HÉLIO EIJI SUETA

**Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção
contra descargas atmosféricas – Uma visão relativa aos danos físicos**

São Paulo

2005

HÉLIO EIJI SUETA

**Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção
contra descargas atmosféricas – Uma visão relativa aos danos físicos**

Tese a ser apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia

São Paulo

2005

HÉLIO EIJI SUETA

**Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção
contra descargas atmosféricas – Uma visão relativa aos danos físicos**

Tese a ser apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:

Sistemas de Potência

Orientador:

Prof. Dr.

José Aquiles Baesso Grimoni

São Paulo

2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Sueta, Hélio Eiji

Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas: uma visão relativa aos danos físicos /

H.E. Sueta. -- São Paulo, 2005.

255 p.

Tese de doutoramento - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica.

1.Descarga atmosférica 2.Ensaio elétrico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica II.t.

SUETA, H.E. **Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas – Uma visão relativa aos danos físicos.** 2005. 255f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ERRATA

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
Agrade- cimentos	18-19	Prof. Dr. Rui Altafim	Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim
1	11	Um sistema externo de proteção	Um sistema de proteção
3	19-21	Estas discussões foram, em grande parte, registradas através de trocas de correspondência eletrônica para todo o grupo, sendo que os textos técnicos gerados, se colocados em uma coletânea num único arquivo, produziriam um texto com mais de 500 páginas, considerando somente as correspondências do período de fevereiro de 2004 até julho de 2005.	Estas discussões foram, em grande parte, registradas através de trocas de correspondência eletrônica para todo o grupo.
13	15	Coulumbs	coulumbs
16	9	que consiste do sistema de ligação equipotencial para descarga atmosférica	que consiste de ligações para redução de tensão para descarga atmosférica
21	14-15	A primeira descarga de retorno atinge correntes de pico de, aproximadamente, 30 kA	A primeira descarga de retorno atinge correntes de pico com um valor médio de 30 kA

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
31	17-19	Ao contrário da norma, que prevê somente a descarga descendente de polaridade positiva ...	Apesar da norma não especificar a polaridade da descarga ...
51	5	..., que tem uma velocidade duas ou mais vezes maior que a do líder bidirecional ...	... que tem uma velocidade duas ou mais ordens de grandeza maior que a do líder bidirecional ...
118	11	Desta forma, não é possível simular, em laboratório ...	Desta forma, não é recomendável simular, em laboratório ...
119	Figura 59	Comparação das Perfurações	Comparação entre as Perfurações
120	Figura 60	Comparação Perfurações	Comparação entre as Perfurações
132	13	... comporta-se praticamente como um plano condutor.	... comporta-se praticamente como um plano condutor em termos de ensaios dielétricos.
137	7-8	... os trabalhos do Sowa [47], [48], [70] e do Sartori e Cardoso [45], [71]	Por exemplo, os trabalhos do Sowa [47], [48], [70]
146	16-17	A Figura 73 mostra o oscilograma da onda incidente e da corrente calculada na simulação com a reflexão.	Passar esta frase inteira para o fim da página, logo após “...os efeitos das reflexões são mais críticos.”
148	3	ponto de medição de corrente	ponto de cálculo da corrente
151	Última linha	... as correntes em Z2 e Z3.	... as correntes em Z2 e Z3, calculadas logo após a junção.
154	Figura 84	Zeq	Corrente no trecho com os parâmetros de Zeq
154	Figura 84	Soma das correntes em Z2 e Z3	Corrente equivalente à soma das correntes em Z2 e Z3

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
154	Figura 84	heidler	Corrente incidente
155	15	... propagação da descarga atmosférica no concreto armado ...	... propagação da descarga atmosférica em um condutor embutido em concreto armado
156	1	propagação da onda no concreto armado	propagação da onda em um condutor embutido em concreto armado
217	17	... não acrescentam vantagem aos sistemas tradicionais.	... não acrescentam vantagem em relação aos sistemas tradicionais.
219	2	... até mesmo de vidas humanas.	... até mesmo de vidas humanas. Neste sentido é recomendável que nos SPDA sejam levados em conta este problema, evitando utilizar este tipo de telha em locais propícios a incêndios ou, no caso de utilizá-las, determinar distâncias de segurança entre as telhas e eventuais materiais que possam iniciar um incêndio.
223	15	...nos sistemas de proteção contra as descargas atmosféricas.	...nos sistemas de proteção contra as descargas atmosféricas. Além disto, propõe metodologias para ensaios em componentes do SPDA complementando os textos das normas existentes e mesmo nos textos das normas em revisão.

Aos meus filhos, Maria Vitória e Hélio Masaru, motivos maiores de uma busca incessante ao futuro e à saúde ...

Aos meus pais, Masaru (in memoriam) e Masae, motivos maiores de uma busca eterna ao entendimento do mundo e à sabedoria ...

À minha esposa, Rosana Maris, encontro sublime de uma busca ao amor, amizade, companheirismo e felicidade ...

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP que possibilitou a execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Orlando Sílvio Lobosco (in memorian) pelo grande incentivo e orientações iniciais em relação à forma deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni pela ajuda, incentivo e coordenação deste trabalho.

Ao amigo e co-orientador Prof. Dr. Geraldo Francisco Burani pela grande ajuda e orientação no rumo deste trabalho.

Ao amigo Prof. Dr. Alexandre Piantini pela grandiosa colaboração na análise em diversas etapas deste trabalho.

Ao amigo Duílio Moreira Leite, grande consultor em diversos assuntos, em especial, nos que são tratados neste trabalho.

Aos amigos Celso Pereira Braz, Clovis Yoshio Kodaira, Luis Eduardo Caires, Ricardo Santos d'Ávila e Milton Shiguihara pelas diversas discussões técnicas e colaboração especialmente nos ensaios de laboratório.

Ao amigo Denis Kiyan Miyahira pela grandiosa colaboração nas simulações e discussões técnicas.

Aos Prof. Dr. André Nunes de Souza, Prof. Dr. Arnaldo Gakiya Kanashiro e Prof. Dr. Rui Altafim pelo grande incentivo.

Aos funcionários das Seções Técnicas de Altas Correntes, de Alta Tensão e de ensaios em Equipamentos Eletromédicos do IEE-USP pela valiosa colaboração nos ensaios realizados.

À ERICO DO BRASIL, PERFILOR S.A. e CONSID pelo fornecimento das amostras ensaiadas.

À Profa. Dra. Mércia M.S. Bottura de Barros e Prof. Reginaldo Mariano da Silva do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP pela confecção de amostras para ensaios e orientações na área de concreto.

Ao amigo Jobson Modena, secretário da Comissão de Estudos CE 64.10 do Comitê Brasileiro de Eletricidade e coordenador do grupo de discussão virtual sobre proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, que propiciou a participação e acesso às grandes discussões sobre o assunto.

Aos membros da Comissão de Estudos CE 64.10 do Comitê Brasileiro de Eletricidade, pelas diversas discussões técnicas e esclarecimentos.

Aos membros do Grupo de Discussão Virtual sobre proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, pelas grandes idéias e esclarecimentos sobre o assunto.

À Vera Maria Silveira e, em especial, à Adaljisa Furlan da Paixão pelo incentivo e ajuda na formatação e digitação.

Ao amigo Antonio José dos Prazeres pelo incentivo, colaboração e retaguarda nos afazeres rotineiros.

À Maria de Fátima Atanazio Mochizuki e demais funcionárias da biblioteca do IEE-USP pela grande colaboração na pesquisa bibliográfica.

Ao amigo Sérgio Antonio de Oliveira pela confecção de figuras incluídas neste trabalho.

À Prof. Lúcia Laurenço L. de Oliveira pela colaboração na revisão do “abstract” deste trabalho.

À Patrícia Naomi Tomisawa pela colaboração na revisão ortográfica deste trabalho.

