desse campo, o que diminui a probabilidade de ocorrência de descargas por efeito coroa [38]. A Figura 5.9 mostra a intensidade de campo elétrico ao longo de um isolador composto para uma tensão nominal de 230 kV com e sem anel de coroa, onde é perceptível a diminuição brusca da intensidade nos primeiros centímetros do equipamento e o aumento ligeiro desse campo nas áreas intermédias [38]. Todavia, esta

diminuição é menos acentuada quando o anel e a superfície do isolador se encontram molhadas, atingindo muitas vezes valores capazes de iniciar o processo de descargas elétricas.



Figura 5.8: Exemplo de aplicação de anel de coroa num isolador composto [21].

A distribuição do campo elétrico e potencial ao longo do isolador, especialmente junto dos terminais metálicos, está diretamente relacionada com a geometria do anel, nomeadamente com o diâmetro do tubo anelar (secção transversal), da distância a que se encontra dos terminais metálicos e diâmetro do anel. Em [40] conclui-se que quanto maior for o diâmetro da secção transversal do tubo, menor será a intensidade máxima verificada nas zonas mais críticas. É de aceitação global que as dimensões ótimas e localização do anel dependem do tipo de isolador e tipo de aplicações em causa, uma vez que o campo elétrico é ainda afetado pelo tipo de terminais, número de condutores e modelo de torre de apoio. Por exemplo, para aplicações até 220 kV é recomendado o uso de apenas um anel no terminal de alta tensão, já para tensões iguais ou superiores a 400 kV devem ser implementados anéis em ambos os terminais [40]. Contudo, o uso deste equipamento leva necessariamente ao aumento do tamanho do isolador porque diminui a distância de arco do mesmo.

5.2.2 Descargas em bandas secas

A formação de descargas em banda seca está ligada com a formação de caminhos eletrolíticos ao longo da superfície de um isolador e com humidades elevadas no ambiente que o rodeia. A ocorrência destes fenómenos pode ser severa para a integridade do material dielétrico, em função do tempo de duração, desenvolvendo temperaturas elevadas perto da superfície capazes de formar rastejamento ou erosões graves. De facto, trata-se de um agente de grande relevância na destruição do material dielétrico, principalmente no caso dos polímeros, os quais, apesar de possuírem fillers (ATH) capazes de reduzir esses efeitos, podem perder quantidades significativas de material caso as descargas sejam persistentes.

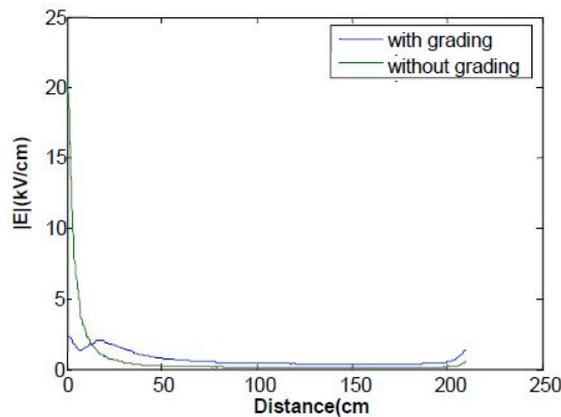


Figura 5.9: Cálculo da distribuição de campo elétrico ao longo do isolador composto com e sem anel de coroa[38].

Em condições de humidade elevada, a superfície de um isolador contaminado fica molhada e estabelece um caminho com maior condutividade elétrica do que a superfície do isolador, conduzindo ao aumento da corrente de fugas. A heterogeneidade da distribuição da poluição depositada cria resistividades distintas ao longo da superfície do dielétrico, e assim, estabelecem-se caminhos prioritários à circulação dessas correntes. Ora, quanto maior for a condutividade, maior será a corrente de fugas por esse caminho, e maiores serão as perdas ohmicas nesse local, visto que são proporcionais ao quadrado da corrente. Essas perdas provocam o aumento da temperatura e consequente evaporação da água nessas zonas, secando-as mais rapidamente que caminhos com menor condutividade. As bandas secas tendem a formar-se sobretudo em zonas estreitas, visto que aí a densidade de corrente é superior. O aparecimento dessas zonas origina distorções elevadas no campo elétrico na superfície do isolador que provocam diferenças potenciais significativas capazes de levar ao aparecimento de descargas elétricas. A intensidade do campo elétrico na banda seca difere ao longo da direção circunferencial, com valor máximo do seu centro e enfraquece com o afastamento do mesmo [41]. A criação deste tipo de descargas parciais pode ser alimentada por picos de corrente de fugas, agentes poluentes ou gases ionizados, de tal forma que se criam pontes entre regiões secas, culminando no contornamento do isolador. De seguida é esquematizado na Figura 5.10 a sucessão de eventos que levam ao aparecimento destes fenómenos.

A capacidade de hidrofobia num isolador é determinante na prevenção de descargas de banda seca em casos de humidade elevada, uma vez que limita a circulação da corrente de fugas ao distribuir as gotas de forma discreta. Nos isoladores cerâmicos, as gotas tendem a coalescer facilmente sob a ação da gravidade ou do campo elétrico, criando caminho condutor para essas correntes. Porém, nos isoladores compostos, a energia térmica libertada nestas descargas é suficiente para quebrar as ligações principais das cadeias poliméricas, e assim infligir danos sérios à integridade do revestimento do isolador, enquanto os cerâmicos são mais resistentes a estes fenómenos. A capacidade de resistência dos isoladores compostos depende se houve transferência da hidrofobia para a superfície da camada de poluição. Caso não se verifique tempo suficiente, a água é

rapidamente mineralizada e coalesce.

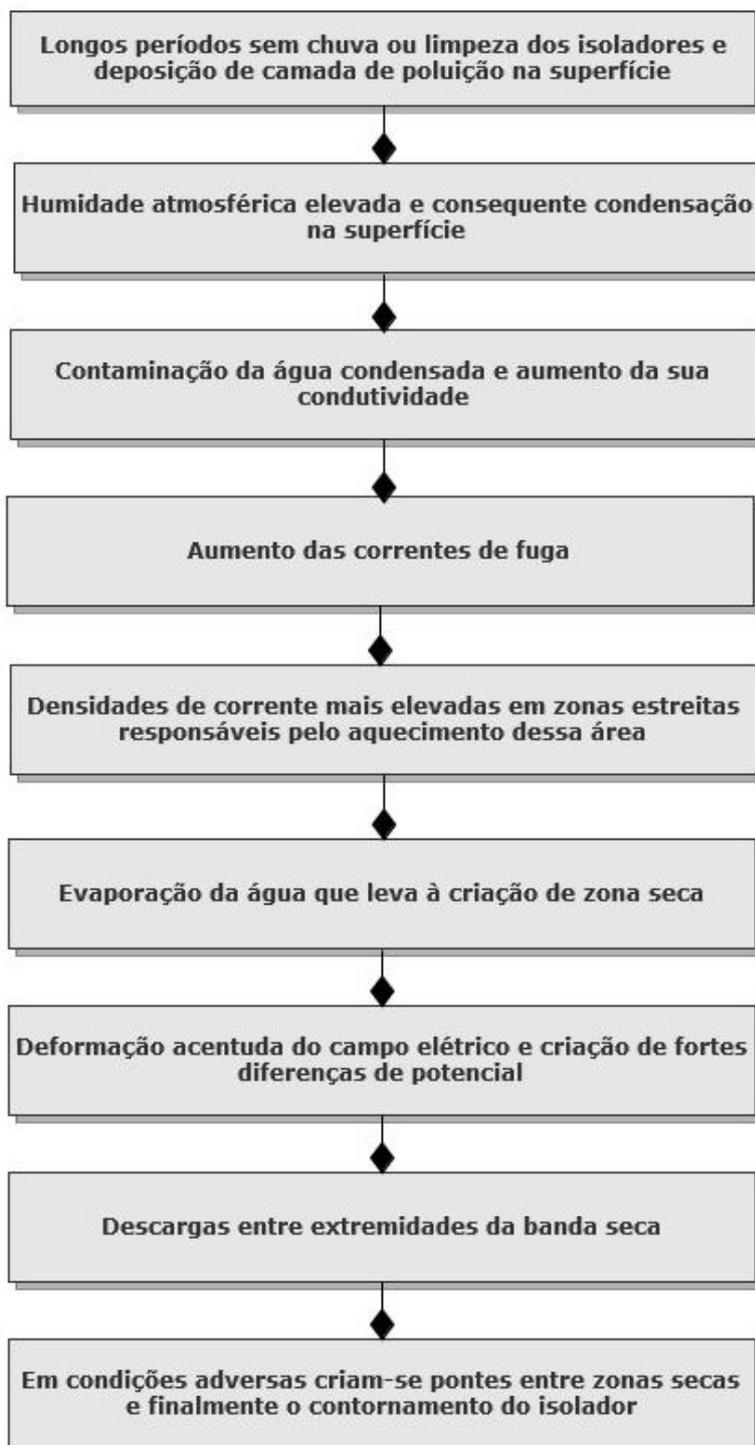


Figura 5.10: Sequência de eventos para formação de descargas em banda seca.

5.3 Esforços mecânicos

Dependendo do tipo de instalação e da estrutura da torre de suporte, os isoladores de linhas são sujeitos a solicitações de cargas verticais (compressão ou tração) ou cargas transversais (stress de curvatura) capazes de degradar a sua estrutura ao longo do tempo de serviço e enfraquecer as ligações de suporte entre os vários constituintes. A escolha destes equipamentos tem em conta o peso dos condutores elétricos, além de excedentes temporários que possam aumentar as forças aplicadas, os quais são admitidos segundo fatores de segurança.

As cargas solicitadas a um sistema de suporte estão dependentes da variabilidade das influências meteorológicas. Em situações de vento forte, o diâmetro do condutor oferece uma frente à passagem do ar o que leva a um aumento significativo das forças aplicadas, dependente ainda do tamanho do vão em causa e da existência ou não de camadas de gelo. A formação de gelo nos condutores e nas abas dos isoladores conduz à diminuição da aerodinâmica do conjunto e ao aumento do stress mecânico tanto por ação do vento como do peso do gelo. Além disso, as oscilações produzidas pelo seu movimento provocam fissuras nas interfaces dos diferentes componentes do isolador, com especial ênfase no caso dos cerâmicos já que são materiais quebradiços e de baixa plasticidade. O aparecimento de micro fraturas nos isoladores de porcelana é ponto de partida para o desenvolvimento de fraturas mais acentuadas que se desenvolvem sobre efeito de variações temporais de carga mecânica e efeitos térmicos ao longo do tempo, que por fim podem levar à perda de material dielétrico. Esse desenvolvimento é acelerado no caso de o isolador apresentar um desenho com vários pontos de tensão originados no processo de fabrico.

No caso de linhas com cabos de alta temperatura, os isoladores devem ser sobredimensionados para lá do peso efetivo dos condutores, visto que estes últimos perdem resistência mecânica ao transformar o alumínio rígido para um estado mais pastoso. Consequentemente, há uma solicitação extra ao isolador com uma carga superior àquela registada quando a linha transporta baixas potências.

Em regiões desérticas quentes, a temperatura média pode facilmente ultrapassar os 40°C durante o dia e cair para valores inferiores a 10°C durante a noite. Esta amplitude térmica é capaz de infligir danos internos na estrutura dos isoladores devido às diferentes constantes térmicas dos vários materiais que os constituem. Mais uma vez, este efeito afeta especialmente os isoladores de linha cerâmicos devido à presença de vários constituintes metálicos.

A resistência mecânica dos isoladores compósitos está relacionada com a qualidade da vara FRP e da sua ligação aos terminais metálicos. Já os cerâmicos estão sujeitos à qualidade individual de cada isolador da cadeia, ou seja, de todas as interfaces que constituem uma unidade de isolador campânula e espigão. Um processo de fabrico deficiente num dos componentes pode causar facilmente a queda das linhas numa situação de maiores exigências.

Outro aspeto importante na degradação por efeitos mecânicos prende-se com o transporte, armazenamento e manuseamento dos isoladores. Uma das principais causas de falha dos isoladores compósitos é a falta de cuidado no manuseamento do equipamento, porque produzem danos no revestimento polimérico que representam pontos de fraqueza durante o tempo de serviço. O



Figura 5.11: Forma incorreta de içar um isolador composto. A corda deve ser atada nos terminais metálicos por forma a não danificar as abas [42].

armazenamento incorreto pode deformar o perfil dos isoladores compostos, de tal forma que a distribuição do campo elétrico é modificada originando intensificações de potencial ao longo da superfície. Portanto, os isoladores compostos devem ser colocados em tubos de cartão reforçado ou em caixas de madeira até ao momento de instalação e não devem ser empilhados com qualquer outro equipamento. Além disso, deve-se ter precauções quanto aos ataques de roedores ao material polimérico. Devem ser manuseados com grande precaução, sem arremessos, quedas ou torções e não devem ser içados ou agarrados por cordas nas abas, contrariamente ao que se verifica na Figura 5.11.

Nos isoladores cerâmicos atos de negligência durante estes processo são facilmente perceptíveis porque o material quebra e facilmente se deteta e substitui por unidade sã. Porém, tal como no caso dos compostos, isoladores defeituosos em serviço diminuem a resistência tanto às solicitações elétricas como mecânicas.

Capítulo 6

Casos de Aplicação e Vantagens Tecno-Económicas

A introdução dos isoladores compósitos no mercado tem apresentado um crescimento mais significativo durante o século XXI com tendência a substituir os isoladores convencionais num nicho de mercado algo específico. De facto, a creditação das suas capacidades tem-se desenvolvido ao ritmo das experiências relatadas após utilização em casos práticos, nomeadamente em linhas de alta e média tensão, bem como subestações e aparelhos de proteção. Procura-se compreender o desenvolvimento do seu estado físico e das características dielétricas após alguns anos em serviço, sobretudo em condições mais adversas. Apesar de se reconhecerem vantagens intrínsecas no comportamento dielétrico e mecânico dos isoladores compósitos, regista-se uma predominância dos isoladores de porcelana nos vários campos de aplicação, justificada pela previsibilidade de comportamento deste tipo de tecnologia ao longo do seu tempo médio de vida útil. A maturidade da tecnologia dos isoladores cerâmicos confere um grau de confiança elevado para vários casos de aplicação, contrariamente aos compósitos que têm evoluído em concordância com os avanços na robustez dos materiais poliméricos, modificações de desenhos e relatos de casos de aplicação. Com efeito, a adoção alargada dos isoladores não cerâmicos por parte das empresas energéticas e ferroviárias é limitada pelo desconhecimento do seu desempenho e receio de aplicação em sistemas que exigem graus de fiabilidade elevados. Apesar de existirem casos de referência quanto ao sucesso do uso dos compósitos, assiste-se a um receio na aplicação generalizada para linhas de transmissão, visto que o processo de envelhecimento não é de todo compreendido ou não são efetuados estudos para avaliar o seu comportamento para as diferentes condições de operação. Não obstante, a escolha dos compósitos em função de uma análise antecipada das solicitações esperadas quando em serviço, pode resultar em vantagens técnicas e económicas significativas, visto que este tipo de material oferece comportamentos mais satisfatórios em condições de poluição e humidade elevadas comparativamente aos cerâmicos. Portanto, deve-se efetuar uma ponderação entre as vantagens reconhecidas, quer por estudos laboratoriais quer em serviço, com os receios de envelhecimento antecipado do revestimento polimérico. Geralmente, cada companhia implementa os isoladores compósitos em linhas de teste e aí avaliam a sua evolução, classificando-os

como aptos ou não para as solicitações normais registadas em determinadas geografias e modos de aplicação.

Por forma a compreender a aceitação dos compósitos por parte da indústria, entidades como a EPRI e CIGRE realizam periodicamente inquéritos onde procuram perceber as razões para a sua implementação, amplitude de uso, e possíveis dificuldades que possam ocorrer. Com isto pretendem criar bases de dados referentes às experiências técnicas onde é possível identificar as principais razões para a sua aplicação, tipo de degradações registadas e modos de aplicação. Além disso, proporciona informação útil para a indústria na escolha do tipo de material, modos de aplicação, níveis de tensão mais indicados, periodicidade de manutenção por forma a maximizar o tempo de vida útil do isolador e a sua fiabilidade. Em 2002 a EPRI realizou nova recolha de experiências [42], concluindo que a taxa de falha nos isoladores compósitos é aproximadamente 1 em cada 65000 exemplares vendidos. Em 70 respostas aos inquéritos, 65 tinham experiência com os isoladores compósitos, onde se averiguou que grande parte das aplicações eram efetuadas em configurações de suspensão ou suporte, enquanto as amarrações finais eram menos frequentes devido ao risco elevado desta disposição. Os níveis de tensão mais frequentes para situações superiores a 69 kV eram 115-138 kV seguidos de 220-230 kV. Para tensões superiores, os casos registados são mais escassos, tal como aplicações em corrente contínua. Esse inquérito conclui ainda que grande parte das empresas efetuam inspeções às condições dos isoladores, sendo que as técnicas mais usuais consistem na inspeção visual durante caminhada (60% dos casos) seguida por passagem de helicóptero (45%). Apesar da primeira ser mais eficaz e precisa, a segunda é geralmente mais frequente com períodos médios de ocorrência de aproximadamente 8 meses, inferior aos 20 meses da caminhada. Conclui-se ainda que todas as companhias utilizam anel de coroa para aplicações superiores a 220 kV.

A contagem das falhas ocorridas permite calcular o tempo de serviço dos isoladores, tendo-se verificado que grande parte deles ficou comprometido durante os 2 ou 3 primeiros anos após instalação, o que é justificado por tratamento incorreto e/ou defeitos de fabrico. Todavia, neste estudo, não é feita uma relação entre o tempo de serviço e o modo de aplicação, tipo de material polimérico, ou geração dos isoladores. Refere apenas que as principais causas de falha se devem a fraturas frágeis e disrupções internas (Figura 6.1) como consequência da infiltração de água pela interligação entre os terminais metálicos e o revestimento exterior. De facto, a informação recolhida é tratada de forma discreta sem relacionar percentualmente os eventos registados, ou seja, não é feita uma análise da relação entre o número de falhas ocorridas nas várias condições (modo de aplicação, níveis de tensão, tipo de material, . . .) com o número de isoladores em serviço nas instalações das empresas questionadas.

A atribuição dos fatores que levaram à falha dos equipamentos é um tanto ou quanto subjetiva porque muitas vezes as companhias descartam a responsabilidade de danos na estrutura do isolador durante o processo de instalação retribuindo-as para os produtores, apesar destes últimos, após investigação da falha, apontarem para condições deficientes de aplicação. Deve-se ter em conta que parte das falhas participadas à EPRI ocorreram em isoladores de primeira e segunda geração e, portanto, não representam diretamente a qualidade e fiabilidade atual da tecnologia dos

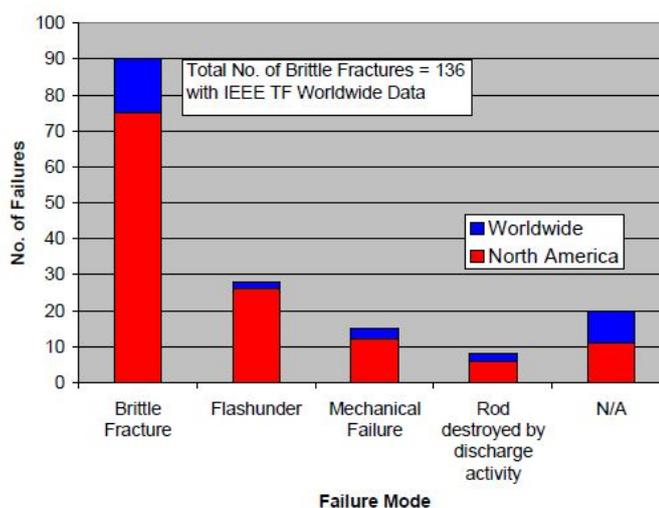


Figura 6.1: Grafismo onde são indicados o número de registos para cada tipo de falha dos isoladores compósitos por classificação das empresas ou EPRI. A parcela N/A corresponde a situações para as quais não foi possível atribuir uma causa específica por falta de informação ou por ainda se encontrar em investigação. Note-se que o número de registos mundiais é reduzido, visto que o inquérito incidiu sobretudo em empresas norte-americanas [42].

compósitos, a qual tem evoluído para satisfazer as variadas necessidades de operação através de sofisticções no desenho e qualidade dos produtos e mesmo métodos de produção. Assim sendo, espera-se que o número de falhas por unidade instalada seja reduzido com a maturação desta tecnologia.

6.1 Vantagens dos isoladores compósitos

A conquista de espaço no mercado por parte dos isoladores compósitos foi um processo gradual e diretamente relacionado com as experiências relatadas pelas companhias que apostavam nas suas características para a resolução de problemas para os quais os cerâmicos eram pouco eficazes. Várias concessionárias de redes admitem terem aguardado pela normalização nacional ou internacional dos métodos de aplicação e monitorização deste tipo de equipamentos, enquanto outras arriscavam a sua utilização em linhas de teste. A evolução desta tecnologia permitiu ganhar vantagens operacionais e económicas significativas relativamente aos isoladores cerâmicos para situações algo específicas, isto é, para condições climáticas adversas e/ou concentrações elevadas de poluição natural ou consequente de atividade humana. O nível de confiança na utilização dos isoladores compósitos tem vindo a crescer com o aumento da sua implementação em linhas elétricas e subestações, bem como integração em equipamentos de proteção. Com efeito, quanto maior for a sua aplicação, maior serão os casos de estudo e avaliação que contribuirão para a evolução da fiabilidade dos mesmos. Não obstante, as vantagens operacionais que estes equipamentos representam estão dependentes de uma seleção do perfil adequado e da constituição química do revestimento, bem como de um manuseamento e instalação apropriados por forma a suportarem os

exigências elétricas e mecânicas.

De forma geral as características físicas e comportamentais dos isoladores compósitos permitem identificar as seguintes vantagens:

- **Peso** — Dependendo da linha de arco necessária, os isoladores compósitos representam em média uma redução de 90% do peso comparativamente aos isoladores cerâmicos. De facto, um isolador compósito para 138 kV é facilmente manuseado visto que pesa apenas 3.8 kg, enquanto uma cadeia de isoladores cerâmicos pode apresentar umas dezenas de quilogramas (aproximadamente 55 kg) devido à quantidade de peças metálicas que incorporam. Como tal, a instalação dos compósitos é deveras facilitada quer em termos de manuseamento, transporte, elevação e colocação na torre de transmissão, o que permite ainda:
 - Processos de instalação expressivamente mais rápidos, logo menores custos de mão de obra;
 - Infraestruturas de suporte mais leves e conseqüente redução das armações das torres de transmissão com poupanças significativas no custo de aquisição e montagem da estrutura;
 - Logística de transporte mais reduzida;
 - Infraestruturas de elevação mais compactas;
- **Resistência a Vandalismo** — Como visto anteriormente na secção 4.4 o ataque à integridade das cadeias de isoladores cerâmicos por parte de transeuntes é um sério problema para a fiabilidade dos equipamentos, visto que a quebra da porcelana ou o estilhaçamento do vidro (caso mais frequente e mais severo) resulta na perda de linha de fuga, ou seja, redução da rigidez dielétrica do conjunto. Ora, o facto do revestimento compósito apresentar elasticidade e, portanto, comportamento não quebradiço, aumenta a probabilidade de a estrutura se manter intacta e com a mesma capacidade dielétrica, caso o vandalismo não afete o revestimento do núcleo. Posto isto, como a estrutura não quebra ou estilhaça, o interesse em vandalizar a estrutura é reduzido. Além disso, há uma poupança elevada nos custos de aquisição e substituição de equipamentos vandalizados. Por este motivo, várias companhias de transporte ferroviário apostaram fortemente na substituição de todos os isoladores cerâmicos por compósitos junto das travessias pedonais ou rodoviárias das suas linhas. O ataque aos isoladores compósitos com recurso a armas de fogo não representam riscos à operacionalidade do isolador compósito desde que não perfurem o revestimento do núcleo, de tal forma que possibilite infiltração de água para a vara FRP.
- **Rigidez Mecânica** — A resistência a esforços de tração por parte do núcleo interno, como consequência da elasticidade das fibras de vidro, permite a aplicação dos isoladores compósitos para um leque elevado de solicitações mecânicas, nomeadamente no suporte de linhas elétricas quer em modo de amarração quer suspensão, e ainda em casos de condutores de alta temperatura. Além disso as suas características mecânicas conferem ainda:

- Resistência reforçada a sismos comparativamente aos isoladores cerâmicos, uma vez que o número elevado de interligações numa cadeia de isoladores de porcelana ou vidro representam possíveis pontos de quebra na presença de vibrações mais violentas. Quanto maior for a cadeia, maior será o risco de colapso porque a propagação das ondas sísmicas provocam oscilações mais violentas no conjunto.
 - Resistência a impactos devido ao seu comportamento não quebradiço, representando uma vantagem em termos de armazenamento, transporte e manuseamento comparativamente aos cerâmicos. Estima-se que 7 a 10% dos isoladores de porcelana e vidro adquiridos quebram durante esses processos [43], e como tal existe um risco de perda de investimento dos materiais que deve ser, ponderado no momento de aquisição. De certa forma, os cerâmicos requerem maiores preocupações quanto à sua integridade estrutural durante os processos de manuseamento, visto que facilmente quebram e perdem a sua funcionalidade.
- **Desempenho avançado com contaminação** — A possibilidade de transferência ao longo do tempo do comportamento hidrofóbico para a camada de poluição depositada na superfície do revestimento dos isoladores compósitos (especialmente no caso dos SiR) representa uma vantagem significativa no comportamento dielétrico comparativamente aos cerâmicos. Em caso de chuva ou condensação elevada de humidade após longos períodos de seca, em que não há lavagem natural da superfície, a água é distribuída de forma discreta sobre a camada de poluição sem que a mesma se dissolva e crie um caminho eletrolítico que favoreça a condutividade de correntes de fuga. Há uma diminuição efetiva do risco de contornamento em casos de poluição mais severa. É neste tipo de condições que os compósitos têm crescido como material de eleição para aplicação em linhas elétricas com número elevado de contornamentos. Vários são os casos de substituição de isoladores cerâmicos por compósitos em locais sujeitos à ação de brisas marítimas, deposição de areias, ambientes tropicais, entre outros. De facto, a hidrofobia apresentada pelos polímeros é uma peça chave no prática avançada deste tipo de equipamentos. Além disso, como o seu comportamento nestas circunstâncias é mais fiável, reduz-se a necessidade de operação de manutenção de limpeza dos isoladores, o que leva a poupanças elevadas nos custos durante o período de serviço.
 - **Resistência ao fogo** — A integração de aditivos na formulação do polímero, nomeadamente do ATH, resulta numa defesa ativa da superfície do revestimento contra temperaturas superiores a 220°C devido à decomposição do composto de onde resulta a libertação de água e conseqüente arrefecimento. Em caso de incêndios das zonas circundantes há uma segurança reforçada da estabilidade do isolador compósito para além da capacidade natural destes tipos de materiais suportarem temperaturas elevadas (Secção 3.2.2). As constantes de expansão térmica do corpo do isolador têm valores aproximados, o que resulta em maior robustez em casos de aumento da temperatura comparativamente aos cerâmicos. Contudo, em caso de incidência direta, o isolador será naturalmente carbonizado.

- **Vantagem ecológica** — Se por um lado, o facto dos isoladores compósitos serem materiais orgânicos permite a degradação do revestimento por parte de alguns agentes (UV, descargas eléctricas), por outro, possibilita a reciclagem das borrachas e reutilização para outros fins. Como não quebra não contribui para poluição do meio ambiente. Além disso, o perfil reduzido é esteticamente mais agradável.
- **Custo** — O custo de aquisição dos isoladores compósitos tem registado quedas constantes ao longo do tempo graças à crescente competição industrial neste setor. Também o facto dos materiais poliméricos terem proliferado para vários tipos de aplicação levou à redução do custo de produção dos isoladores. Em [44] referem uma redução do custo de aquisição no Qatar de 74 dólares em 1999 para 46 dólares em 2002, ou seja, uma redução de 38% no espaço de 3 anos. O preço destes equipamentos varia consoante o país de aquisição e não é evidente se, em termos globais, são mais baratos que os cerâmicos. Devem ainda ser considerados os custos de manutenção durante o período de serviço, que no caso dos compósitos é significativamente mais reduzido, porque os períodos entre processos de lavagem tendem a ser mais longos. Portanto, a seleção do tipo de material a utilizar numa linha elétrica deve basear-se nos preços de comprar juntamente com o custo de manutenção em função das condições ambientais presentes.

6.2 Vantagens dos isoladores cerâmicos

A predominância dos isoladores cerâmicos, especialmente os de porcelana, resulta de um conhecimento profundo do seu comportamento adquirido ao longo das várias décadas de aplicação nas mais variadas situações de isolamento elétrico. De facto, espera-se que este tipo de tecnologia continue a dominar o mercado, apesar de não apresentar evoluções radicais nos seus perfis e propriedades elétricas. Apesar de serem materiais quebradiços, pesados e com necessidade frequente de limpeza em ambientes poluídos, destacam-se características satisfatórias quanto a:

- **Flexibilidade de comprimento** — Contrariamente aos isoladores compósitos, os cerâmicos permitem ajustar o tamanho das cadeias das linhas de transmissão através do aumento ou redução de elementos interligados. Geralmente, para diferentes níveis de tensão são utilizados o mesmo tipo de isolador, com regulação da distância de linha de fuga apropriada tendo em consideração o nível de poluição presente no local. Já para os isoladores compósitos, o seu processo de fabrico e características físicas não permitem a regulação da linha de arco, logo a sua aquisição é feita com vista a um nível de tensão específico.
- **Linhas de fuga extensas** — O conjunto de elevações e depressões da superfície inferior de um isolador cerâmico providenciam um aumento da distância que a corrente de fugas tem que percorrer entre os eléctrodos, e por conseguinte um aumento da resistividade desse caminho. Em casos de poluição mais acentuada podem ser aplicados isoladores com perfis mais pronunciados para aumentos mais significativos. Este tipo de desenho é pouco comum

nos compósitos por forma a favorecer a limpeza por ventilação natural. Portanto, neste último, a superfície é normalmente lisa, representando menores caminhos de fuga.

- **Lavagem** — Apesar de ser um procedimento dispendioso e mais frequente nas linhas com isoladores cerâmicos, periodicamente as cadeias devem ser limpas com recurso a transporte aéreo e normalmente água desmineralizada. Para estes equipamentos o processo de lavagem é facilitado porque o jato de água não danifica a superfície do isolador, enquanto nos compósitos existem precauções especiais quanto à pressão utilizada.
- **Longevidade** — Como os cerâmicos são materiais inorgânicos, a sua superfície não envelhece ao longo dos anos de serviço, mantendo aproximadamente as suas características dielétricas. O período médio de serviço estende-se para lá dos 30 anos, altura pela qual muitas vezes são substituídos por precauções mecânicas, mas ainda sem sinais de degradação da superfície. A sua resistência a ataques químicos quer por ação de radiação ultravioleta quer por oxidantes presentes na atmosfera é a chave para o sucesso da aplicação destes materiais, e a razão pela qual são largamente utilizados.
- **Experiência** — a confiança depositada nestes equipamentos resulta de um conhecimento profundo do seu funcionamento para as mais variadas situações de aplicação. De facto, os isoladores de porcelana são utilizados há quase nove décadas, enquanto os vítreos são mais recentes mas igualmente fiáveis após correção dos estilhaçamentos espontâneos. A maturidade destes equipamentos é determinante na escolha do material a empregar nas linhas de transmissão, e motivo pelo qual os compósitos têm grandes dificuldades para se afirmar definitivamente como escolha predileta.

6.3 Aplicações práticas de compósitos

Atualmente assiste-se à expiração do período de vida útil de um grande número de isoladores cerâmicos como consequência de um crescimento acentuado das infraestruturas de várias redes elétricas mundiais entre os anos 70 e 80. Em alguns casos, as concessionárias elétricas optam por aplicar isoladores compósitos como forma de adquirir experiência com estes materiais ou resolver problemas em ambientes poluídos. Apesar dos relatos de uso destes equipamentos serem escassos, de seguida são apresentadas algumas experiências e casos de satisfação das concessionárias.

6.3.1 Salt River Project

A Salt River Project é uma das concessionárias elétricas norte-americanas do Arizona com um pico de transmissão de aproximadamente 7 GW. A geografia de serviço é razoavelmente limpa e seca, exceto em zonas do este do estado onde a indústria mineira é responsável pelo aumento da contaminação atmosférica. Na década de 80, foram aplicados isoladores compósitos para todos os níveis de tensão, os quais foram bem-sucedidos ao longo do tempo de serviço. A satisfação foi tal

que este tipo de material foi sucessivamente aplicado em linhas de 69 kV e 230 kV nos últimos 30 anos.

Inicialmente a estratégia de operação da SRP não incluía a instalação de anéis de coroa em isoladores de 230 kV, apesar destes serem recomendados para tensões tão elevadas. Todavia, como o ambiente do Arizona é relativamente limpo, nos primeiros lotes instalados não se verificaram condições para ocorrência de efeito coroa com intensidades que comprometessem o revestimento do isolador. Atualmente, em concordância com as práticas da indústria, os novos isoladores para este nível de tensão são acompanhados por anéis de coroa no terminal energizado.

O facto de não existirem procedimentos normalizados para a substituição de isoladores compostos com a linha permanentemente em tensão, e como as linhas de 500 kV são fundamentais no transporte e fornecimento de energia eléctrica de tal forma que dificilmente podem ser retiradas de serviço, a SRP considera preferencial o uso de isoladores de vidro para estes níveis de tensão [45].

6.3.2 Public Service Electric and Gas

A PSE&G é uma empresa de distribuição de energia eléctrica e gás no estado norte-americano de Nova Jersey. Como resposta a uma série de falhas dieléctricas por parte dos isoladores de porcelana, foram extensivamente aplicados isoladores compostos para linhas até 69 kV, e de forma menos frequente para tensões superiores, com os quais adquiriram resultados satisfatórios. Tal como no caso anterior, é prática interna a instalação destes isoladores sem anéis de coroa. Foram constatadas erosões no revestimento polimérico em alguns isoladores em linhas de 138 kV e, num dos casos, verificou-se exposição do núcleo interno [45].

Por forma a detetar facilmente os defeitos nos isoladores, e assim reduzir custos na inspeção da qualidade dos equipamentos, bem como levar a cabo operações de manutenção com linha em tensão, a PSE&G opta por usar isoladores de vidro para tensões superiores a 138 kV.

6.3.3 Xcel Energy

A ocorrência de várias falhas mecânicas dos isoladores de porcelana em aplicações em suspensão e amarrações finais devido ao crescimento do cimento e conseqüente fratura radial após expiração do tempo útil de serviço, levou a que esta companhia apostasse nos compostos para sistemas de suspensão e amarrações até 345 kV. Em linhas até 69 kV são utilizados os três tipos de materiais, porém em amarrações finais apenas aplicam isoladores de vidros. A Xcel registou ocorrências de fraturas frágeis nas primeiras gerações de isoladores compostos, principalmente em níveis de tensão de 115 kV e 345 kV, sendo que este último inspira alguma descrença quanto à sua longevidade devido às degradações do revestimento. A escolha do tipo de material utilizado depende de uma avaliação económica durante o tempo de serviço estimado [45].