Enfim, à Deus por tudo, e a todos que colaboraram, direta e indiretamente, na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta alguns aspectos específicos sobre o tema “proteção de estruturas contra descargas atmosféricas”, principalmente no que se refere ao uso de partes estruturais das edificações como integrantes do sistema de proteção. São discutidos neste trabalho diversos pontos polêmicos referentes ao tema, tais como: captadores especiais, o sistema dissipativo e o uso das ferragens das colunas de concreto armado como parte dos subsistemas de descida e de aterramento.

São abordados, também, os principais danos que podem ocorrer nas edificações devido às descargas atmosféricas, principalmente quando a proteção utilizar partes naturais da estrutura, tais como: os telhados metálicos e as emendas das ferragens das colunas de concreto armado.

Após uma verificação do estado da arte no assunto, onde são estudados diversos trabalhos, normas e livros sobre as características das descargas, sobre os danos oriundos das descargas, blindagens, medições de campos eletromagnéticos, distribuição de correntes e sobre a normalização e ensaios referentes à proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, o assunto foi estudado em três partes que compõem os subsistemas do SPDA.

No subsistema de captação, os danos em telhas metálicas e de concreto protendido foram estudados através de ensaios e verificações teóricas e, principalmente, experimentais.

No subsistema de descida, o estudo experimental deu enfoque às emendas das ferragens e ao uso destas como descidas naturais.

Finalmente, no subsistema de aterramento, as fundações das edificações foram estudadas através de verificações experimentais como parte do aterramento.

Este trabalho acrescenta ao conhecimento atual sobre o assunto, diversas particularidades não contempladas nas normas e nas publicações mais recentes no que tange à proteção de estruturas contra as descargas atmosféricas utilizando partes naturais das edificações.

ABSTRACT

This work presents some specific aspects on the subject “lightning protection of structures“, mainly when the use of structural parts of the buildings as part of the protection systems is concerned. Several polemical issues are discussed, such as: special air-termination, the dissipation array system and the use of steel-reinforcing rods of the reinforced concrete columns as part of the down-conductor system and of the earth-termination system.

Also treated is the main damage that can occur to the buildings due to lightning, mainly when the protection system uses the natural components of the structures, such as: the metallic rooftops and the joints of the steel-reinforcing rods of the reinforced concrete columns.

After examining the state-of-the-art in the subject, which analyses several papers, standards and books about lightning characteristics, damage resulting from lightning, shieldings, measurements of electromagnetic fields, distribution of currents and about standardisation and tests related to the protection of structures against lightning, the subject was studied in the three parts that compose the lightning protection systems.

In the air-termination system, the damage to metallic rooftops and to pre-stressed concrete rooftop tiles was studied by means of tests and theoretical and mainly experimental analyses.

In the down-conductor system, the experimental study focused on the joints of the steel-reinforcing rods and on the use of these as natural down-conductors.

Finally, in the earth-termination system, the foundations of the buildings were studied (as part of the grounding) through experimental analyses.

This work adds to the current knowledge about the subject several particularities which are not observed in the standards or in the most recent publications concerning the lightning protection systems in buildings that use their natural components for this purpose.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Subsistemas de um SPDA

Fig. 2 – Experiências com foguetes

Fig. 3 – Descarga “trigada”

Fig. 4 – Detalhe da torre utilizada para medição de descargas atmosféricas

Fig. 5 – Uso de foguetes para captura de descargas atmosféricas – Técnica Clássica

Fig. 6 – Uso de foguetes para captura de descargas atmosféricas – Técnica Altitude

Fig. 7 – Terminal aéreo ensaiado

Fig. 8 – Detalhe da telha ensaiada e posicionamento do eletrodo

Fig. 9 - Detalhe do fio condutor para inicialização do arco elétrico após sua fusão

Fig. 10 – Detalhe da ponta do terminal aéreo após os arcos

Fig. 11 – Detalhe do dano e da haste auxiliar

Fig. 12 – Detalhe do dano com 284 A.s.

Fig. 13 - Detalhe do dano com 66 A.s.

Fig. 14 - Detalhe do dano com 100 A.s.

Fig. 15 – Exemplo de oscilograma de corrente

Fig. 16 – Ensaio com o arco de corrente alternada estabelecido no interior de uma camada de água

Fig. 17 – Detalhe do local de estabelecimento do arco

Fig. 18 – Detalhe do dano na telha e no eletrodo – Pulsos de corrente alternada

Fig. 19 – Detalhe do dano na telha no ensaio com arco em corrente contínua.

Fig. 20 – Detalhe do fio condutor utilizado para início de arco de corrente contínua

Fig. 21 – Detalhe dos danos no ensaio com corrente contínua

Fig. 22 - Oscilograma típico do pulso de corrente contínua utilizado

Fig. 23 - Detalhe da montagem para ensaio com o arco de corrente contínua estabelecido no interior de uma camada de água.

Fig. 24 – Detalhe do dano no ensaio de corrente contínua na água

Fig. 25 – Montagem para ensaios com correntes impulsivas

Fig. 26 – Detalhe do local onde ocorreu a descarga de impulso de corrente

Fig. 27 – Montagem do ensaio com corrente impulsiva no interior de uma camada de água

Fig. 28 – Detalhe do local onde ocorreu a descarga

Fig. 29 – Terminais aéreos ensaiados

Fig. 30 – Montagem para ensaios de pulsos de corrente contínua na Telha nº 2

Fig. 31 – Ajuste da precipitação da chuva

Fig. 32 – Detalhe da montagem e do eletrodo utilizado no ensaio de impulso na Telha nº 2

Fig. 33 – Detalhe das perfurações e carbonização ocorridas no ensaio de impulso na Telha nº 2

Fig. 34 – Detalhes dos danos na Telha nº 2

Fig. 35 – Ensaio com pulsos de corrente contínua, em tubo fixado na Telha nº 2, simulando um terminal aéreo

Fig. 36 – Detalhes do Gerador de Impulsos, do eletrodo e da Telha nº 3

Fig. 37 – Detalhe da perfuração e carbonização na Telha nº 3 devido ao impulso 2

Fig. 38 – Detalhe do eletrodo utilizado nos ensaios na Telha nº 4

Fig. 39 – Detalhe do eletrodo utilizado e da conexão de retorno para a fonte

Fig. 40 – Detalhes dos danos na Telha nº 3, na aplicação nº 1

Fig. 41 – Detalhes dos danos na Telha nº 3, na aplicação nº 5

Fig. 42 – Detalhe do condutor utilizado para início do arco nos ensaios na Telha nº 3

Fig. 43 – Terminal aéreo com fixação horizontal e dois furos

Fig. 44 - Terminal aéreo com rosca mecânica e duas porcas

Fig. 45 - Terminal aéreo reforçado com quatro porcas

Fig. 46 - Terminal aéreo simples com rosca soberba

Fig. 47 – Ensaio no terminal aéreo na Telha nº 2 – Detalhe do fogo no poliuretano

Fig. 48 – Detalhes dos testes de chuva nas telhas

Fig. 49 – Detalhe da uma perfuração no ensaio com impulso atmosférico

Fig. 50 – Detalhe do eletrodo e da perfuração

Fig. 51 – Detalhe da perfuração

Fig. 52 – Detalhe da perfuração na telha com poliuretano – Telha nº 2

Fig. 53 – Detalhe do terminal aéreo após ensaio

Fig. 54 – Detalhe do contato entre a base do terminal aéreo e a telha metálica após o ensaio

Fig. 55 – Detalhe dos danos, na superfície superior, de um terminal aéreo com pouca área de contato com a telha, após a passagem da corrente de ensaio

Fig. 56 – Detalhe dos danos, na superfície inferior, de um terminal aéreo com pouca área de contato com a telha, após a passagem da corrente de ensaio