6.3.4 NorthWestern Energy

Como possui uma grande extensão de linhas de 500 kV e realiza as manutenções com as linhas em serviço, a NorthWestern aplica isoladores de vidro para níveis de tensão tão elevados. Esta escolha é válida até em locais mais remotos com vários registos de vandalismo, justificando-se pela facilidade de detecção da violação da sua integridade em inspeções trimestrais por meio de helicóptero. Já os isoladores compósitos são ponderados apenas para linhas com tensões iguais a 115 kV ou inferiores, ou em 230 kV para casos de projetos especiais. As primeiras aplicações destes isoladores apresentaram problemas de produção que originaram infiltrações no núcleo interno e obrigaram à substituição antecipada. Realça-se o facto desta empresa possuir milhares de isoladores de porcelana com cerca de 60 anos de serviço nos vários níveis de tensão [45].

6.3.5 Florida Power and Light

O número excessivo de contornamento nos isoladores cerâmicos na década de 90, levou a FLP a instalar isoladores compósitos com revestimento em SiR e EPDM, por forma a reduzir a saída de serviço das linhas como consequência da contaminação acumulada. Mais tarde, foram analisadas as estatísticas de contornamentos nos diferentes tipos de materiais, onde se conclui que os isoladores com revestimento em borracha de silicone apresentavam contornamentos notoriamente mais escassos que os demais. Posto isto, os isoladores com revestimento EPDM em zonas com poluição elevada foram removidos e substituídos por compósitos de SiR. Além da redução de interrupções de serviço, a FLP reportou uma poupança de 73% nos custos de instalação em linhas de 500 kV, e maiores níveis de segurança porque houve menos casos de acidentes com trabalhadores [5].

6.3.6 Qatar General Electricity and Water Corporation

A grande expansão das infraestruturas elétricas no Qatar foi acompanhada por uma preocupação crescente com o desempenho dos isoladores em condições com graus elevados de poluição. Os registos históricos mostram que a principal causa de interrupções no fornecimento de energia deve-se em grande parte (cerca de 90%) à contaminação depositada na superfície dos isoladores, a qual favorece o contornamento das cadeias de isoladores. Na região do Médio Oriente registam-se acumulações significativas de poeiras, sal, produtos químicos e areia que permanecem durante longos períodos, e que juntamente com a condensação ou nevoeiro matinal provocam descargas disruptivas nos isoladores de porcelana e vidro. O facto de se tratar de uma pequena península leva a que a influência das brisas marítimas ponha em causa a rigidez dielétrica dos equipamentos entre períodos de lavagem. A experiência adquirida mostra que a linha de fugas recomendadas na norma IEC 60815 para condições de poluição elevada têm pouco significado em regiões como o Qatar. Como tal, procede-se a um aumento do tamanho das cadeias para satisfazer os níveis de segurança.

Os isoladores usados nas linhas da rede elétrica são maioritariamente vidro e porcelana com perfil aberto para facilitar a ventilação e limpeza natural. Os problemas resultantes das condições ambientais levaram à instalação de isoladores compósitos de EPDM e SiR em algumas das suas

linhas em 1994, aos quais não foram efetuadas nenhuma operação de manutenção até pelo menos o ano de 2007. Até então, não foram registadas falhas mecânicas ou dielétricas em nenhum dos equipamentos, ainda que alguns dos isoladores de polímero EPDM apresentavam sinais de branqueamento. Outras concessionárias do Golfo Pérsico, que enfrentam as mesmas dificuldades ambientais, encorajam o uso de isoladores de borracha de silicone. Assim sendo, em 2005 uma linha de 33 kV e 60 km de extensão numa zona de levado grau de poluição foi totalmente equipada com equipamentos deste tipo, a qual desde então não apresentou qualquer tipo de falha. Mais tarde, esta empresa aplicou o mesmo tipo de equipamentos numa linha de 66 kV com o mesmo sucesso.

Os dados históricos das manutenções executadas nos isoladores de porcelana para 33 kV indicam um custo médio de 37 dólares por ano a cada cadeia. Nos casos em que foram aplicados isoladores revestidos com película de silicone o gasto é aproximadamente metade. Considerando o preço de aquisição dos compósitos, 46 dólares em 2002, a análise económica para este tipo de investimento permite concluir um retorno do capital investido num período entre 3 e 4 anos [44].

6.3.7 Saudi Electricity Company

Na Arábia Saudita, o controlo da energia eléctrica está entregue a uma única concessionária. Grande parte da zona este está sujeita a condições ambientais duras, muito por causa da forte indústria de extração petrolífera que aí se encontra, bem como da proximidade à linha costeira. Em 1979 registavam-se 12 interrupções anuais por cada 100 km de linhas de transmissão, mas com medidas de prevenção ativa (aumento da linha de fugas e limpezas frequentes) esse número desceu para 0.53 no ano de 2001. Porém, como os custos de manutenção são deveras elevados, 99 cadeias de isoladores de porcelana do tipo anti nevoeiro a operar há 15 anos numa linha de 230 kV, as quais necessitavam de lavagens a cada dois meses, foram substituídas por isoladores poliméricos de SiR, perfazendo um total de 3.2 km. Nessa altura, estimou-se um período útil de serviço para os compósitos de 25 anos, quando para os de porcelana geralmente admitia-se 30 anos. Além disso, considerou-se que não seria necessário lavar estes isoladores. Com estas premissas conclui-se que o custo total das cadeias de porcelana ao longo do tempo de serviço seria nove vezes maior comparativamente aos compósitos. Mesmo com substituição dos compósitos a cada 2.8 anos o sistema continuaria a ser rentável [46].

A substituição das 99 cadeias foi apoiada em equipamentos de testes colocados sob as mesmas condições de funcionamento. Mensalmente efetuaram-se inspeções visuais às condições físicas dos equipamentos e procura de sinais que remetessem para degradação da sua estrutura. A informação recolhida permitiu concluir um comportamento satisfatório sem qualquer tipo de limpeza à sua superfície. Apesar de esta experiência ser muito encorajadora não deixa de pecar por excesso de otimismo, visto que o tempo médio de operação de 25 anos para os compósitos é um valor virtual e bastante influenciável pelas condições ambientais e de serviço em que se encontram. Além do mais, em condições de poluição extrema, os compósitos podem igualmente necessitar de lavagens, ainda que menos frequentes.

6.3.8 State Grid Corporation of China e China South Grid

Com a construção da gigantesca barragem das Três Gargantas na China surgiu a necessidade de transportar grande parte dos 22 GW instalados para os centros urbanos situados no este desse país. No final de 2004 estas duas empresas decidiram lançar um projeto de linhas de transmissão com grande capacidade de transporte em níveis de tensão de 1000 kV AC e 800 kV DC. A capacidade dessas linhas situa-se entre os 5000 e 6500 MW com condutores de elevada capacidade de transmissão (Figura 6.2). O esforço requerido por estas linhas para cada cadeia de isolador (simples ou dupla) situa-se entre os 300 kN e 420 kN, ou seja, esforços mecânicos deveras elevados. Grande parte do trajeto desta linha são zonas com graus de poluição médios ou elevados. Para atingir o grau dielétrico pretendido para este tipo de ambientes, as cadeias de isoladores de porcelana e vidro seriam demasiado compridas, o que resultaria num peso adicional indesejado, bem como estruturas de suporte da torre de transmissão reforçadas.

Por tudo isto os isoladores compósitos foram uma opção muito atrativa, de tal forma que levou à discussão da sua aplicação para outros níveis de tensão. Todavia, estes isoladores equiparam unicamente montagens em suspensão, totalizando mais de 7000 unidades instaladas [47].

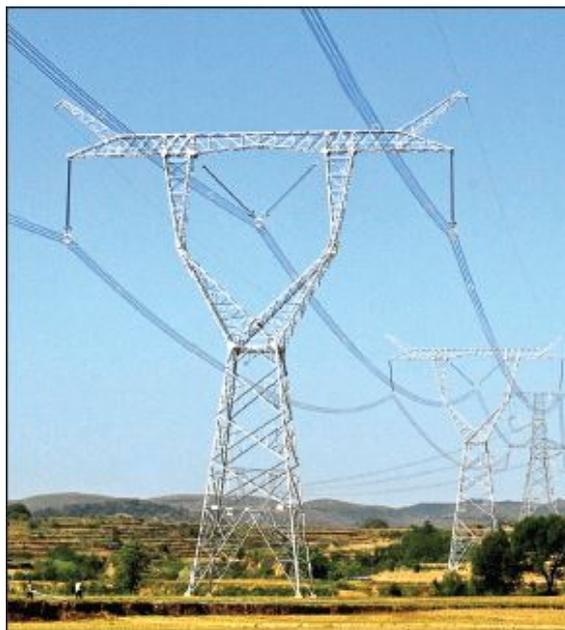


Figura 6.2: Linha de transmissão chinesa de 1000 kV AC com isoladores compósitos [47].

6.3.9 Electric Israel

Também na zona do golfo Pérsico, Israel possui condições climáticas pouco benéficas para a manutenção estável da rede elétrica no que diz respeito a falhas por contornamentos de isoladores. A época seca deste país permite a deposição de todo o tipo de poluição de origem marítima, desértica, industrial e agrícola. O facto de este país ser rota de migração de um grande número de

espécies de aves contribuiu de forma significativa para a contaminação dos equipamentos. O nível de poluição em certas zonas é de tal forma severo que, mesmo após os quatro meses da época de chuva, a camada de poluição acumulada fica parcialmente colada à superfície dos isoladores cerâmicos. Além disso, a concessionária elétrica encontrou problemas na qualidade dos isoladores de porcelana que levavam à ocorrência de perfurações e fraturas radiais por crescimento do cimento.

Ao longo dos anos foram tomadas medidas com vista a diminuir a ocorrência de falhas por contornamento, nomeadamente por aumento da linha de fugas para lá dos valores recomendados através da extensão das abas e aumento do número dos isoladores, além do uso de isoladores de vidro em situações onde se previam desempenhos mais eficazes. Não obstante, nenhuma destas soluções erradicou os problemas até então registados.

As primeiras experiências com os isoladores compósitos foram motivadas pela necessidade de resistência a atos de vandalismo em algumas das linhas de distribuição pelo ano de 1987. Os resultados obtidos ao longo dos anos levaram ao aumento da confiança neste tipo de equipamentos que levou ao aumento de unidades instaladas nas suas redes. Como se tratavam de uma tecnologia ainda imatura, ocorreram alguns casos de fraturas frágeis em isoladores com pouco tempo de serviço, os quais não hipotecaram a confiança que lhes foi atribuída. Mais tarde, o problema foi identificado como uma combinação entre o design pobre e a negligência no manuseamento durante a instalação.

A capacidade hidrofóbica dos isoladores de borracha de silicone, mesmo com poluição acumulada, foi determinante para a expansão do número de equipamentos instalados, mesmo nos períodos em que o seu preço de aquisição era muito superior comparativamente à porcelana e tempo de serviço esperado era apenas 15 anos. De forma geral, a aplicação dos compósitos trouxe dois grandes benefícios para a concessionária: aumento da fiabilidade da exploração da rede elétricas nas condições de poluição severa, visto que reduziu consideravelmente o número de saídas de serviço por falha dielétrica (Figura 6.3); poupanças significativas no custo total referente à aquisição, instalação, manutenção e substituição deste tipo de equipamentos [48].

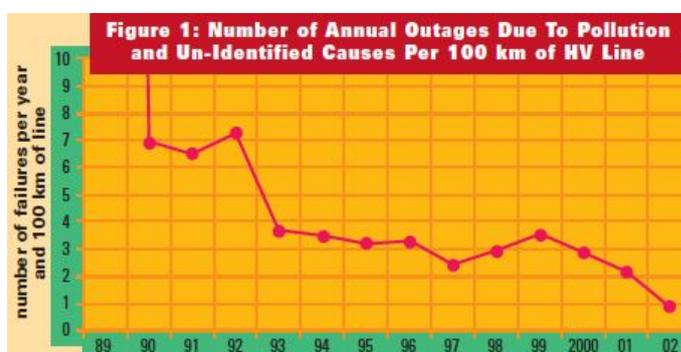


Figura 6.3: Número de saídas de serviço anuais de linhas de alta tensão por 100 km consequentes de poluição acumulada nos isoladores e causas desconhecidas, após implementação de isoladores compósitos [48].

6.3.10 Rede Elétrica Nacional

No ano de 2001 a REN iniciou um plano de investimentos na remodelação de subestações, aumento de capacidade de transmissão de energia elétrica levou à revisão das especificações dos equipamentos com vista ao aumento da fiabilidade do sistema de transporte. Até então, as linhas de transporte apresentavam vários incidentes com origem em incêndios florestais, descargas atmosféricas, poluição associada a nevoeiro e nidificação de cegonhas, as quais representavam cerca de 90% das causas de saída de serviço dos circuitos.

Muitas das linhas de grande capacidade situam-se junto à costa nacional, estando sujeitas a deposição de minerais que afetam negativamente os isoladores de porcelana ou vidro. Por este motivo, e por forma a colocar de parte o programa de limpeza intensivo com custos de milhares de euros por ano, em 2004 foi lançado um programa de substituição desses equipamentos por isoladores compósitos nas linhas mais afetadas por deposição salina e nevoeiro. Passados três anos, o número de compósitos de borracha de silicone ascendia a 2074 unidades para níveis de 150, 220 e 400 kV, equipando cerca de 13% do número total de apoios (Figura 6.4). Com o aumento da presença destes isoladores, o número de apoios com necessidade de lavagem foi reduzido de cerca de 1500 em 2001 para pouco mais de 600 no final de 2007 [49].

Apesar da aplicação mais frequente deste tipo de materiais, não foi possível encontrar informação oficial acerca da satisfação relativamente ao desempenho ou casos de falha dos mesmos.

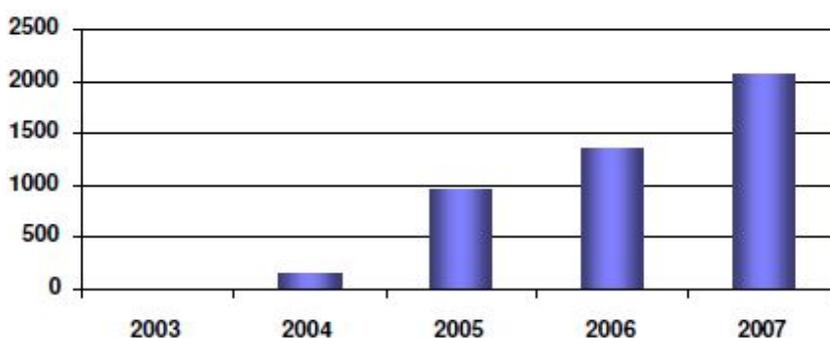


Figura 6.4: Evolução do número de apoios com isoladores compósitos (valores acumulados) [49].

Capítulo 7

Laboratório de Alta Tensão

Ao longo do primeiro semestre do presente ano, foram efetuados esforços para a construção do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no qual houve uma colaboração e participação diretas nos trabalhos e projetos realizados com vista ao seu funcionamento, visto que este procedimento era um objetivo fundamental no plano de trabalhos da presente dissertação. A preparação das condições de segurança e colocação dos equipamentos de alta tensão envolveram operações de grande complexidade logística e temporal.

Pretende-se que estas instalações sejam capazes de realizar ensaios a equipamentos dielétricos com aplicação em sistemas de energia elétrica em alta tensão, por forma a caracterizar o seu desempenho e segurança segundo as condições normalizadas internacionalmente. Portanto, a realização desses ensaios obedece a uma série de condições estipuladas para que se garanta a veracidade dos resultados com o menor erro possível, e passível de ser reproduzido em qualquer parte do mundo. O conhecimento das características dos materiais é fundamental para o aumento da fiabilidade do sistema elétrico, visto que permite efetuar dimensionamentos em concordância com as condições esperadas em serviço. Além disso, para equipamentos de operações em linhas em tensão é crucial determinar a rigidez dielétrica dos materiais por forma a garantir os níveis de segurança máximos aos técnicos responsáveis por esse serviço.

De seguida é apresentada a constituição do laboratório, nomeadamente os dispositivos de segurança, disposição dos equipamentos e regras de procedimento, bem como uma descrição dos equipamentos e sua função.

7.1 Constituição do LAT

O laboratório de alta tensão situa-se no anexo do edifício J do departamento de engenharia eletrotécnica da FEUP, com uma área aproximada de 147 m^2 para disposição dos equipamentos e uma sala de operação onde estes são comandados. A necessidade de garantir um isolamento elétrico para o exterior levou a intervenções nas características da sala de ensaios, nomeadamente:

- Aumento do pé direito do edifício para 12 metros;

- Construção de uma gaiola de Faraday em torno da estrutura da sala;
- Instalação de condições de mobilidade dos equipamentos de alta tensão;

7.1.1 Medidas de segurança passivas

Em particular, a construção da gaiola de Faraday consistiu na colocação de chapas metálicas zincadas com espessura de 1.5 mm em todas as paredes do edifício e no pavimento (espessura de 2.5 mm), as quais se encontram todas eletricamente interligadas, quer por soldadura, quer por tranças metálicas, por forma a escoar as cargas elétricas que se formam durante os ensaios de forma segura para a terra. Para garantir a equipotencialização de todas as partes existe um barramento em anel de cobre de secção de 5x50 mm em torno do edifício, o qual se encontra ligado à terra através de 3 pontos:

- Ligação às fundações metálicas do edifício J, com uma impedância de aproximadamente 0,7 ohms (medição em mês de Verão) (Figura 7.1 a));
- Ligação à terra exterior ao edifício com elétrodo simples (Figura 7.1 b));
- Ligação à terra do posto de transformação que alimenta o laboratório (Figura 7.1 c)).

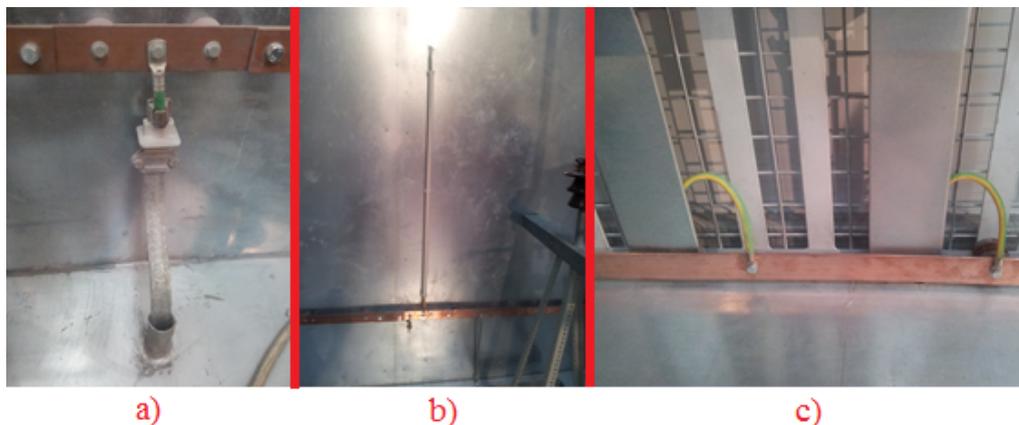


Figura 7.1: Pontos de ligação das terras do LAT ao barramento de cobre.

A interligação das chapas metálicas ao anel de cobre é garantida por várias tranças metálicas equidistantes e centradas com cada coluna de chapas. Além disso, garante-se uma interligação de todas as partes metálicas pela parte superior da gaiola por um outro anel em fio de cobre de 10 mm², o qual está conectado com o anel principal por 4 baixadas (Figura 7.2). O anel principal encontra-se a uma altura de 20 cm do pavimento, fixado às chapas metálicas por isoladores orgânicos, exceto na travessa da porta para a sala de comando, onde o mesmo assenta no pavimento e isolado por uma tinta especial para o efeito (Figura 7.3).

A continuidade da gaiola de Faraday da entrada para a sala de comando é assegurada através do uso de uma malha metálica com espaçamentos de 5x5 cm, e é diretamente ligada ao barramento



Figura 7.2: Interligação entre anel superior e anel principal.

de cobre através de trança metálica, tal como é perceptível na Figura 7.3. Da mesma forma, o portão para acesso ao exterior é igualmente revestido por essa malha e as ligações à terra são asseguradas pelos rolamentos.



Figura 7.3: Pormenor do barramento de terra na travessa da porta de entrada para a sala de comando e ligação da rede de proteção ao mesmo.

Portanto, há um isolamento elétrico da sala de ensaios para o exterior assegurado pelo revestimento metálico de todo o perímetro. Estas medidas de segurança são aspetos passivos, mas fundamentais para a realização de ensaios. Além disso, é necessário garantir distâncias de segurança entre pontos com diferentes potenciais, para evitar descargas disruptivas indesejadas que não para o objeto em ensaio. As dimensões do laboratório não permitem manter as distâncias de segurança se os equipamentos forem mantidos no local necessário aquando da realização de ensaios. Assim sendo, quando um sistema é usado, o outro é recolhido o máximo possível ao respetivo canto e curto-circuitado. Por exemplo, o ensaio à capacidade máxima do transformador,

ou seja, 600 kV, requer a sua movimentação para o centro do laboratório a uma distância mínima de 2.4 m de qualquer objeto com outro potencial e recolha do gerador de choque (Figura 7.4). O transformador, gerador de choque e divisor de frequência requerem uma distância mínima de pelo menos 2.4 m de qualquer objeto com diferente potencial.

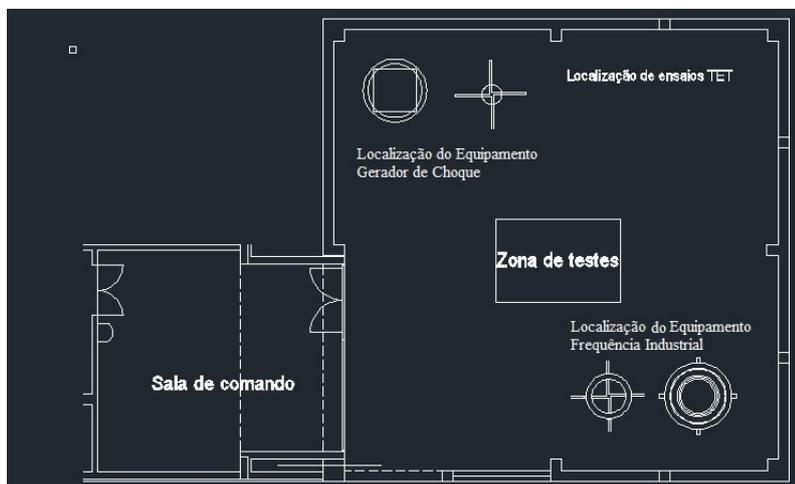


Figura 7.4: Áreas do LAT e disposição dos equipamentos na sala de ensaios. Ambos os sistemas possuem mobilidade para avançar para o centro ou recuar ao canto por forma a manter as distâncias de segurança.

7.1.2 Medidas de segurança ativas

Já as medidas ativas foram concebidas para evitar acidentes provocados por erros humanos. Estas consistem em encravamentos elétricos por ação de comandos em interruptores ou sensores de contacto. Os três níveis de segurança existentes no quadro de comando limitam a alimentação aos equipamentos do laboratório segundo as condições lógicas dos sensores e ordens do operador. Tanto o portão exterior como a porta da sala de operação possuem um sensor de contacto que indicam se os mesmos se encontram abertos ou não. Quando uma das condições é falsa, ou seja, um dos contactos está aberto, é sinalizado com uma luz verde. Porém, quando o portão está fechado (verdadeiro) acende um led de cor amarela. Por fim, quando a alta tensão é ligada e ambos os sensores verdadeiros, essa sinalização passa a cor vermelha.

O nível 1 de segurança permite a alimentação do circuito da iluminação por lâmpadas fluorescentes e das tomadas de usos gerais situadas no interior da sala de ensaios. Essa permissão é independente do estado lógico dos sensores das portas, e portanto apenas necessitam de ser acionadas pelo operador.

Já o nível 2, está sujeito à condição de fecho do portão de acesso e acionamento de um interruptor sem retenção. Neste nível é possível alimentar os circuitos de iluminação de halogéneo, tomada de ligação do sistema de chuva artificial e tomada de alimentação à esfera de calibração. Este patamar possui ainda um subnível de proteção que requer a manobra de um interruptor com

auxílio de uma chave, a fim de obter permissão de acesso ao sistema de análise à onda de choque denominado por DIAS (Digital Impulse Analyser System), mas não à alimentação do gerador de choque.

Por fim, o terceiro nível de segurança garante que a abertura do portão ou porta de divisão interrompe imediatamente o ensaio de alta tensão através do corte de alimentação tanto ao gerador de choque como ao transformador de frequência industrial. Existe também um encravamento mecânico entre a alimentação desses equipamentos, ou seja, enquanto um deles está ativo o acionamento do outro no quadro de controlo não leva a qualquer ação. Na Figura 7.5 é apresentado o quadro de controlo e os diferentes patamares de segurança.

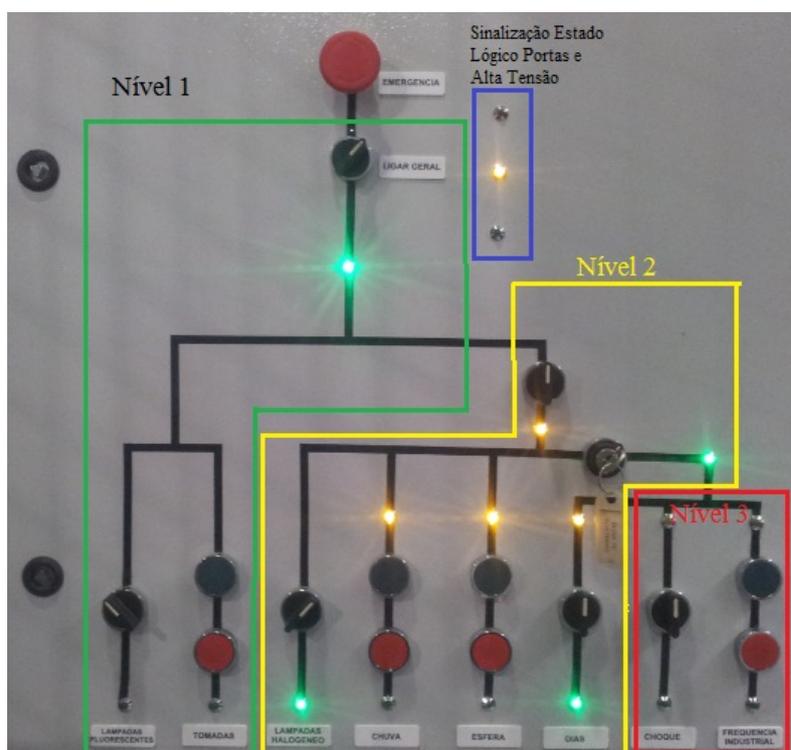


Figura 7.5: Quadro de controlo de equipamentos do LAT e representação dos níveis de segurança do mesmo.

7.2 Gerador de choque

O Gerador de Choque presente no LAT é um equipamento da marca Haefely tipo S, capaz de produzir uma onda de frente rápida normalizada com aproximadamente 1200 kV. Este sistema de ensaio é capaz de testar a rigidez dielétrica de vários equipamentos destinados a altas tensões, nomeadamente transformadores, cabos, disjuntores, entre outros, além de determinar as características de resposta de descarregadores de sobretensões. A configuração básica deste modelo consiste em 5 unidades:

- Torre de gerador de impulso com 12 andares, cada um constituído por um condensador de $75 \mu\text{F}$ com capacidade de acumular até 100 kV, duas esferas de descarga, resistência em paralelo e resistências de saída que determinarão a forma da onda de choque (Figura 7.6 a)).
- Divisor de tensão, ligado diretamente à saída da torre e ao equipamento em ensaio, consiste em vários condensadores em série que transformam a onda de choque num sinal passível de ser medido pelos instrumentos (Figura 7.6 a)).
- Unidade de retificação com ligação direta à torre, responsável pelo carregamento dos condensadores (Figura 7.6 b)).
- Unidade de controlo (Figura 7.6 c)) onde se determina a velocidade de carregamento dos condensadores, a tensão acumulada pelos mesmos, distância entre esferas de forma manual, polaridade de onda de choque e ainda tipo de disparo (manual ou automático).
- Sistema Digital de Análise do Impulso (DIAS) responsável pelo tratamento da informação adquirida à saída do divisor de tensão e coordenação da distância das esferas, bem como apresentação gráfica da forma de onda e suas propriedades. Trata-se de uma caixa metálica celada com cerca de 20 cm de altura.

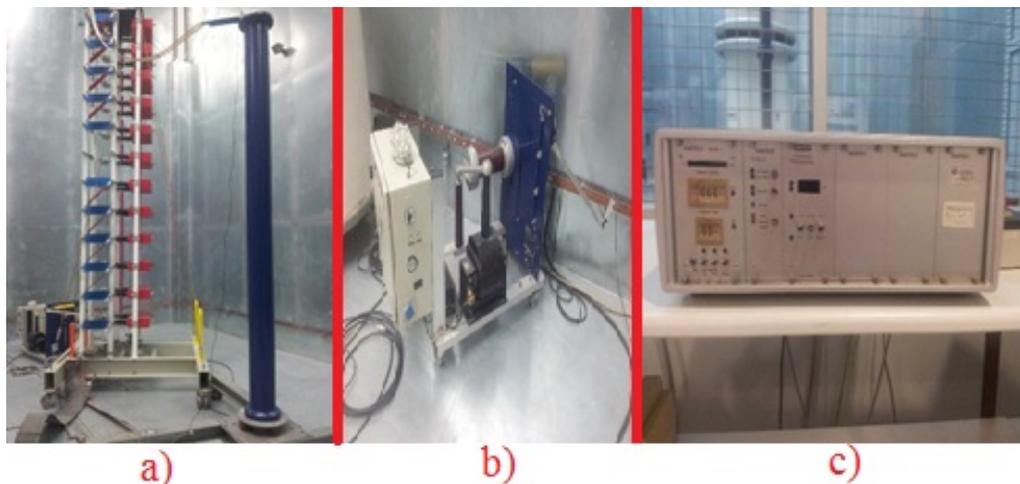


Figura 7.6: Equipamentos do sistema de gerador de impulsos: a) torre de gerador (esq) e divisor de tensão (dir); b) retificador; c) unidade de controlo.

De forma geral, o princípio de funcionamento do gerador de impulso consiste no carregamento em paralelo dos condensadores necessários à obtenção da tensão desejada através de uma corrente contínua, durante um período de tempo estipulado. No caso do equipamento presente no LAT, para obter uma onda de impulso com um valor de pico de até 600 kV, por exemplo, são necessários pelo menos 6 andares do gerador, ou seja, 6 condensadores de 100 kV são carregados até à sua capacidade máxima. Os restantes 6 são curto-circuitados por meio de barras metálicas, as

resistências em paralelo e série são interrompidas, e os terminais do sétimo condensador curto-circuitados, tal como é possível verificar pelas referências 1,5,2 e 3 da Figura 7.7 respectivamente. Após o período de carregamento, a energia armazenada nos condensadores é descarregada por ação de uma tensão de *trigger* que causa a disrupção controlada entre as esferas de explosoras, colocando os andares em série. A tensão máxima de saída resulta da soma das tensões de carga armazenadas nos andares carregados. Caso se deseje tensões de saída mais baixas, o controlador pode limitar a energia armazenada em cada um dos andares disponíveis através do controlador.

Para a realização do ensaio é necessário estabelecer ligações de terra apropriadas entre os diferentes elementos: a parte inferior do divisor de tensão e o terminal de massa do objeto a ensaiar devem ser conectados à torre por meio de chapas de cobre de largura considerável e espessura fina, a fim de escoar a onda de impulso para a terra; a estrutura metálica da torre, divisor e regulador são ligados a um ponto comum e de seguida ao barramento de cobre. Além disso, para proteger os equipamentos, todos os equipamentos do transformador de ensaio à frequência industrial é curto-circuitada e ligada à terra.

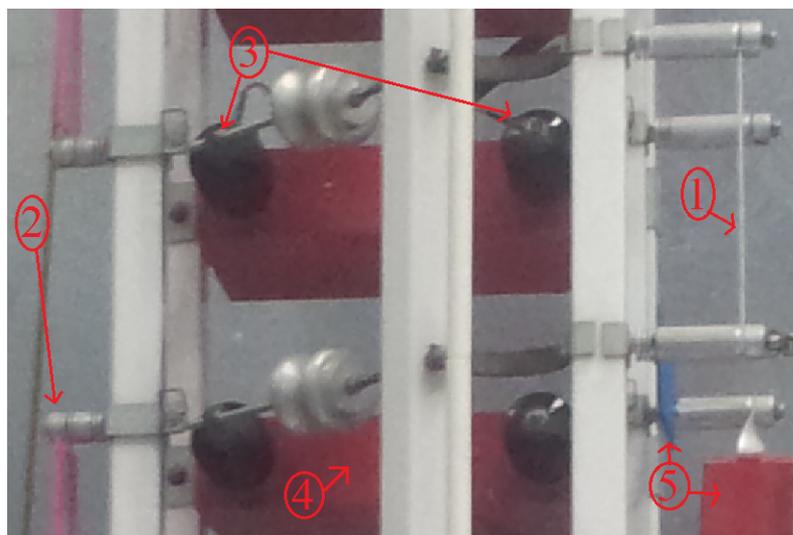


Figura 7.7: Ligações e interrupções necessárias para limitação de andares do gerador de choque: 1) barra metálica de curto-circuito entre andares; 2) interrupção das resistências em série; 3) curto-circuito entre terminais do primeiro condensador não usado; 4) último condensador carregado; 5) últimas resistências em paralelo.

7.2.1 Ensaios à onda de impulso

A onda de saída procura reproduzir o comportamento de uma descarga atmosférica por forma a avaliar o comportamento dos equipamentos a esta ocorrência natural, ou a forma de uma onda de sobretensão com origem em manobras de seccionamento de um circuito do sistema elétrico. A norma IEC 60060-1 [50] define a tensão de impulso como um transitório aperiódico, intencional, que cresce rapidamente até ao seu valor de pico e decresce de forma lenta para o valor zero. A onda de impulso completa é decomposta em:

- **Tempo de Frente (T_1)** — parâmetro virtual definido pelo intervalo de tempo entre 30% e 90% do valor de pico da onda obtida durante o ensaio, pontos A e B da Figura ref78 respectivamente. A linearização da curva entre esses pontos permite obter a origem virtual da onda (O_1) e o tempo médio de subida da tensão. Para tempos de subida inferiores a $20 \mu\text{s}$ considera-se uma onda de choque atmosférico e para tempos de subida iguais ou superiores a $20 \mu\text{s}$ considera-se uma onda de sobretensão de manobra.
- **Tempo de Cauda (T_2)** — parâmetro definido pelo tempo entre a origem virtual (O_1) e o ponto onde a tensão atinge 50% do valor máximo registrado.