Fig. 57 – Gráfico do diâmetro das perfurações em função da carga, para a Telha nº 1

Fig. 58 – Gráfico do diâmetro das perfurações em função do I^2t , para a Telha nº 1

Fig. 59 – Gráfico do diâmetro das perfurações, em função da carga, para várias telhas

Fig. 60 – Gráfico do diâmetro das perfurações, em função do I^2t , para várias telhas

Fig. 61 – Detalhe da ligação da ferragem interna da telha de concreto protendido ao aterramento

Fig. 62 – Detalhe de eletrodo e do dano para tensão prospectiva de 800 kV

Fig. 63 – Detalhe do dano (na lateral) para tensão prospectiva de 60 kV

Fig. 64 – Ensaio realizado em isolador sobre chapa metálica

Fig. 65 – Ensaio realizado em isolador sobre a telha

Fig. 66 – Oscilograma de corrente

Fig. 67 – Montagem para ensaio de impulso de corrente

Fig. 68 – Ensaio de impulso de corrente - Detalhe do dano

Fig. 69 – Estrutura em forma de cubo: descidas e pontos onde foram calculadas as tensões

Fig. 70 – Estrutura mais complexa: descidas e pontos onde foram calculadas as tensões

Fig. 71 – Ondas incidente, transmitida e refletida.

Fig. 72 – Condutor aterrado – Ondas incidente e refletida

Fig. 73 – Oscilograma da onda incidente e da corrente medida na simulação com reflexão -
Condutor aterrado

Fig. 74 – Oscilograma da onda incidente e da corrente medida na simulação com reflexão -
Condutor em aberto

Fig. 75 – Oscilograma da onda incidente e da corrente medida na simulação com reflexão - Com
impedância de aterramento de 10Ω

Fig. 76 – Comparação MATLAB x PSPICE - Caso de uma torre com 248 metros.

Fig. 77 – Modelo utilizado para simulação da torre em PSPICE

Fig. 78 – Ondas em junção tipo T

Fig. 79 – Representação utilizada para junção tipo T com as impedâncias em paralelo

Fig. 80 – Corrente em Z1

Fig. 81 – Corrente em Z2 e Z3

Fig. 82 – Modelo utilizado para uma junção tipo T

Fig. 83 – Modelo utilizado considerando a impedância característica equivalente

Fig. 84 – Oscilogramas obtidos na simulação

Fig. 85 – Modelo utilizado para a estrutura em forma de cubo

Fig. 86 – Distribuição das correntes considerando as reflexões

Fig. 87 – Modelo utilizado com a inclusão da resistência de aterramento

Fig. 88 – Distribuição das correntes, considerando as reflexões e a resistência de aterramento

Fig. 89 – Estrutura com nove descidas e a descarga atingindo o centro

Fig. 90 – Resultados das simulações realizadas nas estruturas da Figura 89

Fig. 91 – Modelo de estrutura estudada – Descarga atingindo o canto – Pontos onde foram medidas as tensões

Fig. 92 – Resultados da simulação realizada

Fig. 93 – (a) Emenda com arame; (b) detalhe.

Fig. 94 – (a) Emenda por solda elétrica; (b) detalhe.

Fig. 95 – (a) Emenda por solda exotérmica; (b) detalhe.

Fig. 96 – (a) Emenda por luva; (b) detalhe.

Fig. 97 – Aparelhos utilizados para medição das resistências elétricas das emendas

Fig. 98 – Detalhes das caixas utilizadas para confecção das colunas e da instalação das ferragens nas caixas

Fig. 99 – Preparação das colunas de concreto a serem ensaiadas

Fig. 100 – Amostras durante o tempo de “cura”

Fig. 101 – Aparelho utilizado para as radiografias

Fig. 102 – Montagem utilizada para os ensaios de impulso atmosférico

Fig. 103 – Radiografia da emenda exotérmica antes das aplicações de corrente

Fig. 104 – Radiografia da emenda por arame antes das aplicações da corrente

Fig. 105 – Radiografia da emenda por arame após as aplicações de corrente

Fig. 106 – Quebra da coluna de concreto para verificação de emenda após os ensaios

Fig. 107 – Detalhe das emendas após os ensaios e fora do concreto

Fig. 108 – Radiografia da emenda com luva especial

Fig. 109 – Radiografia da emenda com solda elétrica

Fig. 110 – Barras no interior do concreto antes dos ensaios

Fig. 111 – Radiografia após os ensaios – Detalhe da solda em uma das pontas das barras dentro da coluna de concreto

Fig. 112 – Detalhe externo da coluna com as ferragens sem emenda após os ensaios

Fig. 113 – Quebra da coluna com as ferragens inicialmente sem emendas

Fig. 114 – Detalhe de solda entre as ferragens após os ensaios

Fig. 115 – Esquema representando as ferragens de uma edificação com 10 andares utilizado para o cálculo da resistência elétrica das colunas

Fig. 116 – Gerador utilizado e detalhes da montagem para os ensaios

Fig. 117 – Preparação das amostras – Detalhe do posicionamento da ferragem na coluna

Fig. 118 – Preparação das amostras – Preenchimento do concreto

Fig. 119 – Amostras após o tempo de cura e antes dos ensaios

Fig. 120 – Detalhe do tanque com terra utilizado para os ensaios

Fig. 121 – Montagem dos corpos de prova no tanque e circuito utilizado

Fig. 122 – Esquema de medição de R_{TT}

Fig. 123 – Oscilograma de tensão típico

Fig. 124 – Oscilograma de corrente típico

Fig. 125 – Detalhe da haste ensaiada e de uma das amostras com traço 1: 7

Fig. 126 – Instalação das colunas de concreto no tanque

Fig. 127 – Detalhe das descargas no concreto

Fig. 128 – Curva $V \times I$ de uma das aplicações – Verificação da não linearidade

Fig. A1 – Estrutura em forma de cubo

Fig. A2 – Gráfico do modelo da corrente da descarga atmosférica utilizado

Fig. A3 – Pontos onde foram calculadas as tensões

Fig. A4 – Estrutura mais complexa – descarga atingindo o centro da edificação

Fig. A5 – Estrutura mais complexa - definição dos laços

Fig. A6 – Representação da tensão nos condutores em 3 D

Fig. A7 – Definição dos laços – Descarga atingindo o canto da edificação

Fig. A8 – Distribuição da tensão em 3D – Descarga atingindo o canto

Fig. A9 – Considerando as descidas formadas em quatro condutores em paralelo para formação da coluna

LISTA DE TABELAS

- Tabela 5.1** Espessuras mínimas dos componentes do SPDA
- Tabela 5.2** Parâmetros das correntes de descarga em relação aos níveis de proteção, segundo a IEC 1024-1-1/1993
- Tabela 5.3** Valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas de acordo com os níveis de proteção
- Tabela 5.4** Valores mínimos dos parâmetros das descargas atmosféricas e correspondentes raios das esferas rolantes, em função dos níveis de proteção
- Tabela 5.5** Eficiência do SPDA em função do nível de proteção
- Tabela 5.6** Danos ocorridos nos ensaios com corrente alternada a seco
- Tabela 5.7** Danos ocorridos nos ensaios com pulsos de corrente contínua
- Tabela 5.8** Danos verificados nos ensaios com pulsos de corrente contínua – Telha nº 2 com enchimento de poliuretano.
- Tabela 5.9** Danos nos ensaios de laboratório com pulsos de corrente contínua - Telha simples nº 3
- Tabela 5.10** Ensaio de Pulsos de corrente contínua nos terminais aéreos
- Tabela 5.11** Espaçamento máximo entre terminais aéreos ou hastes captoras, em função do nível de proteção, obedecendo ao método eletrogeométrico.
- Tabela 5.12** Espaçamento máximo, nas laterais de quadrados ou retângulos entre terminais aéreos ou hastes captoras dispostas destas formas, em função do nível de proteção, obedecendo ao método eletrogeométrico.
- Tabela 5.13** Características físicas de materiais típicos utilizados em componentes de SPDA.