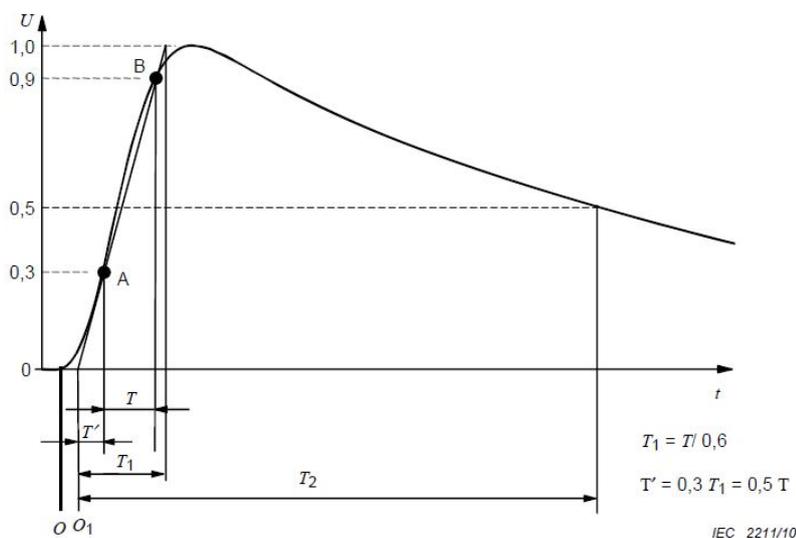


Figura 7.8: Onda de impulso completa com definição do tempo de subida (T_1), tempo de cauda (T_2) e origem virtual (O_1) [50].

Por definição, uma onda de choque atmosférico possui um tempo de frente de $1,2 \mu\text{s}$ e tempo de cauda de $50 \mu\text{s}$, vulgarmente representado por $1,2/50 \mu\text{s}$. Por sua vez, uma sobretensão de manobra possui declives mais lentos e define-se por uma forma de $250/2500 \mu\text{s}$. A forma da onda aplicada ao objeto de ensaio é alcançada através do dimensionamento das resistências em paralelo e em série do gerador de choque. O tempo de frente é controlado pelas resistências em série, enquanto o tempo de cauda é manipulado pelas resistências em paralelo. A norma internacional contempla tolerâncias entre os valores especificados para impulsos normalizados e os valores calculados pela curva de tensão de ensaio de:

Caso não ocorra descarga disruptiva no equipamento ensaiado após aplicação de tensão, o impulso obtido tem a forma completa, ou seja, verifica-se nitidamente os valores de frente e cauda segundo o dimensionamento efetuado. No entanto, se ocorrer disrupção, resulta uma onda de impulso cortada, isto é, há um colapso rápido da tensão para valores praticamente nulos. O colapso da onda pode ocorrer durante a ascensão do valor de tensão, no valor máximo ou já na cauda da mesma, visto tratar-se de um processo energético, e, portanto, dependente do tempo de aplicação

	Choque Atmosférico	Sobretensão de Manobra
Valor da tensão de teste	±3%	±3%
Tempo de Frente	±30%	±20%
Tempo de Cauda	±20%	±60%

Tabela 7.1: Tolerâncias permitidas entre os valores especificados e valores obtidos [50].

da tensão. Nesta situação define-se tempo de corte (T_c) como o intervalo entre a origem virtual e o momento de corte, que por sua vez é determinado pela interseção do valor máximo de tensão obtido com a linearização dos pontos de 70% (ponto C) e 10% (ponto D) dessa tensão máxima. A Figura 7.9 representa uma frente de onda cortada e exemplifica a determinação do tempo de corte.

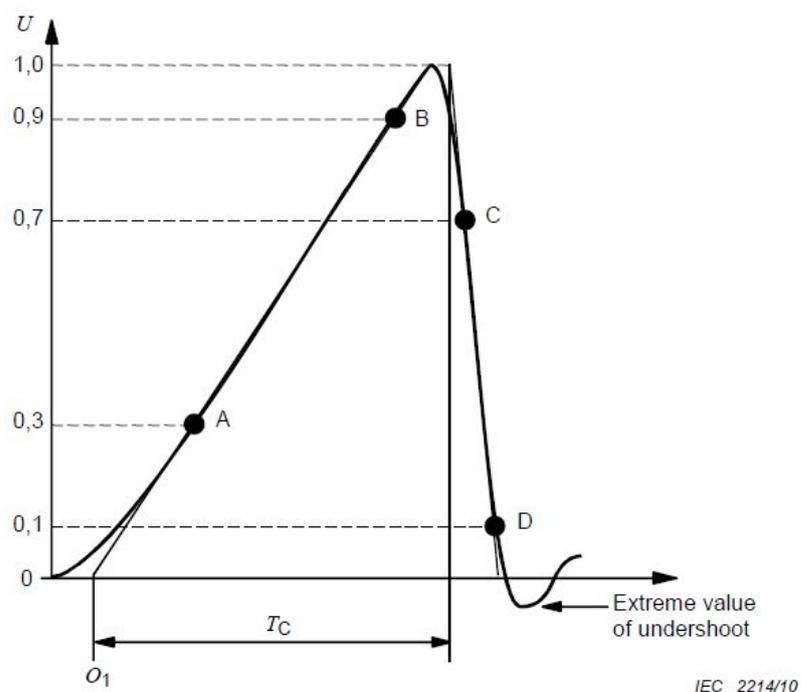


Figura 7.9: Onda de impulso cortada na frente e determinação do tempo de corte [50].

7.3 Equipamento de ensaio à frequência industrial

O ensaio à frequência industrial procura determinar as características de um dielétrico quando sujeito a uma forma de onda sinusoidal com amplitude regulável. O equipamento ensaiado é submetido a uma tensão regulada pelo operador em valor eficaz por forma a determinar a sua rigidez

dielétrica em condições de superfície seca e molhada. O conhecimento do comportamento dielétrico dos equipamentos é fundamental para garantir um dimensionamento correto dos sistemas de transmissão de energia, manutenção de níveis de fiabilidade elevados e assegurar os níveis máximos de segurança estipulados para equipamentos apropriados a trabalhos de manutenção em tensão (denominados TET).

O equipamento de ensaio à frequência industrial presente no LAT consiste nas seguintes 4 unidades:

- Transformador de 300 kVA alimentado por uma única fase a 50 Hz através do regulador presente na sala de comando. É constituído pelo acoplamento vertical de duas unidades (Figura 7.10 a)), cada uma com capacidade de produzir 300 kV, totalizando uma tensão máxima de saída de 600 kV e 0.5 A e um peso aproximado de 16 toneladas. A parte superior possui 3 toroides em alumínio, onde é conectado um tubo de baixa indutância que estabelece a ligação ao divisor de tensão. Também na parte superior é ligado um fio em cobre de secção reduzida que será ligado ao objeto de ensaio e assim lhe aplicará a tensão gerada pelo transformador. O arrefecimento deste equipamento realiza-se através de óleo não circulado.
- Divisor de tensão (Figura 7.10 a)) permite transformar a tensão aplicada no objeto de ensaio, na ordem dos kV, num sinal proporcional de baixa amplitude através de capacidades em série. Permite ainda a ligação de um osciloscópio na parte secundária com intuito de observar a forma de onda aplicada e assim verificar as tolerâncias de distorções permitidas. O sinal de entrada chega através do contacto do tubo de interligação do transformador com uma das duas toroides que constituem o topo do divisor. Como se trata de um equipamento puramente capacitivo, garante divisões precisas numa gama de frequência entre 10 e 1000 Hz.
- O regulador é um autotransformador de alimentação ao transformador com tensão ajustável através de comandos elétricos por parte do controlador, isolado a ar, revestido por uma caixa metálica (Figura 7.10 b)). Possui dispositivos de corte e contactores que atracam quando é dada a ordem de ligar a alta tensão.
- O controlador (Figura 7.10 c)) permite determinar a tensão a aplicar ao objeto de ensaio num processo ascendente e de velocidade determinada pelo operador. É constituído por um voltímetro com três escalas, o qual obtém o sinal de entrada através da conexão com o divisor. Possui ainda um amperímetro para as correntes de fuga do sistema de terra do transformador, e possibilidade de determinar o máximo de corrente de fuga admissível, que quando atingida, leva ao corte de alimentação do transformador. A amplitude da tensão de saída do transformador é controlada por dois interruptores, um de subida e outro de descida. Além disso permite determinar a velocidade de subida/descida da tensão aplicada ao objeto em ensaio.

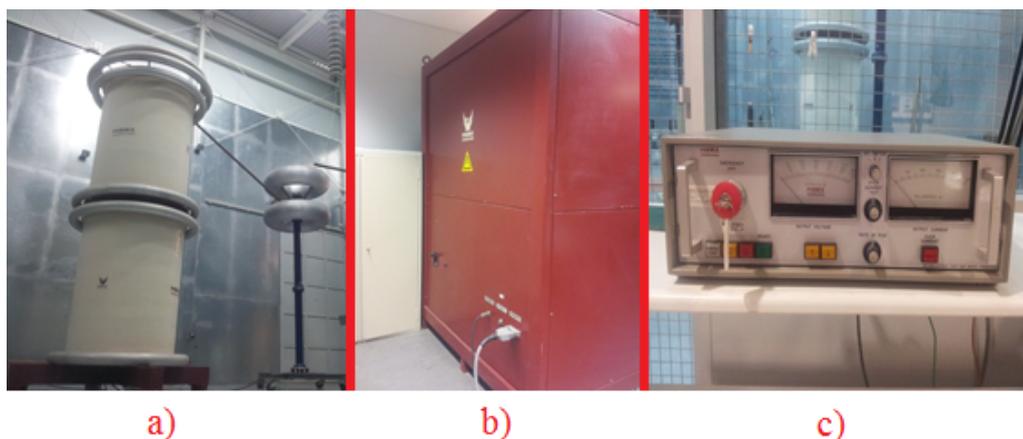


Figura 7.10: Equipamentos do sistema de frequência industrial: a) transformador (esq) e divisor de tensão (dir); b) regulador; c) unidade de controle.

Para a realização de ensaios à frequência industrial é necessário efetuar uma ligação em trança de cobre entre o terminal de massa do objeto em ensaio e o barramento de terra do próprio transformador (circuito por onde será medida a corrente de fuga), uma ligação entre a base metálica do divisor e barramento e, finalmente, a ligação da terra do transformador ao anel da sala de ensaio. Nessa situação, é necessário garantir a distância de segurança às estruturas envolventes em função do nível de tensão do ensaio. Mais, o sistema de gerador de impulso deve ser curto-circuitado e ligado ao anel de cobre.

Periodicamente, o sistema de medição da tensão aplicada deve ser calibrado. Este procedimento é regido pela norma internacional IEC 60052 [51] e consiste na separação de duas esferas metálicas, uma alimentada pelo transformador e outra ligada à terra, segundo uma distância proporcional a um valor de tensão normalizado em função do diâmetro dessas esferas. Por exemplo, para uma distância de 20 cm e umas esferas de 75 cm de diâmetro (caso existente no LAT) é esperada uma tensão de ruptura de 492 kV (valor de pico) para as condições atmosféricas *standard*. A diferença entre os valores de ruptura e o normalizado permite calibrar o voltímetro do controlador, através das indicações do fabricante.

7.3.1 Ensaios à frequência industrial

A publicação IEC 60060-1 impõe que a onda de tensão aplicada ao objeto em ensaio seja aproximadamente sinusoidal, com uma diferença máxima entre o valor máximo positivo e o valor máximo negativo menor que 2%. A aplicação da tensão deve começar com magnitude baixa por forma a prevenir a ocorrência de transitórios de valor elevado devido à comutação de circuitos. A ascensão desde o valor inicial deve ser lenta para permitir a leitura dos instrumentos de medição, mas não de tal forma lenta que provoque o aumento prolongado da solitação elétrica estipulada no objeto de ensaio. De forma geral, esta condição é alcançada pela elevação de 2% da tensão estipulada para o ensaio por segundo após ultrapassar os 75% desse valor. O tipo de ensaio efetuado

pode ser do tipo:

- **Teste de resistência à tensão estipulada** — pretende-se verificar se o equipamento a ensaiar é capaz de resistir a uma tensão estipulada, a qual deve ser elevada segundo as condições anteriores e mantida no valor nominal durante 60 segundos. O objeto é aprovado caso não ocorram descargas disruptivas durante esse período de tempo. Após esse tempo, a tensão deve ser diminuída rapidamente, mas não subitamente para não originar transitórios que podem levar à descarga e danificação do objeto.
- **Teste com descarga disruptiva** — pretende-se determinar o valor de tensão aproximado que origina a descarga disruptiva no objeto de ensaio. Deve-se aumentar a tensão de forma contínua até que ocorra a descarga pelo objeto. Este procedimento deve ser repetido tantas vezes quantas o regulamento do objeto o indicar, e as medidas devem ser tratadas de forma estatística, tal como indicado no Anexo A da publicação IEC 60060 ou na norma regente do objeto de estudo.

7.4 Montagens elétricas e procedimento para ensaios de isoladores

O teste à rigidez dielétrica dos isoladores para ondas periódicas (frequência industrial) e aperiódicas (impulso de tensão) obedece a uma série de parâmetros regularizados pelas normas internacionais IEC. A montagem da estrutura que serve de base ao isolador em causa procura reproduzir as influências que podem ocorrer sobre o campo elétrico devido à presença de outros objetos nas redondezas da cadeia. Por esse motivo as empresas podem especificar condições de ensaios diferentes da norma regente, por forma a conhecer as características do material nas condições em que o mesmo vai ser aplicado. Deve-se manter distâncias de segurança para que a descarga disruptiva ocorra entre os terminais do isolador e não para a estrutura de suporte. Assim sendo, dependendo do tipo de isolador (suporte ou linha e de classe de material) a base de suporte para a realização de ensaios elétricos obedece a especificações bastante distintas. Porém, os procedimentos para todos eles devem ter em conta as especificações gerais apresentadas na norma IEC 60060, nomeadamente:

- As tensões de impulso devem ser expressas segundo o valor de pico da onda obtida, e para a frequência industrial deve ser apresentadas pelo valor eficaz;
- Quando as condições atmosféricas naturais presentes no local de ensaio diferem das estipuladas como padrão (temperatura, humidade e pressão atmosférica), deve-se aplicar os fatores de correção segundo as formulas estipuladas nessa norma;
- O isolador deve ser seco e limpo antes da realização dos ensaios;
- Deve-se tomar precauções por forma a evitar condensação na superfície do isolador, especialmente quando a humidade relativa presente é elevada. Portanto, o objeto de ensaio deve ser submetido às condições atmosféricas do local durante um tempo suficientemente

longo que permita o equilíbrio térmico, normalmente 24 horas. Exceto indicações contrárias por parte do comprador ou produtor, não se deve ensaiar equipamentos quando a humidade relativa é superior a 85%, visto que os resultados tendem a ser erráticos.

- O intervalo entre ensaios deve ser suficiente para que não se verifiquem influências do teste anterior.

7.4.1 Montagem de isoladores de suporte

A norma IEC 60168 [52] especifica que, para ensaios a impulsos de choque atmosférico e frequência industrial, o isolador de suporte deve ser apoiado verticalmente sobre uma estrutura metálica em forma de U, com a abertura direcionada para baixo, com um comprimento total de pelo menos o dobro do tamanho do isolador e uma largura aproximadamente igual ao diâmetro da base das ferragens metálicas do isolador. Se o isolador possuir uma altura inferior a 1.8 metros, a estrutura em U deve ser colocada a pelo menos 1 metro de altura, caso contrário esta deve erguer-se no mínimo a 2.5 metros do solo. Esta estrutura deve ser ligada à terra.

No topo do isolador coloca-se um tubo na horizontal, perpendicular à estrutura em U, com um comprimento de pelo menos 1.5 vezes o tamanho do isolador, e deve prolongar-se no mínimo 1 metro para cada lado do eixo do isolador. O diâmetro desse tubo é aproximadamente 1.5% da altura do isolador, com um mínimo de 25 mm.

A tensão de ensaio deve ser aplicada entre o tubo e o suporte metálico, na ponta do condutor. A Figura 7.11 exemplifica um caso de ensaio realizado no LAT a um isolador de suporte de aproximadamente 1.70 metros para aplicações em circuitos de 150 kV, e procura demonstrar as relações entre as diferentes dimensões enunciadas anteriormente.

7.4.2 Montagem de isoladores de linha

A norma IEC 60383 pretende definir os vários tipos de aplicações aceitáveis para isoladores cerâmicos em linhas e normalizar os ensaios praticáveis para determinação das propriedades mecânicas e dielétricas desses materiais. Da mesma forma, a publicação IEC 61109 [53] apresenta as mesmas linhas de conduta, mas aplicáveis aos isoladores compósitos. Porém, quanto à preparação das condições necessárias à realização de ensaios em alta tensão, a secção 11.1 dessa norma explicita que os testes para isoladores compósitos devem ser efetuados segundo os parâmetros apresentados no documento IEC 60383, ou seja, da mesma forma que os cerâmicos.

Posto isto, a montagem para a realização de ensaios elétricos a cadeias de isoladores na posição vertical (IEC 60383-2 [54]) deve assegurar a fixação da parte superior numa estrutura conectada à terra através do uso de um cabo ou tubo metálico. O topo do isolador deve estar distanciado em pelo menos 1 metro do ponto de fixação. No fundo da cadeia deve ser colocado um tubo na horizontal com um tamanho superior a 1 metro, o qual será ligado à fonte de tensão. O tubo deve estar o mais próximo possível da cadeia mas a uma distância mínima de 0,5 vezes o diâmetro da última. O diâmetro desse tubo é aproximadamente 1.5% da altura da cadeia, com um mínimo

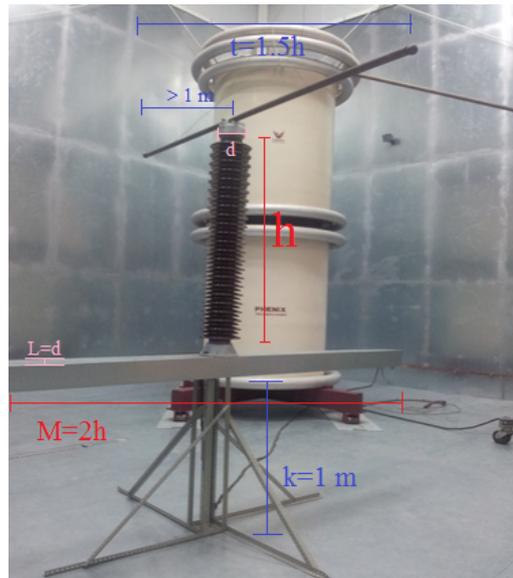


Figura 7.11: Montagem de isolador de suporte segundo os parâmetros estipulados pela norma IEC 60168, e relação entre os tamanhos dos seus constituintes: h é a altura do isolador; L a da largura chapa U; d o diâmetro das ferragens; k a altura da base; t o tamanho do tubo; M o tamanho da chapa U.

de 25 mm. Tem um tamanho mínimo de 1.5 vezes o tamanho do isolador, e deve prolongar-se no mínimo 1 metro para cada lado do eixo do isolador. Tem que se garantir que todos os materiais circundantes se encontram a mais de 1.5 vezes (no mínimo 1 metro) o tamanho da cadeia de isoladores. A Figura 7.12 demonstra uma solução para a fixação da cadeia de suporte de comprimento reduzido em concordância com as condições apresentadas.

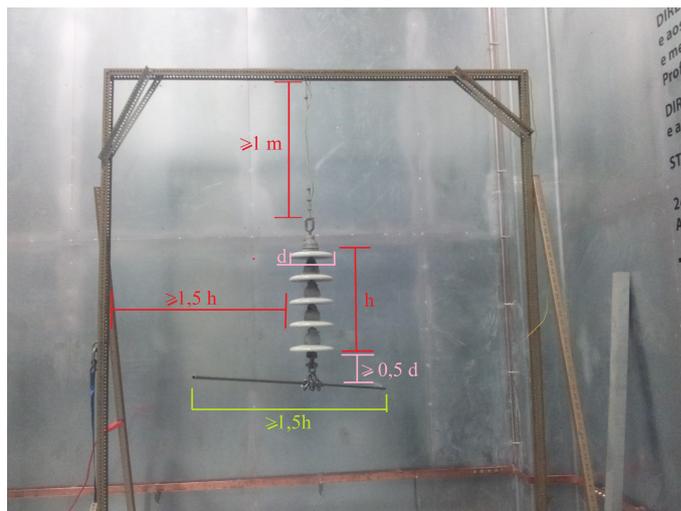


Figura 7.12: Montagem de isolador em suspensão segundo os parâmetros estipulados pela norma IEC 60383, e relação entre os tamanhos dos seus constituintes: h designa a altura da cadeia, e d o diâmetro do isoladores.

Capítulo 8

Ensaio Elétricos

Tendo em conta as capacidades do recém-inaugurado Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, procurou-se efetuar um estudo comparativo do comportamento dielétrico à frequência industrial entre isoladores compósitos e isoladores de porcelana para aplicação em linhas de alta tensão. Para tal foram efetuadas as devidas montagens de suporte e estabelecidos os circuitos de alimentação segundo as normas internacionais necessárias à realização deste tipo de ensaios. Os testes efetuados seguiram as linhas de conduta expressas pela normas IEC regentes para este tipo de atividade, nomeadamente a IEC 60061-1 e IEC 60383, por forma a garantir a maior precisão na definição da capacidade dielétrica. É de grande importância ensaiar todos os tipos de isoladores para aplicações exteriores sobre condições de chuva à frequência industrial, porém, uma vez que as instalações são recentes, ainda não é possível realizar este tipo análise no LAT. Todavia, foram simuladas condições de condensação matinal sobre os isoladores para prover noções da importância que as mesmas têm sob o comportamento dos equipamentos. Note-se que esta última não obedece ao rigor internacionalmente exigido, apenas serve para sugerir a redução da capacidade de isolamento, sobretudo em situações de deposição de poluição na superfície do equipamento.

A precisão do equipamento de medição do sistema de frequência industrial foi testada através da correspondência entre a tensão de pico aplicada e o espaçamento predeterminado entre duas esferas condutoras de 75 cm de diâmetro, onde se concluiu que o mesmo se encontrava dentro da tolerância de 3%. Essa relação entre o espaçamento das esferas e a tensão que provoca o escorvamento, bem como a tolerância admitida, é estabelecida pela publicação IEC 60052 [55].

8.1 Objetos de estudo

Uma vez que o transformador do sistema de frequência industrial tem um limite máximo de 600 kV, os isoladores ensaiados necessitavam de possuir uma tensão de contornamento em condições secas inferiores a esse valor. Assim sendo, optou-se pelo ensaio a isoladores para linhas de transporte de 150 kV. Foram utilizados dois isoladores compósitos do tipo SiR, iguais, um novo e um usado, e uma cadeia de 10 isoladores de porcelana de campânula e espigão (Figura 8.1). Os

compósitos apresentam todas as abas com o mesmo diâmetro e saliências na sua superfície inferior. Ambos os isoladores poliméricos foram fornecidos pela REN, sendo que o exemplar usado foi retirado de serviço de uma das linhas do sul de Portugal, desconhecendo-se as razões que levaram à sua substituição. Este último apresenta a superfície completamente coberta por depósitos de poeiras e sem danos ou degradações aparentes na sua estrutura, tal como é demonstrado na Figura 8.2. Apesar da poluição depositada, a superfície conserva um grau elevado de hidrofobia, o que sugere que permaneceu tempo suficiente em repouso para que esta propriedade migra-se o topo dos sedimentos (Figura 8.2).

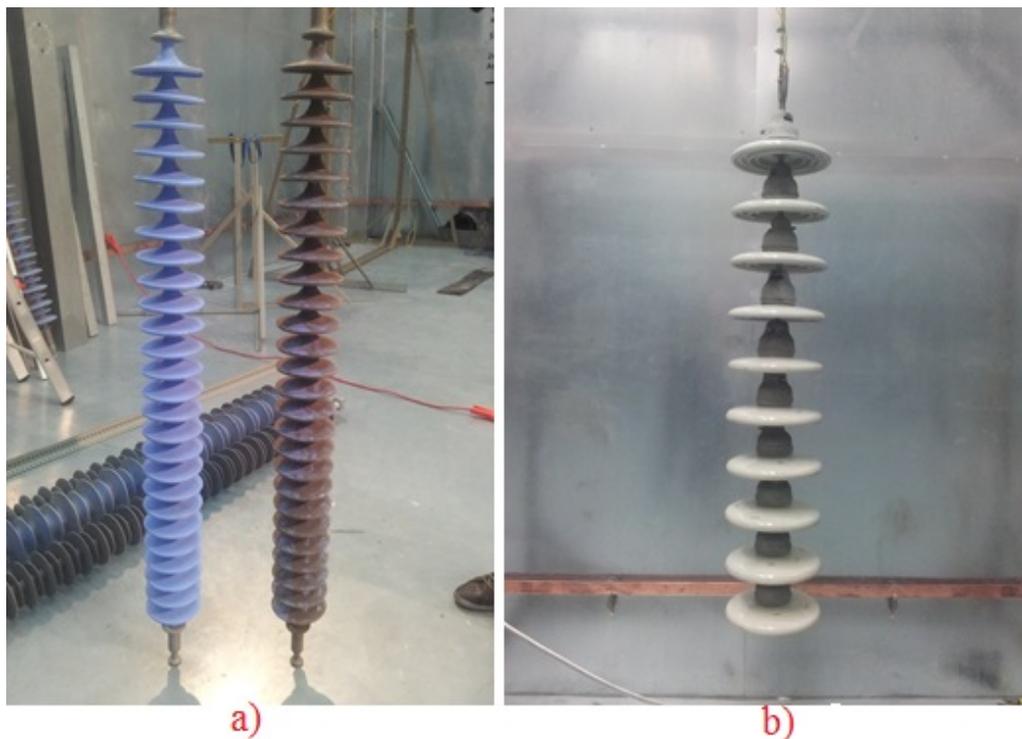


Figura 8.1: Isoladores para realização de ensaios dielétricos: a) isolador compósito novo (esq) e usado (direita); b) cadeia de isoladores de porcelana. A deposição de sedimentos no isolador usado é destacada pela cor castanha adquirida.

As Tabelas 8.1 e 8.2 apresentam os dados físicos e mecânicos relativos aos isoladores compósitos e de porcelana, respetivamente.

A norma IEC 60038 [56] estabelece os valores máximos de tensão a que um equipamento está sujeito para cada nível de tensão nominal, ou seja, para uma linha de transporte de 150 kV os equipamentos devem ser dimensionados para valores de operação em regime normal, em qualquer parte do sistema, de 170 kV. Este valor não inclui as influências de transitórios ocorridos por seccionamentos de circuitos ou outras variações de tensão temporárias. Note-se ainda que esta tensão é referente à diferença de potencial entre fases, ou seja, um valor composto, quando na verdade os isoladores estão sujeitos à diferença de potencial entre a linha e a terra. Logo, devem ser dimensionados através da tensão simples do valor composto de 170 kV:

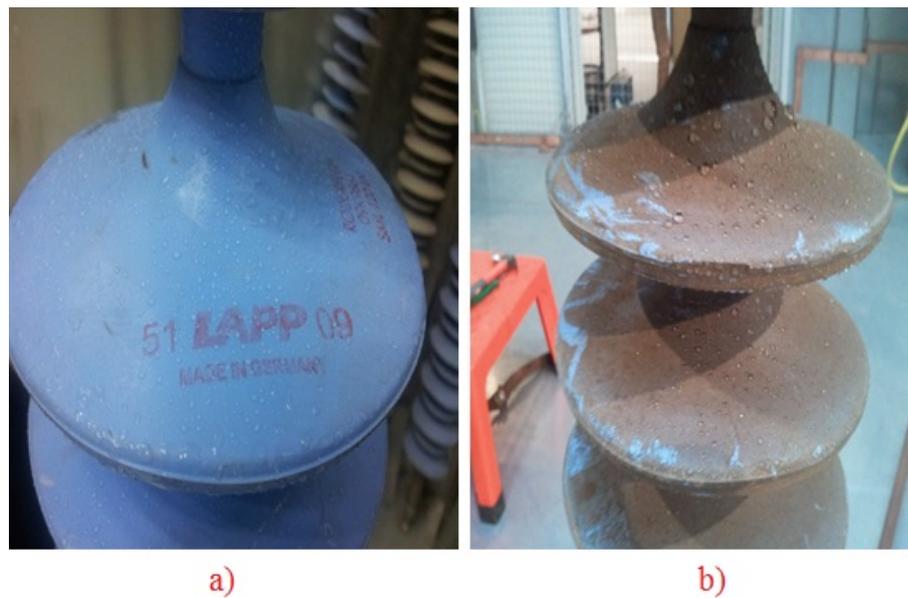


Figura 8.2: Pormenor de hidrofobia dos isoladores compósitos: a) isolador compósito novo; b) isolador compósito usado e coberto com sedimentos.

$$U_{F-T} = \frac{U_{F-F}}{\sqrt{3}} = \frac{170}{\sqrt{3}} = 98.2kV \quad (8.1)$$

Posto isto, a linha de fugas específica para os isoladores compósitos é determinada pela divisão entre o comprimento total de linha de fuga e a tensão máxima a que está sujeito em serviço, tal como demonstrado na expressão 8.1. Tendo em conta a norma IEC 60815, o valor de 44,3 mm/kV corresponde a um caso de poluição elevada (Tabela 5.1), enquanto segundo os valores apresentados

Marca	LAPP
Cor	Azul
Comprimento Linha de Fuga	4350 mm
Distância de Arco	1250 mm
Espaçamento entre abas centrais	45 mm
Diâmetro das abas	130 mm
Diâmetro total do núcleo	22 mm
Diâmetro da vara FRP	16 mm
Espessura do revestimento do núcleo	3 mm
Tensão nominal suportada	120 kN
Peso aproximado	6 kg

Tabela 8.1: Características físicas e mecânicas dos isoladores compósitos ensaiados.

Diâmetro do Espigão	16 mm
Distância mínima entre espigão e topo da campânula (passo)	130 mm
Diâmetro da saia	254 mm
Comprimento Linha de fuga	300 mm
Tensão máxima suportada	34 kN
Peso	4,2 kg

Tabela 8.2: Características físicas e mecânicas de cada unidade de isolador de porcelana da cadeia ensaiada.

na norma IEC 60071 trata-se de uma situação de poluição muito elevada.

$$LFE_{composito} = \frac{4450mm}{98.2kV} = 44,3mm/kV \quad (8.2)$$

Tendo em conta as características dos isoladores de porcelana apresentadas na Tabela 8.2, e admitindo que o dimensionamento efetuado pela REN para este tipo de equipamentos obedece às recomendações apresentadas na norma IEC 60071, tal como sugerido no guia de coordenação de isolamento [57], ou seja, 31 mm/kV para o caso mais desfavorável, obtém-se uma cadeia de isoladores com 10 unidades. Este conjunto perfaz uma linha de fuga total de 3000 mm e uma distância de arco 1300 mm. Note-se ainda que o peso total da cadeia é de aproximadamente 42 kg, enquanto os compósitos pesam apenas 6 kg.

8.2 Montagens realizadas

As montagens necessárias à realização dos ensaio aos isoladores tiveram em conta os parâmetros definidos na norma internacional IEC 60383-2 para o caso de cadeias de isoladores em sistemas de corrente alternada. O tamanho dos isoladores não permitiam elaborar um estrutura de suporte metálica semelhante à apresentada na Figura 7.12 devido à altura necessária para garantir que não ocorreria escorvamento para o solo. Posto isto, foram utilizados os dois sistemas de roldanas existentes no LAT, um para suporte do objeto de ensaio e outro para garantir a distância de segurança da terra do circuito. O isolamento do objeto de ensaio relativamente ao cabo de aço de suporte foi garantido pelo uso de um isolador compósito destinado para redes de tensão de 220 kV. Na união entre o objecto de ensaio e o isolador de suporte foi efetuada a ligação de terra. Os isoladores ensaiados foram içados a uma altura superior a 3 metros por forma a garantir que a descarga parcial ocorria entre os terminais do isolador e não para as chapas do solo. O sistema de suporte das ligações de terra foi erguido acima do terminal de terra do isolador ensaiado a fim de manter a ligação fora do alcance da descarga disruptiva e assegurar que a mesma intercetava o terminal desse isolado.

Tal como exigido na norma regente, foi colocado um tubo metálico com 3 metros de comprimento e um diâmetro de 28 mm, centrado com os isoladores ensaiados e ligado ao transformador. As peças de suporte do tubo conferem uma distância de 17 cm à base do isolador. A configuração da montagem realizada serve tanto para os ensaios à frequência industrial como para os ensaios ao choque atmosférico, com uma pequena modificação no sistema de terra, uma vez que no segundo caso o mesmo é efetuado com chapas de cobre finas e largura elevada. A Figura 8.3 demonstra as disposições efetuadas para a realização desses ensaios.

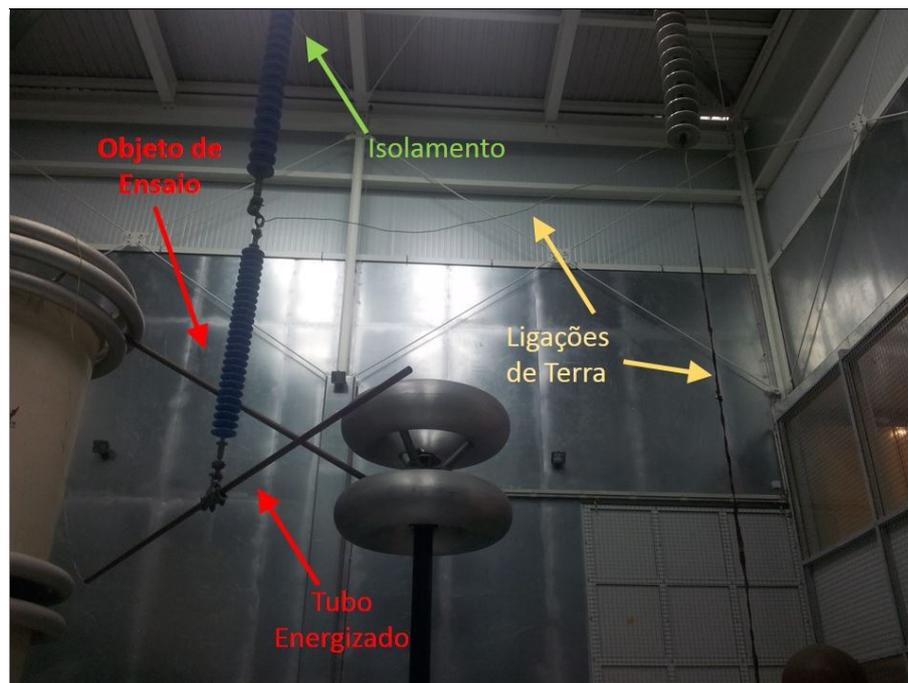


Figura 8.3: Configuração da montagem efetuada para ensaio dos isoladores. Note-se que a descida do condutor de terra deve ficar suficientemente distante do tubo sob tensão, por forma a não ocorrerem descargas intempestivas.