- Tabela 5.14** Comparação do volume aproximado medido com o volume estimado por cálculo, dos danos na Telha nº 1.
- Tabela 5.15** Comparação do volume aproximado medido com o volume estimado por cálculo, dos danos na Telha nº 2.
- Tabela 5.16** Comparação do volume aproximado medido com o volume estimado por cálculo, dos danos na Telha nº 3.
- Tabela 5.17** Resultados dos ensaios no isolador sobre a telha e sobre uma chapa metálica
- Tabela 5.18** Parâmetros da função de Heidler que reproduzem uma corrente de retorno subsequente típica incidente, sem contaminação (sem efeito das reflexões).
- Tabela 5.19** Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Com resistência de aterramento de 10 Ω
- Tabela 5.20** Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Com a corrente propagando no ferro no ar
- Tabela 5.21** Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Estrutura mais complexa – Descidas simples
- Tabela 5.22** Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Estrutura mais complexa – Descidas composta por colunas com quatro condutores
- Tabela 5.22** Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Estrutura mais complexa – Descidas simples com a descarga atingindo o canto
- Tabela 6.1** Valores medidos da resistência elétrica antes da concretagem
- Tabela 6.2** Valores obtidos nas medições de resistência elétrica após a concretagem e cura do concreto
- Tabela 6.3** Impulsos de corrente no Corpo de Prova 01 – Emenda exotérmica
- Tabela 6.4** Impulsos de corrente no Corpo de Prova 02 – Emenda feita com arame torcido

Tabela 6.5	Impulsos de corrente no Corpo de Prova 03 – Emenda feita com luva
Tabela 6.6	Impulsos de corrente no Corpo de Prova 04 – Emenda feita com solda elétrica
Tabela 6.7	Impulsos de corrente no Corpo de Prova 05 – Sem emenda
Tabela 6.8	Valores da resistência elétrica medida após a aplicação dos impulsos de corrente
Tabela 6.9	Pulsos de Corrente Contínua – Corpo de prova 01
Tabela 6.10	Pulsos de Corrente Contínua – Corpo de prova 02
Tabela 6.11	Pulsos de Corrente Contínua – Corpo de prova 03
Tabela 6.12	Pulsos de Corrente Contínua – Corpo de prova 04
Tabela 6.13	Pulsos de Corrente Contínua – Corpo de prova 05
Tabela 6.14	Medição da resistência elétrica das emendas após a aplicação dos pulsos de corrente contínua
Tabela 6.15	Comparação entre os valores da resistência elétrica dos corpos de provas nas várias etapas.
Tabela 6.16	Resultados obtidos nas simulações realizadas
Tabela 7.1	Resultados obtidos nos ensaios de impulsos nas colunas de concreto
Tabela 7.2	Resultados dos ensaios para verificação da influência da umidade no concreto
Tabela 7.3	Resultados dos ensaios na haste de aço cobreada
Tabela A.1	Coeficientes utilizados para a simulação da descarga atmosférica
Tabela A.2	Valor máximo da tensão no SPDA em função da variação da corrente – Descarga atingindo o ponto central
Tabela A.3	Valor máximo da tensão no SPDA em função da variação da corrente – Descarga atingindo o canto
Tabela A.4	Valor máximo da tensão no SPDA em função da variação da corrente – Descarga atingindo o centro – Colunas com quatro condutores

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SPDA – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

LPZ – Lightning Protection Zone

LPL – Lightning Protection Level

LPS – Lightning Protection System

ESE – Early Streamer Emission

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos

SPD – Surge Protective Device

CDV – Committee Draft for Vote

IEC – International Electrotechnical Commission

NBR – Norma Brasileira

CIGRE – Conseil International des Grands Réseaux Électriques

LGEP – Laboratoire de Génie Électrique

SIPDA – Simpósio Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas

OPGW – Optical Fibre Ground Wire

IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers

ADSS – All-Dielectric Self Supporting

CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

IEE-USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo

TC – Technical Committee

ICLP – International Conference on Lightning Protection

EMTP – Electromagnetic Transients Program

EM – Eletromagnético

SPICE - Software Process Improvement and Capability Determination

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABNT/CB3 – Comitê Brasileiro de Eletricidade

NFPA – National Fire Protection Association

RSM – Rolling Sphere Method

SEGM – Simple Electro-Geometric Method

EGM – Electromagnetic Model

CVM – Collection Volume Method

FIM – Field Intensification Method

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

LPI – Lightning Protection International

DAS – Dissipation Array System

CTS – Charge Transfer System

GCC – Ground Current Collector

TVSS – Transient Voltage Surge Supression

BS – British Standart

DIN – Deutsches Institut fur Normung

VDE – Verbandes Deutscher Elektrotechniker

ASE – Association Suisse des Electriciens

MATLAB – MATrix LABoratory

LISTA DE SÍMBOLOS

i	Corrente do raio
I	Valor do pico da corrente
T_{longo}	Duração de uma corrente de raio longo
Q_{raio}	Carga de um raio múltiplo
Q_{curto}	Carga de um raio curto
Q_{longo}	Carga de um raio longo
W/R	Energia específica
dI/dt_{max}	Máxima taxa de variação da corrente
A.s.	Integral da corrente pelo tempo ou carga transferida
I²t	Integral da corrente ao quadrado pelo tempo ou ação integral
V	Tensão
R	Resistência
L	Indutância
Ω	Ohm
W	Watt
dB	Decibéis
C	Coulumb
A	Ampere
V_{50%}	Tensão disruptiva a 50%
JP	Corrente da descarga atmosférica (para simulação computacional)
Jx	Corrente que circula no laço x (para simulação computacional)

ϕ	Fluxo magnético
μ	Permeabilidade
Ψ_{BA}	Fluxo concatenado com o circuito B criado pelo circuito A
M	Indutância mútua
$\vec{B}$	Densidade de fluxo magnético (vetor de indução magnética)
β	Coefficiente de reflexão
α	Coefficiente de transmissão
Z	Impedância característica ou impedância de surto
ϵ	Constante dielétrica
R_{TT}	Resistência de aterramento com terrômetro

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	5
3 – ESTADO DA ARTE	7
3.1 - PRINCIPAIS DEFINIÇÕES UTILIZADAS NESTE TRABALHO E EM OUTROS CORRELATOS AO ASSUNTO	10
3.2 - CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	18
3.2.1 – Um pouco de história	18
3.2.2 – A formação das descargas atmosféricas	19
3.2.3 – Uma especial atenção ao raio longo	23
3.2.4 – Alguns trabalhos referentes às características das descargas atmosféricas (projetos de normas e trabalho publicado em revista)	25
3.3 - TRABALHOS REFERENTES AOS DANOS CAUSADOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRETAS	27

3.4 - TRABALHOS REFERENTES A BLINDAGENS, DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES NO SISTEMA DE PROTEÇÃO E TENSÕES INDUZIDAS EM EDIFÍCIOS ATINGIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	36
3.5 - TRABALHOS REFERENTES À NORMALIZAÇÃO DE PROTEÇÃO DE EDIFICAÇÕES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	43
3.6 - O PROCESSO DA JUNÇÃO (“ATTACHMENT”)	48
3.7 - A POLÊMICA DOS CAPTORES ESE	52
3.8 -OUTRAS POLÊMICAS ATUAIS REFERENTE AOS SUBSISTEMAS DE CAPTAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO	55
3.9 - O USO DE FERRAGENS DO CONCRETO ARMADO COMO PARTE INTEGRANTE DO SISTEMA DE PROTEÇÃO – PRINCIPAIS POLÊMICAS E O DIZEM AS PRINCIPAIS NORMAS	59
4. METODOLOGIA	62
5. O SUBSISTEMA DE CAPTAÇÃO	66
5.1 - VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS EM TELHAS METÁLICAS	67
5.1.1 – Procedimentos utilizados nas simulações laboratoriais	73
5.1.2 – Resultados obtidos nos ensaios de telhas metálicas com camada isolante de lã de rocha	76
5.1.2.1 – Ensaios realizados com corrente alternada a seco	76
5.1.2.2 – Ensaios realizados com corrente alternada, sendo o arco estabelecido no interior de uma camada de água	81
5.1.2.3 – Ensaios realizados com corrente contínua a seco	83