8.3 Procedimento

Os procedimentos de ensaios aos isoladores tiveram em conta os aspetos considerados na norma IEC 60060 para ensaios à frequência industrial, os quais foram expostos anteriormente no Capítulo 7. Para todos os valores de tensão de disrupção registados é necessário aplicar os fatores de correção em função das condições atmosféricas presentes na altura do ensaio, em comparação com os valores *standard* estipulados e apresentados de seguida:

- **Temperatura de referência:** $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- **Pressão atmosférica absoluta:** $p_0 = 1013 \text{ mbar}$
- **Humidade absoluta:** $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Esses fatores de correção da temperatura, pressão atmosférica e humidade são calculados de forma extensa por meio de relações matemáticas presentes na publicação IEC 60060. A tensão de disrupção obtida para as condições não *standard* é corrigida para o valor equivalente sob os valores padrões t_0 , p_0 e h_0 através da sua divisão pelo fator de correção atmosférico k_t :

$$U_0 = U / K_t \quad (8.3)$$

$$K_t = k_1 k_2 \quad (8.4)$$

Em que k_1 é o fator de correção da densidade do ar, dependente da densidade relativa δ e um coeficiente m . Nessa expressão t representa o valor de temperatura em graus Celsius no momento de ensaio e p a pressão atmosférica medida em hPa. Já o coeficiente m é um valor calculado recorrendo à obtenção do coeficiente g .

$$k_1 = \delta^m \quad (8.5)$$

$$\delta = \frac{p}{p_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (8.6)$$

Por sua vez, o coeficiente k_2 efetua a correção da humidade do ar, e é obtido através da relação do parâmetro calculado k elevado ao coeficiente w , sendo este último dependente do valor de g . No caso do ensaio à frequência industrial, k é definido pela equação 8.3.

$$k_2 = k^w \quad (8.7)$$

$$k = 1 + 0,012(h/\delta - 11) \quad \text{para } 1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3 \quad (8.8)$$

O cálculo do parâmetro g é função do valor U_{50} do objeto de ensaio (nestes ensaios é considerado 735 kV por indicação da folha de dados dos equipamentos), dos valores de δ e k calculados,

bem como da linha de arco em metros, tal como demonstrado na equação 8.3. A obtenção dos coeficientes m e w é feita através da seleção da linha da Tabela 8.3 em função do valor resultante de g .

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (8.9)$$

g	m	w
<0,2	0	0
0,2 to 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 to 1,2	1,0	1,0
1,2 to 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
>2,0	1,0	0

Tabela 8.3: Valores dos expoentes m e w como função do parâmetro g [50]

Para todos os ensaios serão apresentados as medições de temperatura, humidade e pressão atmosférica efetuadas no momento das experiências, os coeficientes calculados, os fatores de correção obtidos e os valores de tensão corrigidos. Os aparelhos presentes no LAT apresentam a leitura da humidade em valores percentuais ($h\%$), pelo que o valor absoluto é calculado através da relação .

$$h = \frac{6,11 \times h\% \times e^{\frac{17,6 \times t}{243+t}}}{0,4615 \times (273 + t)} \quad (8.10)$$

Os isoladores formam mantidos dentro das instalações do LAT para garantir a estabilidade térmica dos equipamentos, e assim evitar condensações na superfície dos mesmos.

A norma IEC 60383 dita que a determinação do valor de resistência à tensão de impulso em condições secas em cadeias de isoladores (ou isoladores compósitos por indicação da norma IEC 61109) deve ser calculada por 50% do valor de contornamento alcançado através do processo *up and down* presente no anexo A da IEC 60060. Indica também que para cadeias longas, onde o comprimento é determinado pela poluição, é necessário realizar um total de 15 impulsos. Para os ensaios à frequência industrial o valor de contornamento é obtido através da execução de 5 ensaios e consequente média aritmética dos valores registados. Após cada ensaio foi realizado um intervalo de pelo menos 1 minuto para garantir que os valores obtidos não foram afetados pelos ensaios anteriores.

A humidificação da superfície dos isoladores foi realizada por meio de pulverizadores manuais ordinários, largamente utilizados na indústria, com água desmineralizada. Procurou-se adquirir uma distribuição discreta de gotas com baixo volume ao longo de toda a linha de fugas, aplicando menos de 10 centilitros de água pulverizada em cada isolador.

Após os ensaios a seco e com superfície húmida, cada isolador foi sujeito a um valor de tensão igual a 90% e 95% do valor médio de ruptura do tipo de isolador, por forma a aferir o tempo necessário para o contornamento, com um limite máximo de 1 minuto. Os isoladores compósitos tiveram como referência o valor médio de tensão de ruptura obtido nos ensaios do exemplar novo sem superfície molhada. Já o isolador cerâmico foi sujeito ao mesmo tipo de relação em função do valor médio de tensão de contornamento calculado. No entanto, como a tensão de ruptura no caso de superfície molhada é muito inferior aos valores obtidos a seco, o ensaio de solitação dielétrica foi efetuado tendo em conta o valor médio de tensão calculado para esse ensaio em particular. Na Tabela 8.4 são apresentados os diferentes coeficientes necessários à normalização dos valores de tensão de ruptura obtidos durante a realização dos ensaios dielétricos dos equipamentos em causa. Já na Tabela 8.5 são disponibilizados os valores de tensão obtidos para ensaios a seco e com superfície humedecida, e consequente normalização em função do valor de correção atmosférica calculado (k_t).

	Isolador Compósito Novo		Isolador Compósito Usado		Isolador Cerâmico	
	Ensaio seco	Ensaio molhado	Ensaio seco	Ensaio molhado	Ensaio seco	Ensaio molhado
Temperatura (t)	17,2	18,3	18,3	20,2	18,7	20,2
Humidade Relativa (h%)	66	66	66	60	67	60
Humidade Absoluta (h)	10,19	11,40	11,40	11,59	11,85	11,59
Pressão Absoluta (p)	1007	1007	1007	1007	1008	1007
Pressão relativa (δ)	1,00367	0,99988	0,99988	0,99340	0,99950	0,99340
Coefficiente k	0,98988	1,00483	1,00483	1,00799	1,01028	1,00799
Coefficiente g	1,15147	1,13864	1,13864	1,14247	1,13293	1,14247
Coefficiente m	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
Coefficiente w	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
K1	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
K2	0,98988	1,00483	1,00483	1,00799	1,01028	1,00799
Kt	0,98988	1,00483	1,00483	1,00799	1,01028	1,00799

Tabela 8.4: Dados relativos à medição das condições atmosféricas e resultados dos coeficientes necessários à normalização da tensão de contornamento.

	Isolador Compósito Novo				Isolador Compósito Usado				Isolador Cerâmico			
	Ensaio seco		Ensaio molhado		Ensaio seco		Ensaio molhado		Ensaio seco		Ensaio molhado	
	U	U ₀	U	U ₀	U	U ₀	U	U ₀	U	U ₀	U	U ₀
Ensaio 1	530	535	525	523	532	530	505	500	530	525	310	308
Ensaio 2	528	533	525	523	535	533	508	503	550	544	315	313
Ensaio 3	530	535	522	520	530	528	510	505	540	535	300	298
Ensaio 4	529	534	520	518	537	534	508	503	538	533	300	298
Ensaio 5	532	537	528	526	538	535	502	497	543	537	330	327
Valor Médio (kV)	530	535	524	522	534	532	507	501	540	535	311	309

Tabela 8.5: Valores de tensão de ruptura registados (U) para os ensaios realizados em kV e respetivos correcções para as condições atmosféricas normalizadas (U_0), bem como o valor médio dos resultados obtidos.

A Figura 8.4 demonstra a redução da tensão de ruptura entre os ensaios com superfície seca e humedecida, em valores absolutos e percentuais, para os três equipamentos em estudo. Em todos os casos analisados a tensão foi elevada de forma constante a um ritmo de aproximadamente 10 kV/seg.

Na Tabela 8.6 são apresentados os resultados da exposição dos isoladores a solicitações dielétricas contínuas para 90% (477 kV) e 95% (503 kV) do valor médio de tensão de contornamento do isolador compósito novo para a situação de superfície seca (535 kV). Note-se que no caso do isolador cerâmico com superfície molhada o valor médio obtido para este caso é significativamente menor que no caso anterior, e, portanto, o ensaio de stress elétrico neste caso tem em conta os valores de 90% e 95% de 309 kV, ou seja, 278 kV e 393 kV respetivamente.

	Isolador Compósito Novo		Isolador Compósito Usado		Isolador Cerâmico	
	Ensaio seco	Ensaio molhado	Ensaio seco	Ensaio molhado	Ensaio seco	Ensaio molhado
90% U	Não contornou	Não contornou	Não contornou	Não contornou	Não contornou	25 seg
95% U	45 seg	44 seg	45 seg	30 seg	32 seg	15 seg

Tabela 8.6: Tempo necessário ao contornamento com 90% e 95% do valor médio de tensão de ruptura para os isoladores ensaiados, com limite de aplicação de 1 minuto.

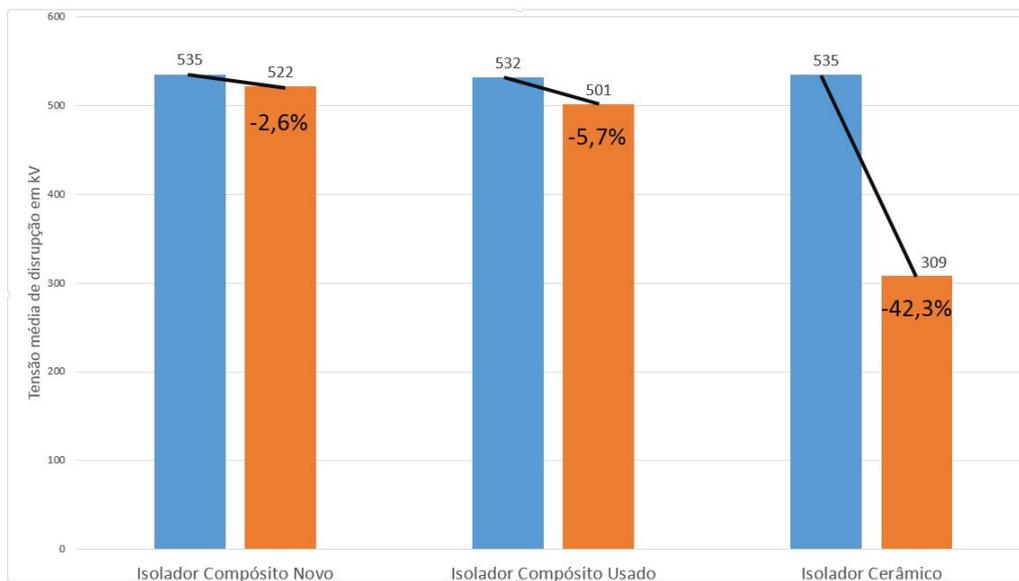


Figura 8.4: Comparação gráfica dos valores médios de tensão de disrupção obtida entre ensaios a seco e superfície molhada para os equipamentos em causa.

8.4 Análise dos resultados

Após os ensaios de rigidez dielétrica à frequência industrial, pode-se retirar algumas conclusões sobre o desempenho dos isoladores quer a seco, quer com a superfície molhada. Deve-se ainda atender que o isolador cerâmico possui um caminho de fugas 31% mais reduzido comparativamente ao isolador compósito, visto que as ferragens são partes condutoras.

Da Figura 8.4 pode concluir-se que a atuação do isolador compósito é pouco afetada pela presença de sedimentos. De facto, a condição da superfície do isolador compósito usado, não representa um risco ao comportamento dielétrico do equipamento, pois comparando com o isolador novo, houve apenas uma redução insignificante de 3 kV. É ainda possível verificar que o comportamento dos compósitos é extramente satisfatório quando a sua superfície é coberta por orvalho: o isolador novo reduziu a tensão média de disrupção em 13 kV, enquanto no isolador usado, esse valor caiu 31 kV. Com a água desmineralizada, procurava-se avaliar a dissolução dos depósitos presentes na superfície do segundo compósito e conseqüente aumento da condutividade ao longo da linha de fugas do isolador. Perante a diminuição da tensão de disrupção em 31 kV, é possível apontar um pequeno aumento nessa condutividade, não sendo suficientemente significativa para colocar em causa o a fiabilidade destes equipamentos. Este facto relaciona-se com as provas visuais de hidrofobia demonstradas na Figura 8.2 na medida em que a transferência desta propriedade para a camada de sedimentos não permite mineralizar a água de forma significativa. Além do mais, a hidrofobia garante uma distribuição bastante discreta da água e impossibilita a formação de gotas com volume superior por coalescência, dificultando a formação de efeitos de coroa e a passagem da corrente de fugas.

A resistência à sobretensão por parte dos compósitos é de tal forma elevada que não se registaram contornamentos em nenhum dos casos após a aplicação de 90% do valor médio de tensão de ruptura calculado para o isolador novo após 1 minuto de solicitação dielétrica. Este facto é mais notável no caso do isolador usado e com a superfície molhada, uma vez que não ocorreram correntes de fuga suficientemente fortes que originassem a ruptura. Já para 95% desse valor, o compósito poluído resistiu menos 15 segundos de aplicação contínua de tensão comparativamente aos casos anteriores.

Apesar de não se saber as razões que levaram à substituição do isolador compósito, nem o tempo o que mesmo esteve em serviço, pode garantir-se que se encontra em perfeitas condições físicas e dielétricas. Durante os ensaios realizados não se verificaram quaisquer anomalias visíveis na estrutura desse isolador, e os resultados obtidos mantiveram-se dentro de um curto intervalo de valores de tensão, o que evidencia grande estabilidade e fiabilidade. Tal como nos ensaios ao isolador novo, foram registados eflúvios intensos na região entre o terminal metálico sob tensão e a superfície inferior da primeira saia, o que demonstra a elevada intensidade de campo elétrico presente nessa zona e a importância de aplicação de anel de coroa. A intensidade desses fenómenos elétricos, ou seja, distância de influência, luminosidade e efeitos sonoros, eram incrementados com o aumento da tensão aplicada aos isoladores.



Figura 8.5: Coalescência da água pulverizada nas extremidades do isolador de porcelana.

Por sua vez, apesar de possuir uma linha de fuga mais curta, o isolador de porcelana registou valores a seco da mesma ordem de grandeza que os isoladores compósitos. Como o diâmetro das saias do isolador de porcelana é superior aos compósitos, este pode contribuir para um aumento relativo da tensão suportada a seco. Não obstante, quando a superfície é humedecida, a tensão suportada pela cadeia é seriamente reduzida em mais de 40%. Os valores de tensão de ruptura tendem a ser mais erráticos, o que se traduz em intervalos de resultados mais alargados. Esta redução pode relacionar-se com o facto de a superfície do isolador de porcelana permitir a coalescência da água pulverizada em gotas de grande volume que rapidamente escorrem para o limite das

saias (Figura 8.5), onde permanecem como agentes capazes de deformar o campo elétrico. Esta deformação deve-se às diferentes permeabilidades elétricas da porcelana, água e ar, que provoca intensificação do potencial elétrico nos pontos de junção dos três elementos. Este efeito foi várias vezes observado através de descargas parciais entre as saias da cadeia, sem que essas provocassem o contornamento total da mesma.

No caso de superfície molhada, o aumento da tensão aplicada levava ao aparecimento de eflúvios em torno dos espigões dos isoladores de porcelana, com especial ênfase nas primeiras unidades. Ocasionalmente, a primeira saia apresentava descargas parciais de tal forma fortes que interligavam o espigão de suporte do tubo à campânula do respectivo isolador através de vários caminhos ionizados.

Quando sujeito a stress elétrico prolongado, o isolador de porcelana respondeu satisfatoriamente a 90% da tensão média de disrupção (igual à registada no isolador compósito). Contudo, para 95% desse valor, o tempo necessário à disrupção foi inferior ao dos compósitos. Já com a superfície molhada, o isolador foi submetido a 278 kV (90%) e 293 kV (95%) e rapidamente foi contornado.

Assim sendo, conclui-se que a rigidez dielétrica dos isoladores de porcelana é fortemente afetada pela condensação de água na sua superfície, enquanto os isoladores compósitos apresentam maior resistência às solitações dielétricas, mesmo com superfície coberta com sedimentos finos.

Capítulo 9

Conclusões e Trabalhos Futuros

9.1 Considerações finais

Ao longo deste documento foram apresentados vários factos acerca do comportamento dielétrico dos principais materiais empregues para garantir o isolamento elétrico entre linhas condutoras e estruturas de apoio, bem como a importância que os mesmos representam na estabilidade e fiabilidade das redes de transmissão de energia elétrica.

Numa primeira fase foram apresentadas a constituição física dos isoladores cerâmicos do tipo de campânula e espigão. Conclui-se que o comportamento deste tipo de equipamento assenta sobretudo na transformação da força mecânica de tração exercida pelos condutos em forças de compressão sob os dielétricos dos diferentes isoladores que formam a cadeia. O sucesso dessa transferência de carga está principalmente relacionado com a forma do dielétrico, visto que é maximizada com o ângulo entre a saia e a parte vertical menores que 90° . Todavia, quanto menor for esse ângulo, maior será a concentração de forças em locais críticos, de tal forma que pode originar a fratura do dielétrico, devendo o desenho deste constituinte obedecer a um compromisso entre estas duas exigências mecânicas. Além disso, verifica-se grande preocupação com a coesão entre o dielétrico e as ferragens metálicas, necessitando de garantir uma expansão correta do cimento que as interliga.

A porcelana destaca-se como o dielétrico de maior aplicação neste tipo de equipamentos, justificada pelo excelente desempenho a forças de compressão, grande resistência a ataques químicos e um elevado conhecimento do modo de funcionamento adquirido ao longo de várias décadas de aplicação no sistema elétrico. De facto, a porcelana desde sempre acompanhou a evolução da construção das redes elétricas mundiais. No entanto, em ambientes com poluição elevada, a superfície é facilmente coberta por contaminantes que diminuem a resistividade superficial do isolador, além de apresentar um comportamento pobre face à condensação de humidade ou chuva, permitindo aglomeração das gotas depositadas. A cobertura da superfície dos isoladores comuns com uma tinta de silicone aumenta significativamente a rigidez dielétrica em locais de poluição elevada, sendo esta solução cada vez mais aplicada pela indústria.