5.1.2.4 – Ensaaios realizados com corrente contínua, sendo o arco estabelecido no interior de uma camada de água	87
5.1.2.5 – Ensaaios realizados com impulso de corrente a seco	88
5.1.2.6 – Ensaaios realizados com impulso de corrente, sendo o arco estabelecido no interior de uma camada de água	90
5.1.3 - Ensaaios realizados em outros tipos de telha	91
5.1.3.1 – Ensaaios de impulso de corrente no painel preenchido com poliuretano (telha nº 2)	95
5.1.3.2 – Ensaaios com pulsos de corrente contínua no painel preenchido com poliuretano (telha nº 2)	97
5.1.3.3 – Ensaaios de impulso de corrente em telhas metálicas simples sem enchimento (telhas nº 3 e nº 4)	99
5.1.3.4 – Ensaaios com pulsos de corrente contínua e telhas metálicas simples sem enchimento	101
5.1.3.5 – Ensaio de pulsos de corrente contínua em terminais aéreos	104
5.1.3.6 – Verificação da variação de peso das telhas com isolamento térmicos, secas e molhadas	107
5.1.4 - Análise dos resultados	109
5.1.5 - Recomendações para proteção contra descargas atmosféricas de edificações com cobertura metálica	114
5.1.6 - Comparação e análise dos parâmetros verificados dos ensaios	117
5.1.7 - Análise dos danos devidos aos efeitos térmicos no ponto de impacto das descargas	121

5.1.7.1 – Ensaio realizado com pulsos de corrente contínua na Telha nº 1 (telha metálica com camada de lã de rocha)	124
5.1.7.2 – Ensaio realizado com pulsos de corrente contínua na Telha nº 2 (telha metálica com enchimento de poliuretano)	125
5.1.7.3 – Ensaio realizado com pulsos de corrente contínua na Telha nº 3 (telha metálica simples)	126
5.1.7.4 – Análise dos resultados obtidos no estudo dos danos devidos aos efeitos térmicos no ponto de impacto das descargas	127
5.2 - PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM EDIFICAÇÕES QUE UTILIZAM TELHAS DE CONCRETO PROTENDIDO PARA A SUA COBERTURA	128
5.2.1 – Ensaio de tensão de impulso atmosférico	128
5.2.2 – Comparação da tensão disruptiva de um isolador sobre a telha e sobre uma placa metálica	131
5.2.3 – Ensaio de impulso de corrente	132
5.2.4 – Análise dos resultados obtidos nos ensaios nas telhas de concreto protendido	135
5.2.5 – Recomendações especiais para projetos de proteção contra descargas atmosféricas para edificações com telhados de concreto protendido	135
5.2.5.1 – Edificações com até 60 metros de largura	135
5.2.5.2 – Edificações muito largas (100 a 200 metros de largura)	136
5.3 – VERIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE DESCARGA AO ATINGIREM AS EDIFICAÇÕES	137

5.3.1 –Cálculo de tensões em condutores de descidas, sem considerar reflexões	138
5.3.2 – Cálculo de tensões em condutores de descidas, considerando as reflexões	143
5.3.2.1 – Reflexão de ondas em junções – Considerações teóricas	143
5.3.2.2 – Reflexões e transmissões em junções tipo T	150
5.3.2.3 – Reflexões em sistemas de proteção de uma edificação	155
5.3.3 – Análise das simulações realizadas	166
5.3.3.1 – Análise das simulações realizadas na estrutura em forma de cubo	167
5.3.3.2 – Análise das simulações realizadas na estrutura com nove descidas e a descarga atingindo o centro	169
5.3.3.3 – Análise das simulações realizadas na estrutura com nove descidas e a descarga atingindo o canto	170
6. O SUBSISTEMA DE DESCIDA	171
6.1 – VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS REFERENTES AO SUBSISTEMA DE DESCIDA	171
6.1.1 – A utilização das ferragens como parte integrante do subsistema de descida	171
6.1.2 – Metodologia utilizada nesta verificação	176
6.1.3 – Resultados obtidos e valores aplicados nos ensaios	180
6.1.3.1 – Medição da resistência elétrica das emendas antes da concretagem das colunas	180

6.1.3.2 - Medição da resistência elétrica das emendas após da concretagem das colunas	181
6.1.3.3 – Impulsos de corrente	182
6.1.3.4 - Medição da resistência elétrica das emendas após a aplicação dos impulsos de corrente nas colunas	184
6.1.3.5 – Aplicação dos pulsos de corrente contínua	184
6.1.3.6 - Medição da resistência elétrica das emendas após a aplicação dos pulsos de corrente contínua nas colunas	186
6.1.4 – Análise dos resultados dos ensaios e medições	187
6.2 – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE COLUNAS DE EDIFICAÇÕES	196
6.3 – PRINCIPAIS VERIFICAÇÕES CONSTATADAS NESTE CAPÍTULO	198
7. O SUBSISTEMA DE ATERRAMENTO	199
7.1. – UTILIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO COMO SUBSISTEMA DE ATERRAMENTO	199
7.1.1 – Desenvolvimento experimental	201
7.1.2 – Impulso nas colunas de concreto	207
7.1.3 – Repetição dos impulsos nas colunas após penetração da umidade	208
7.1.4 – Impulsos nas hastes cobreadas	210
7.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	210
7.2.1 – Colunas de concreto	210
7.2.2 – Influência da penetração da umidade	212
7.2.3 – Impulsos nas hastes cobreadas	212

7.2.4 – Comparação entre os resultados obtidos nas colunas de concreto com as	
hastes cobreadas	213
7.3 – PRINCIPAIS VERIFICAÇÕES NOS ENSAIOS	213
8. CONCLUSÕES	216
Apêndice A – Determinação da distribuição de correntes e cálculo da tensão nos condutores	
de descida – Estudos iniciais, sem considerar os efeitos das reflexões	224
A.1– CÁLCULO DE INDUTÂNCIAS MÚTUAS	226
A.2– MODELO DA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA	
UTILIZADO	229
A.3 – CÁLCULOS NO MATLAB	231
A.4 – DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES NOS CONDUTORES DE	
DESCIDAS	232
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	242

O uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas – uma visão relativa aos danos físicos.

1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas ao atingirem edificações, linhas de transmissão de energia, telhados, aeronaves, árvores, torres, entre outros, podem ocasionar danos mecânicos em materiais, como quebra de concreto, rompimento de cabos-guarda de linhas de transmissão, furos ou queima de telhados e coberturas, danos em equipamentos eletroeletrônicos diversos e queima de florestas.

Hoje, com as modernas técnicas de detecção, medição e localização de descargas atmosféricas, têm-se um melhor conhecimento dos parâmetros dos raios, como amplitudes de corrente, formas de onda, cargas, polaridades, etc.

Um sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) de um edifício compõe-se basicamente de: um subsistema de captação, um subsistema de descidas, um subsistema de aterramento, (ver Figura 1), um subsistema de equipotencialização e definições de distâncias de segurança [1], [2]. O sistema responsável pela interceptação das descargas atmosféricas que iriam atingir a edificação é o subsistema de captação. As normas prevêm, entre outras, a utilização de componentes metálicos como, por exemplo, telhas metálicas, como parte integrante do sistema de proteção.

Figura 1 – Subsistemas de um SPDA

NOTA: As fotos e desenhos onde não estão citados os autores/fontes foram feitas pelo autor desta tese ou a pedido do mesmo, por algum funcionário do IEE-USP.

Este trabalho apresenta também alguns problemas que podem ocorrer em edificações que utilizam telhas de concreto protendido frente às descargas atmosféricas e apresenta formas de proteção para estes casos.

O subsistema de descidas tem como função conduzir a corrente da descarga, de forma “comportada”, ao subsistema de aterramento. “Comportada” significa conduzir a corrente de

descarga interceptada pelo subsistema de captação de forma que esta não danifique os condutores de descida, seus arredores e também não ocorram descargas disruptivas ao longo do sistema. Neste trabalho, a utilização de componentes da edificação, tais como as ferragens das colunas, são estudadas quando estas são usadas como subsistema de descidas.

O subsistema de aterramento tem como função escoar a corrente da descarga na terra. Neste trabalho, a utilização de elementos naturais componentes da edificação é estudada, tais como o uso dos baldrame e da fundação, como subsistema de aterramento.

Um dos motivadores para este estudo foi uma grande discussão ocorrida na comunidade técnica ligada à proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, realizada nas reuniões da Comissão de Estudos do Comitê Brasileiro de Eletricidade durante a revisão da atual norma brasileira sobre este assunto e do grupo de discussão virtual criado por esta comissão.

Várias discussões ocorreram nestes grupos, sendo que as principais polêmicas foram: a própria utilização das ferragens estruturais como parte integrante dos sistemas de proteção, os testes normalizados para verificação da continuidade de ferragens quando da utilização deste método em edificações existentes, a proteção dos caixilhos das janelas das edificações, a blindagem eletromagnética dos ambientes internos quando se utilizam as ferragens estruturais, a propagação de ondas trafegantes em vergalhões embutidos em concreto armado, o uso das ferragens nas normas internacionais, os métodos utilizados para dimensionamento da proteção (Franklin, Eletrogeométrico e Faraday), entre outros. Estas discussões foram, em grande parte, registradas através de trocas de correspondência eletrônica para todo o grupo, sendo que os textos técnicos gerados, se colocados em uma coletânea num único arquivo, produziriam um texto com mais de

500 páginas, considerando somente as correspondências do período de fevereiro de 2004 até julho de 2005. Alguns destes pontos polêmicos são estudados neste trabalho e diversas verificações experimentais e computacionais realizadas contribuem para a discussão, em alguns pontos, desmistificando alguns conceitos pré-concebidos.

São estas verificações experimentais e algumas verificações computacionais realizadas, as contribuições mais importantes deste trabalho, pois com estas, é possível se ter uma maior confiabilidade na execução e no projeto de proteção contra descargas atmosféricas.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar diversos aspectos inerentes à proteção contra descargas atmosféricas de edificações utilizando componentes naturais e partes estruturais das mesmas. É dada ênfase a eventuais danos físicos que as descargas possam ocasionar nas estruturas.

São estudados casos especiais, como a utilização de telhas metálicas como parte integrante do sistema de captação, e a proteção de edificações cobertas por telhas de concreto protendido.

O uso de pequenos terminais aéreos e sua forma construtiva também é estudado, através de verificações experimentais e cálculos utilizando o modelo eletrogeométrico.

A utilização das ferragens estruturais da edificação, nos sistemas de descida e de aterramento, é um capítulo importante deste estudo, assim como as simulações computacionais da distribuição da descarga atmosférica pelo sistema de descida e aterramento.

Este estudo também tem como objetivo, dar subsídios às normas de proteção de estruturas no sentido de definir parâmetros e medições a serem incluídos nas especificações referentes ao uso de partes estruturais das edificações como parte integrante do sistema de proteção.

Não é dada ênfase especial às blindagens ou cálculos de campos eletromagnéticos no interior das edificações que utilizam partes estruturais como integrante do sistema de proteção, mas sim aos danos físicos que as descargas podem provocar nas edificações, tais como, perfurações,

explosões, quebra de concreto, incêndio, penetração de chuva e umidade em lugares inadequados.

3 ESTADO DA ARTE

Vários tipos de trabalhos foram pesquisados para o levantamento do estado da arte. Um primeiro conjunto de trabalhos refere-se às características das descargas: os valores de crista das correntes de descargas atmosféricas mais frequentes, as formas de ondas das descargas, os vários parâmetros das descargas múltiplas e as características da corrente do raio longo que existe entre os raios curtos nas descargas múltiplas.

Muitos pesquisadores que estão estudando o fenômeno das descargas atmosféricas desenvolveram métodos de captura das descargas. Alguns utilizam pequenos foguetes com um fio condutor interligado à terra e por um sensor para medição da descarga [3] - ver Figuras 2 e 3 referente a experiências realizadas na Flórida – USA. Outros utilizam altas torres também interligadas à terra com um sistema de medição apropriado [4], [5], [6] - ver Figura 4 referente a experiências realizadas no IEE-USP, outros ainda utilizam sensores de campo magnético que localizam e estimam os parâmetros das descargas.

Figura 2 – Experiências com foguetes (Foto obtida no site: “<http://www.napa.ufl.edu/2002news/lightningrodph.htm>”)

Figura 3 – Descarga “trigada” (Foto obtida no site: “[http:// www.lightning.ece.ufl.edu/](http://www.lightning.ece.ufl.edu/)”)

Figura 4 – Detalhe da torre utilizada para medição de descargas atmosféricas

NOTA: As fotos e desenhos onde não estão citados os autores/fontes foram feitas pelo autor desta tese ou a pedido do mesmo, por algum funcionário do IEE-USP.

São abordadas também, resumidamente, as características das descargas atmosféricas, incluindo um pouco da história das descargas, o seu processo de formação, dando uma especial atenção à corrente do raio longo, pois esta é responsável por muitos danos físicos ocorridos graças às descargas.

Um outro conjunto de trabalhos descreve danos ocasionados pelas descargas diretas em sistemas de proteção, cabos pára-raios, estruturas metálicas, tanques metálicos, coberturas, edifícios, pessoas e animais.

Foram pesquisados também, trabalhos referentes às blindagens, distribuição de correntes no sistema de proteção e tensões induzidas em edifícios pelas descargas atmosféricas.

Um outro conjunto de trabalhos é apresentado, de forma resumida, referente à normalização de proteção de edificações contra descargas atmosféricas.

Ainda neste capítulo, alguns destaques especiais são dados ao processo de junção, aos captores tipo ESE, à polêmica dos subsistemas de Captação e à discussão sobre o uso das ferragens como parte integrante do SPDA.

Antes de citar e/ou resumir os principais trabalhos sobre o assunto em questão, a descrição de algumas definições mais utilizadas é muito importante, inclusive por não haver, em alguns casos, uma tradução consagrada para alguns termos muito utilizados pelos pesquisadores desta área. Assim, serão apresentadas, a seguir, algumas destas definições e seus correspondentes termos em inglês, para um melhor entendimento desta tese.

3.1 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES UTILIZADAS NESTE TRABALHO E EM OUTROS CORRELATOS AO ASSUNTO

- **Descarga atmosférica para terra** (“Lightning flash to earth”)

Descarga elétrica de origem atmosférica entre nuvem e terra, consistindo de um ou mais raios.

- **Descarga descendente** (“Downward flash”)

Raio iniciado por um líder descendente de uma nuvem para a terra. Uma descarga descendente consiste de um primeiro raio curto, que pode ser seguido por raios curtos subsequentes. Um ou mais raios curtos podem ser seguidos por um raio longo.