Atualmente, assiste-se a uma tendência crescente de utilização de isoladores de vidro em linhas

elétricas de tensão mais elevada, baseada no facto de estes equipamentos estilhaçarem toda a saia em caso de defeitos, como fraturas internas, permitindo rapidamente identificar e substituir unidades danificadas.

O método de interligação dos isoladores de campânula e espigão proporciona grande versatilidade na especificação da linha de fugas, aumento da rigidez dielétrica e capacidade mecânica através do aumento de isoladores que compõem a cadeia. Essa versatilidade permite o uso destes equipamentos nos mais variados níveis de tensão do sistema elétrico, bem como em diversos tipos de aplicação.

Os isoladores compósitos surgiram nos finais da década de 60 como possíveis substitutos dos isoladores convencionais para linhas elétricas. Ao longo de quatro décadas de aplicação foram alcançados conhecimentos importantes quanto à sua estabilidade elétrica e mecânica que proporcionaram o avanço da qualidade e fiabilidade destes equipamentos. Dos principais esforços efetuados destacam-se o aumento da resistência química das fibras de vidro que compõem o núcleo interno, aumento da qualidade de selagem do mesmo e apuramento das misturas que constituem o revestimento exterior. Como o revestimento é composto por elementos orgânicos, torna-se suscetíveis a ataques químicos por reação com elementos atmosféricos verificando-se a degradação da superfície. Porém, e ao contrário dos cerâmicos, essas mesmas ligações proporcionam um comportamento não quebradiço e com baixa energia livre na sua superfície.

O comportamento mais notável deve-se à estabilidade energética superficial do revestimento, que possibilita um comportamento extraordinário quanto à aderência da água, tornando-a altamente hidrofóbica e com excelente atuação face à poluição, logo, mais resistente a contornamento em situações de chuva. Dos vários polímeros aplicados neste tipo de tecnologia, destaca-se a borracha de silicone pela sua hidrofobia, contudo não deve ser aplicada de forma pura, visto que o seu comportamento mecânico progride com o aumento da percentagem de polímero EPDM utilizado. Além disso, a adição de *fillers* proporcionam o aumento da resistência à tração, condução térmica, aumento da temperatura máxima suportável e redução de custo. A eficácia destes últimos está relacionada com o tamanho das partículas e quantidade envolvida na mistura do polímero final.

Fatores como o nível de tensão, grau de poluição, tipo de clima, dimensionamento do isolador e qualidade de material são determinantes no período de vida útil dos isoladores. Pretende-se que os equipamentos desempenhem corretamente as suas funções ao longo dos anos de vida útil e para tal, a monitorização das condições físicas dos isoladores ou a previsão da necessidade de manutenção são fundamentais. O correto dimensionamento da linha de fugas e do perfil do isolador bem como a previsão das condições ambientais presentes nos trajetos das linhas são medidas passivas que permitem determinar a periodicidade de inspeções visuais a serem realizadas aos equipamentos. Essas inspeções podem ser efetuadas através de várias técnicas, algumas com maior fiabilidade e complexidade.

O envelhecimento dos isoladores compósitos pode originar degradações ou danos na sua estrutura que poderão obrigar a sua substituição, uma vez que certas modificações podem comprometer a estabilidade mecânica do equipamento e conseqüentemente, a continuidade de serviço das respetivas linhas. Já os cerâmicos são vulneráveis a danos por impacto devido à fragilidade do

dielétrico, todavia altamente resistente a ataques químicos e descargas elétricas, especialmente no caso da porcelana. A degradação das propriedades elétricas e mecânicas dos isoladores devem-se à combinação de vários agentes naturais e circunstâncias de operação que os equipamentos enfrentam ao longo do seu tempo de serviço. A poluição ambiental representa uma das maiores ameaças à integridade da estrutura e condições de operação dos isoladores, destacando-se o efeito dos raios ultravioleta nos polímeros e a acumulação de sedimentos na superfície. Além disso, a distribuição dos campos elétricos pode causar degradações intensas nas regiões mais próximas dos terminais dos isoladores, através de fenômenos elétricos como o efeito de coroa e descargas parciais. Estas atividades são intensificadas pela presença de água na sua superfície, e como tal, mais propícia de ocorrer nos cerâmicos. Verifica-se ainda que o armazenamento, transporte e instalação dos equipamentos são deveras importante para assegurar as devidas condições mecânicas, as quais são essenciais ao funcionamento correto em serviço.

A conquista de espaço no mercado por parte dos isoladores compósitos foi um processo gradual e diretamente relacionado com as experiências relatadas pelas companhias que apostavam nas suas características para a resolução de problemas para os quais os cerâmicos não eram capazes. Destas destacam-se a hidrofobia superficial e capacidade de transmissão desta para o topo da camada de poluição depositada após algum tempo sem solicitações significativas. Além disso, o peso muito inferior aos cerâmicos, a resistência ao vandalismo e rigidez mecânica permitem obter poupanças expressivas durante o tempo de serviço. Por outro lado, as ligações dos isoladores de campânula e espigão fornecem grande versatilidade no comprimento das cadeias utilizadas e extensas linhas de fugas, o que permite que sejam aplicados em todos os níveis de tensão. No entanto, é a experiência adquirida ao longo de várias décadas de aplicação dos cerâmicos que leva à preferência deste tipo de tecnologia, visto que o seu comportamento é mais previsível.

O conhecimento das características dos materiais é fundamental para efetuar dimensionamentos em concordância com as condições esperadas em serviço. A determinação da rigidez dielétrica dos isoladores através de ensaios elétricos em ambiente laboratorial permite elucidar sobre o comportamento dos mesmos em condições representativas das enfrentadas em serviço. As experiências elétricas elaboradas neste trabalho permitem concluir que a capacidade dielétrica dos isoladores cerâmicos é fortemente afetada pela condensação de água na sua superfície, enquanto os isoladores compósitos, mesmo em caso de grande acumulação de poluição, mantém o mesmo grau de confiança comparativamente ao caso seco. Como tal, comprova-se que a hidrofobia por eles apresentada é uma mais-valia para a fiabilidade do sistema elétrico.

Apesar de ainda existirem descrenças quanto aos isoladores compósitos, conclui-se que os mesmos representam uma aposta cada vez mais segura para aplicação em linhas elétricas, uma vez que a evolução dos métodos de fabrico e materiais utilizados providenciam maior resistência aos agentes de degradação, proporcionando ainda garantias de comportamentos distintos em ambientes de grande poluição. Além disso, as vantagens económicas inerentes à aplicação destes equipamentos representam um ponto deveras importante para a sua escolha. O seu comportamento dielétrico face a situações de poluição forte permite aumentar os níveis de confiança nos troços linhas de transmissão localizadas em zonas de risco elevado e com tendência de disrupções. Com

a proliferação desta tecnologia, antevê-se uma redução global dos preços de aquisição, permitindo elevar os casos de aplicação desta tecnologia. Portanto, conclui-se que o aumento da aplicação dos isoladores compósitos pode de facto apresentar vantagens técnicas e económicas para a exploração da rede de transmissão nos vários níveis de tensão e circunstância enfrentadas.

9.2 Trabalhos futuros

Neste trabalho foram avaliadas várias vantagens técnicas e económicas da instalação de isoladores compósitos em linhas elétricas, em detrimento dos convencionais isoladores de campânula e espigão. Atendendo à geografia do território português, e aos trajetos das linhas de alta tensão, é perceptível que um grande número de apoios estão sujeitos a níveis de poluição elevados devido à proximidade da costa, de centros urbanos ou de áreas mais áridas. Portanto, seria proveitoso avaliar o impacto técnico e económico da utilização de isoladores compósitos em vários níveis de tensão.

Mais, uma vez que a indústria aposta no revestimento de isoladores cerâmicos com tinta de silicone para incrementar a rigidez dielétrica, considera-se interessante um estudo comparativo entre este tipo de solução e os isoladores compósitos.

Referências

- [1] ISO/IEC. *Insulation co-ordination - Part 2: Application guide*. IEC 60071-2, third edição, 1996.
- [2] Hiroya Homma, Toshiyuki Kuroyagi, Ryuichi Ishino, e Takeshi Takahashi. Comparison of leakage current properties between polymeric insulators and porcelain insulators under salt polluted conditions. Em *Electrical Insulating Materials, 2005.(ISEIM 2005). Proceedings of 2005 International Symposium on*, volume 2, páginas 348–351. IEEE, 2005.
- [3] JST Looms. *Insulators for high voltages*, volume 7. Peter Peregrinus Limited, 1988.
- [4] PM Pakpahan, MA Djauhari, et al. Investigation of comparison on porcelain and epoxy resin insulator conditions from a coastal area due to various parameters. Em *Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International*, páginas 1–5. IEEE, 2008.
- [5] A Schut e P Besold. Reliability and economic advantages of silicone rubber insulators. Relatório técnico, Ceramtec AG, 2000.
- [6] Rahisham Abd Rahman. *Investigations of ZnO microvaristor for stress control on polymeric outdoor insulators*. Tese de doutoramento, Cardiff University, 2012.
- [7] Bharat Heavy Electrical Ltd. Composite insulators. Relatório técnico, BHEL Ceramics, Dezember 2008.
- [8] M Kumosa. Brittle fracture failure of composite insulators. *IEEE Trans. Power Delivery*, 2005.
- [9] Boonruang Marungsri, Hiroyuki Shinokubo, Ryosuke Matsuoka, e Seiji Kumagai. Effect of specimen configuration on deterioration of silicone rubber for polymer insulators in salt fog ageing test. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 13(1):129–138, 2006.
- [10] Taeko Tanahashi, Syoichi Ishikawa, Masahito Imai, Tomoyasu Sasaki, Hiroyuki Shinokubo, Ryosuke Matsuoka, Masayoshi Suzuki, e Masanori Isozaki. Effect of insulator configuration on ageing deterioration of polymer insulators. Em *Electrical Insulation Conference*, páginas 102–105. IEEE, 2011.
- [11] Charles A Harper. *Handbook of plastics, elastomers, and composites*, volume 4. McGraw-Hill New York; London, 1996.
- [12] Gernot Heger, HJ Vermeulen, JP Holtzhausen, e WL Vosloo. A comparative study of insulator materials exposed to high voltage ac and dc surface discharges. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 17(2):513–520, 2010.

- [13] Apisit Chaisaengsukkul, Vijit Kinares, e Norasage Pattanadech. A comparison between silicone rubber and epdm under polluted dust with ozone, uv and temperature. Em *TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference*, páginas 1272–1277. IEEE, 2010.
- [14] DA Swift, C Spellman, e Abderrahmane Haddad. Hydrophobicity transfer from silicone rubber to adhering pollutants and its effect on insulator performance. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 13(4):820–829, 2006.
- [15] R Raja Prabu. Electrical insulation characteristics of silicone and epdm polymeric blends. i. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 14(5), 2007.
- [16] ISO VIM. International vocabulary of basic and general terms in metrology. *International Organization*, 2004:09–14, 2004.
- [17] Fang Su, Jia Zhidong, Gao Haifeng, e Guan Zhicheng. Influence of fillers on silicone rubber for outdoor insulation. Em *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007. Annual Report-Conference on*, páginas 300–303. IEEE, 2007.
- [18] EA Cherney. Silicone rubber dielectrics modified by inorganic fillers for outdoor high voltage insulation applications. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 12(6):1108–1115, 2005.
- [19] SM Gubanski, Andreas Dernfalk, Johan Andersson, e Henrik Hillborg. Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 14(5):1065–1080, 2007.
- [20] ANSI/IEEE. *Std. 987 Guide for Cleaning Insulators*, 2005.
- [21] Field Guide. Visual inspection of polymer insulators. *EPRI, Palo Alto, CA*, 1013283, 2006.
- [22] Jeff Burnham. Guideline for visual identification of damaged polymer insulators. *Transmission department, Juno Beach*, 1998.
- [23] Philips A. Review for the state of the art and application of polymer materials / insulation used in distribution class (12 - 46 kv class) substations. *EPRI, Palo Alto, CA*, 1002627, 2003.
- [24] F Schmuck e C de Turreil. Brittle fractures of composite insulators. an investigation of their occurrence and failure mechanisms and risk assessment. *CIGRE WG*, páginas 22–03, 2003.
- [25] N Bashir e H Ahmad. Ageing of transmission line insulators: The past, present and future. Em *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, páginas 30–34. IEEE, 2008.
- [26] S Rowland, J Robertson, Y Xiong, e R Day. Electrical and material characterization of field-aged 400 kv silicone rubber composite insulators. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 17(2):375–383, 2010.
- [27] AP Mishra, RS Gorur, e S Venkataraman. Evaluation of porcelain and toughened glass suspension insulators removed from service. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 15(2):467–475, 2008.
- [28] AP Mishra, RS Gorur, S Venkataraman, e D Kingsbury. Condition assessment of porcelain and toughened glass insulators from residual strength tests. Em *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on*, páginas 413–416. IEEE, 2006.

- [29] A. Phillips. Application of polymer insulators (nci): Workshop presentations. *EPRI, Palo Alto, CA, 1007752*, 2003.
- [30] *Design of external insulation from the point of view of pollution*. Central Power Research Institute, 2010.
- [31] ISO/IEC. *Guide for Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions*. IEC 60305, first edição, 2008.
- [32] TASK FORCE CIGRE. Influence of ice and snow on the flashover performance of outdoor insulators—part i: Effects of ice. *Electra*, 187:91–111, 2008.
- [33] M Farzaneh, J Zhang, M Fréchette, T Sakakibara, e E Da Silva. Effects of high altitude and atmospheric icing on the performance of outdoor insulators. Em *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES*, páginas 1–6. IEEE, 2006.
- [34] Qin Hu, Lichun Shu, Xingliang Jiang, Caixin Sun, Zhijin Zhang, e Jianlin Hu. Effects of shed configuration on ac flashover performance of ice-covered composite long-rod insulators. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 19(1):200–208, 2012.
- [35] Masoud Farzaneh e William A Chisholm. Effects of ice and snow on the electrical performance of power network insulators. Em *Atmospheric Icing of Power Networks*, páginas 269–325. Springer, 2008.
- [36] B Venkatesulu e M Joy Thomas. Corona aging studies on silicone rubber nanocomposites. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 17(2):625–634, 2010.
- [37] Wang Jianwu, Wen Xishan, Lan Lei, Liu Haiyan, e Yan Yuting. Study of discharge process and characteristics of discrete water droplets on the rtv hydrophobic surface in the non-uniform electric field. Em *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, páginas 1–6. IEEE, 2006.
- [38] Ailton L Souza e Ivan JS Lopes. Electric field distribution along the surface of high voltage polymer insulators and its changes under service conditions. Em *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, páginas 56–59. IEEE, 2006.
- [39] Koji Katada, Yoshikazu Takada, Makoto Takano, Takeshi Nakanishi, Yoji Hayashi, e Ryo-sake Matsuoka. Corona discharge characteristics of water droplets on hydrophobic polymer insulator surface. Em *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on*, volume 2, páginas 781–784. IEEE, 2000.
- [40] Suat Ilhan e Aydogan Ozdemir. Corona ring optimization for v-insulator string on the point of riv and ac flashover performance. Em *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010 International Conference on*, páginas 268–271. IEEE, 2010.
- [41] Zhou Jian-bo, Gao Bo, e Zhang Qiao-gen. Dry band formation and its influence on electric field distribution along polluted insulator. Em *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, páginas 1–5. IEEE, 2010.
- [42] *Polymer Insulator Survey 2002: Utility Field Experience and In-Service Failures*, volume 1007752, 2003.

- [43] Dixit Pathak, Mukesh Satwani, Mahesh Patel, e Chintan Patel. The development of silicone rubber composite insulators in power system. Em *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on*, páginas 1–4. IEEE, 2009.
- [44] INMR. Service experience with insulators on transmission lines in qatar. *Utility Practice & Experience*, 15(2):34, 2007.
- [45] Ravi S. Gorur. Six utilities share their perspectives on insulators, April 2010.
- [46] IY Al-Hamoudi e ZM Al-Hamouz. Reliability and cost effectiveness of silicone rubber insulators in the eastern coastal industrial area of saudi arabia. Em *10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*, páginas 156–168. IEEE, 2003.
- [47] Liang Xidong. Scene from china: Reviewing why silicone insulators came to dominate 1000 kv line design. *Utility Practice and Experience*, 13(1):28, 2005.
- [48] INMR. Utility in isreal turns to composite insulators to improve system reliability. *Utility Practice and Experience*, 19(1):38, 2011.
- [49] Luís Campos Pinto Albino Marques, Albertino Menezes. Melhoria do desempenho da rede nacional de transporte de electricidade de portugal. Em *Décimo Terceiro Encontro Regional Ibero Americano de CIGRÉ*, Maio 2009.
- [50] ISO/IEC. *High voltage test techniques Part 1: General Definitions and Test Requirements*. IEC 60060-1, third edição, 2010.
- [51] ISO/IEC. *Voltage measurement by means of standard air gaps*. IEC 60052, third edição, 2002.
- [52] ISO/IEC. *Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltage greater than 1000 V*. IEC 60168, 4.2 edição, 2001.
- [53] ISO/IEC. *Insulators for overhead lines - Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria*. IEC 61109, second edição, 2005.
- [54] ISO/IEC. *Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V - Part 2: Insulator strings and insulator sets for a.c. systems - Definitions, test methods and acceptance criteria*. IEC 60383, first edição, 1993.
- [55] ISO/IEC. *Voltage measurement by means of standard air gaps*. IEC 60052, third edição, 2002.
- [56] ISO/IEC. *IEC standard voltages*. IEC 60038, seventh edição, 2009.
- [57] Alexandre Barreira, Castilho Neves, Nelson Cruz, Allen Lima, Andrade Lopes, e Mota Duarte. Guia de coordenacao de isolamento para a rede pti - edp. Relatório técnico, EDP, Dezembro 1985.