- **Descargas ascendentes** (“Upward flash”)

Descarga iniciada por um líder ascendente de uma estrutura aterrada para uma nuvem. Uma descarga ascendente consiste de um raio longo com ou sem raios curtos múltiplos superpostos. Um ou mais raios curtos podem ser seguidos por um raio longo.

- **Raio** (“Lightning stroke”)

Uma descarga elétrica singela de uma descarga atmosférica para a terra.

- **Raio curto** (“Short Stroke”)

Parte de uma descarga atmosférica para a terra que corresponde a um surto de corrente. Esta corrente tem um tempo para o meio valor, T_2 , tipicamente inferior a 2 ms.

- **Raio longo** (“Long Stroke”)

Parte de uma descarga atmosférica para terra que corresponde a uma corrente de continuidade. A duração, T_{longo} , (intervalo entre o valor 10% na frente, ao valor 10% na cauda) desta corrente de continuidade é tipicamente superior a 2 ms e menor que 1 s.

O termo “corrente de continuidade” (“continuing current”) foi definido na norma NBR 14586/2000 – Cabos pára-raios com fibras ópticas para linhas aéreas de transmissão (OPGW) – Determinação dos efeitos da descarga atmosférica – Método de ensaio [7], como sendo a corrente com forma de onda contínua, de longa duração e baixa amplitude, que pode ocorrer durante uma descarga atmosférica.

Neste trabalho iremos utilizar o termo “corrente de continuidade” para caracterizar a corrente do raio longo e de “pulsos de corrente contínua” para caracterizar a sua simulação em laboratório.

- **Raio múltiplo** (“Multiple stroke”)

Descarga atmosférica para a terra que consiste em média de 3 a 4 raios, com um intervalo de tempo típico, entre eles, de cerca de 50 ms (existem relatos de eventos que têm algumas dezenas de raios com intervalos entre eles entre 10 ms e 250 ms).

- **Ponto de Impacto** (“Point of strike”)

Ponto onde um raio atinge a terra, ou um objeto elevado (p.ex. estrutura, SPDA, serviços, árvore, etc).

Nota: Uma descarga atmosférica para a terra pode ter diversos pontos de impacto.

- **Corrente de raio (i)** (“Lightning Current”)

Corrente que flui no ponto de impacto. Unidade mais utilizada: kA.

- **Valor de pico (I)** (“Peak Value”)

Máximo valor da corrente de raio. Unidade mais utilizada: kA.

- **Inclinação média da corrente ascendente de um raio curto** (“Average Steepness of the short stroke current”)

Taxa média de variação da corrente e no intervalo entre os instantes em que são atingidos 10% e 90% do valor de pico. Unidade mais utilizada: kA/ μ s.

- **Tempo de frente de uma corrente de um raio curto – T_1** - (“Front time of short stroke current”)

Parâmetro virtual definido como 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes em que os valores da corrente estão em 10% e 90% do valor de pico. Unidade mais utilizada: μ s.

- **Origem virtual da corrente de um raio curto** (“Virtual origin of stroke current”)

Ponto de intersecção com o eixo de uma linha reta traçada através dos pontos de referência de 10% e 90% do valor de pico, ele precede por $0,1 T_1$ o instante no qual a corrente atinge 10% do seu valor de pico.

- **Tempo até o meio valor da corrente de um raio curto - T_2** - (“Time to half value of short stroke current”)

Parâmetro virtual definido como um intervalo de tempo entre a origem O_1 e o instante no qual a corrente decresceu à metade do valor de pico. Unidade mais utilizada: μs .

- **Duração de um raio múltiplo (T_{raio})** (“Flash duration”)

Intervalo de tempo durante o qual, a corrente do raio flui no ponto de impacto. Unidade mais utilizada: μs .

- **Duração de uma corrente de raio longo (T_{longo})** (“Duration of long stroke current”)

Intervalo de tempo durante o qual, a corrente em um raio longo permanece entre 10% do valor de pico, durante o crescimento da corrente de continuidade, e 10% do valor de pico durante o decréscimo da corrente de continuidade. Unidade mais utilizada: ms.

- **Carga de um raio múltiplo (Q_{raio})** (“Flash Charge”)

Integral da corrente no tempo total do raio múltiplo. Unidade mais utilizada: C.

- **Carga de um raio curto (Q_{curto})** (“Short stroke charge”)

Integral de corrente no tempo total do raio curto.

NOTA: Para valores especificados de carga, utilizaremos neste trabalho a unidade C (Coulombs); para valores de ensaios, no caso do raio curto, a carga é calculada através da integral da corrente medida pelo tempo de aplicação sem considerar eventuais reversões ou oscilações, utilizaremos a unidade A.s.

- **Carga de um raio longo (Q_{longo})** (“Long stroke charge”)

Integral da corrente no tempo total do raio longo.

NOTA: Para valores especificados de carga, utilizaremos neste trabalho a unidade C (Coulombs); para valores de ensaios, no caso do raio longo, a carga é calculada através da multiplicação da corrente eficaz medida pelo tempo de aplicação, utilizaremos a unidade A.s.

- **Energia Específica (W/ R)** (“Specific energy”)

Integral da corrente ao quadrado (I^2t) do raio para a duração total do raio múltiplo; ela representa a energia dissipada pela corrente do raio em uma resistência unitária. Unidade mais utilizada: $A^2.s$.

- **Energia específica de um raio curto** (“Specific energy of short stroke current”)

Integral da corrente ao quadrado (I^2t) para a duração de um raio curto. Unidade mais utilizada: $A^2.s$.

- **Sistema Elétrico** (“Electrical System”)

Sistema incluindo componentes, fontes de alimentação de baixa tensão e provavelmente, componentes eletrônicos também.

- **Sistema Eletrônico** (“Electronic System”)

Sistema incluindo componentes eletrônicos sensíveis, tais como equipamentos de tecnologia de informação (ETI), sistemas de instrumentação e controle, sistemas de rádio, instalações de eletrônica de potência.

- **Sistema interno** (“Internal system”)

Sistemas elétrico e eletrônico dentro de uma estrutura.

- **Danos Físicos** (“Physical damage”)

Danos a uma estrutura ou ao seu conteúdo, devido aos efeitos mecânicos, térmicos, químicos e explosivos da descarga atmosférica.

- **Falha do sistema elétrico e eletrônico** (“Failure of electrical and electronic system”)

Danos permanentes do sistema elétrico e eletrônico, devido aos efeitos eletromagnéticos das descargas atmosféricas.

- **Zona de proteção das descargas atmosféricas** (“Lightning Protection Zone – LPZ”)

Zona onde o ambiente eletromagnético das descargas atmosféricas é definido.

- **Nível de proteção das descargas atmosféricas** (“Lightning Protection Level – LPL”)

Número relacionado a um conjunto de valores dos parâmetros das descargas relacionados à probabilidade de que os valores máximos e mínimos utilizados nos projetos, não excedam às ocorrências naturais das descargas atmosféricas.

- **Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas – SPDA** (“Lightning Protection System – LPS”)

Sistema completo utilizado para reduzir danos físicos devidos às descargas atmosféricas a sua estrutura. Ele consiste nos sistemas interno e externo de proteção contra descargas atmosféricas.

- **Sistema Externo de Proteção contra Descargas Atmosféricas** (“External lightning protection system”)

A parte do SPDA, que consiste de um subsistema de captação, um subsistema de descidas e um subsistema de aterramento.

- **Sistema Interno de Proteção contra Descargas Atmosféricas** (“Internal lightning protection system”)

A parte do SPDA, que consiste do sistema de ligação equipotencial para descarga atmosférica e da aplicação das distâncias de separação, de uma estrutura a ser protegida.

- **Subsistema de Captação** (“Air-termination system”)

A parte do SPDA externo, que utiliza elementos metálicos como hastes, malha de condutores ou cabos, que tem a intenção de interceptar as descargas atmosféricas.

- **Subsistema de Descidas** (“Down-conductor system”)

A parte do SPDA externo, que tem a intenção de conduzir a corrente das descargas atmosféricas do subsistema de captação ao subsistema de aterramento.

- **Subsistema de Aterramento** (“Earth-termination system”)

A parte do SPDA externo, que tem a intenção de conduzir e dispersar a corrente das descargas atmosféricas dentro do solo.

- **Partes Condutivas Externas** (“External conductive parts”)

Itens metálicos que entram ou saem da estrutura a ser protegida, como as tubulações, cabos metálicos, dutos metálicos, etc., os quais podem conduzir uma parte da corrente das descargas atmosféricas.

- **Sistema de ligação equipotencial para descargas atmosféricas** (“Lightning equipotential bonding”)

Ligações do SPDA de partes metálicas separadas, através de conexões condutoras diretas ou de dispositivos de proteção contra surto, para reduzir diferenças de potencial causadas pelas correntes das descargas atmosféricas.

- **Condutores de Blindagem** (“Shielding Wire”)

Condutores metálicos utilizados para reduzir danos físicos devido às descargas atmosféricas, a um serviço.

- **Blindagem Magnética** (“Magnetic Shield”)

Grade metálica fechada ou tela contínua que envolve o objeto a ser protegido, ou parte dele, para reduzirem falhas dos sistemas elétricos ou eletrônicos.

- **Dispositivo de Proteção Contra Surto - DPS** (“Surge Protective Device – SPD”)

Dispositivo que tem a intenção de limitar as sobretensões transitórias e de desviar as correntes de surto. Contém, no mínimo, um componente não linear.

- **Sistema de Dispositivo de Proteção contra Surtos** (“Surge Protective Devices System”)

Conjunto de dispositivos de proteção contra surtos, selecionados, coordenados e posicionados, de forma apropriada, utilizados para reduzirem falhas dos sistemas elétrico e eletrônico.

- **Tensão Suportável Nominal de Impulso** (“Rated impulse withstand voltage”)

Tensão suportável de impulso, designado pelo fabricante, a um equipamento ou parte dele, caracterizando a capacidade de suportabilidade especificada da sua isolação contra sobretensões.

Unidade mais utilizada: kV.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.2.1 Um pouco de história

Raios, trovões, enfim, as descargas atmosféricas sempre impressionaram a humanidade, seja impondo respeito ou medo [8]. Desde remotas épocas, milhares de anos antes de Cristo, há indícios deste respeito/medo, através das estátuas de Buda carregando “flechas” de raios, ou no antigo Egito, do deus Typhon (Seta) “atirando” seus raios. Há ainda citações com evidências antigas na Índia (Indra, filho do Céu e da Terra), na Grécia (Zeus, pai dos deuses), na Roma antiga (Júpiter, o deus chefe), e, o mais famoso relacionado com raios, o deus Thor, dos

nórdicos. Assim, por muitos séculos, os raios foram símbolos de poder e vários deuses os utilizavam para castigar os maus e pecadores [9].

3.2.2 A formação das descargas atmosféricas

Existem quatro categorias de descargas atmosféricas: a iniciada pelo líder descendente com cargas negativas (a mais comum), a iniciada pelo líder ascendente com cargas positivas, a descendente com cargas positivas e a ascendente com cargas negativas. As descargas iniciadas por líder ascendente são também conhecidas como descargas terra-nuvem.

Para entender melhor o fenômeno e os principais termos utilizados, vamos descrever passo-a-passo, a formação da maioria das descargas atmosféricas do tipo negativa, que ocorrem da nuvem para a terra.

Para ocorrer a descarga atmosférica, é necessário que a nuvem esteja bastante carregada com cargas positivas e negativas, sendo que estas se localizam, geralmente, em maior número, na parte inferior da nuvem. Existem algumas teorias para a explicação dos processos de eletrificação das nuvens, sendo duas as mais conhecidas e aceitas: a teoria da precipitação e a teoria da convecção. Segundo Uman [8], as duas teorias poderiam muito bem fazer parte do processo de eletrificação da nuvem, mas o seu livro explica os dois processos separadamente.

Na teoria da precipitação, as partículas pesadas, que descem na nuvem, interagem com as partículas mais leves que são carregadas para cima. Nesta interação, as partículas pesadas são carregadas negativamente e as mais leves positivamente, sendo que, após isto, devido à gravidade e as correntes de ar ascendentes, há uma separação das cargas formando um dipolo. Uma transferência de carga pode acontecer devido a colisões, em que duas partículas inicialmente não carregadas, após a colisão, podem ficar carregadas, de forma oposta (uma

positiva e outra negativa). Esta transferência também pode acontecer por indução, isto é, duas partículas não carregadas, mas eletricamente polarizadas devido ao campo ambiente, colidem, de forma que a partícula menor absorve a carga da parte inferior da partícula maior e mais pesada, quando a menor se movimenta para cima.

Na teoria da eletrificação por convecção, a carga que foi acumulada perto da superfície da Terra ou sobre regiões de condutividade variável do ar e da nuvem, incluindo a camada das vizinhanças da nuvem, é movimentada em um grande volume pelo fluxo de ar associado às tempestades para os locais mencionados. Esta teoria, segundo Uman, possui alguns adeptos (Grenet [10], [11], Vonnegut [12], Wagner e Telford [13]), porém ainda tem algumas controvérsias (Magono [14], Williams [15]).

Uma vez carregada, a nuvem com muitas dezenas de coulombs (cargas positivas e negativas), estaria em um ambiente propício para ocorrência das descargas atmosféricas.

Uman chama de descarga preliminar (“preliminary breakdown”), a descarga dentro da nuvem, geralmente, na parte mais baixa, que ocorre entre a região das cargas negativas e as poucas cargas positivas próximas. Não existe ainda um consenso entre os pesquisadores sobre a forma e localização deste processo, mas esta descarga preliminar ajusta o estágio para que as cargas negativas se direcionem para baixo em direção à terra, iniciando o líder (“stepped leader”).

O líder tem, geralmente, passos de duração aproximada de $1\mu\text{s}$ e comprimento de dezenas de metros, tendo uma pausa entre os passos de aproximadamente $50\mu\text{s}$. O líder, na sua fase praticamente completa, direciona para a terra uma carga negativa de até 10 C ou mais, isto em um tempo de dezenas de milisegundos, com uma velocidade de descida média de aproximadamente 2×10^5 m/s. Em termos de correntes, o líder fica na faixa de 100 a 1000 A. Os passos possuem pulsos de correntes, de pelo menos, 1000A. Visualmente falando, o líder poderia ser descrito como relâmpagos incompletos (ramos de luz) em direção à terra.

Quando a extremidade do líder se aproxima da terra, o campo elétrico em objetos pontiagudos na terra, ou em irregularidades no solo, ao se atingir altos valores que excedam a rigidez dielétrica do ar nas redondezas, uma ou mais descargas ascendentes podem acontecer nestes pontos, unindo-se ao líder descendente. Este é o início do processo chamado junção (“attachment”). Assim, quando uma das descargas ascendentes da terra contacta o líder descendente, a ponta deste é conectada ao potencial de terra. O canal do líder é, então, descarregado, quando uma onda com o potencial de terra, chamada de primeira descarga de retorno (“first return stroke”), se propaga continuamente para cima no caminho previamente ionizado e carregado pelo líder.

A descarga de retorno é o mais importante componente da descarga atmosférica. Conhecer seus parâmetros é fundamental para os estudos de proteção, tanto de edificações, como de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica e de equipamentos elétricos. Em relação à velocidade de propagação, ela é maior perto do solo (aproximadamente $1/3$, ou um pouco mais, da velocidade da luz) e diminui com a altura. Geralmente, o tempo de trânsito da terra até o topo do canal é da ordem de $100\mu\text{s}$. A primeira descarga de retorno atinge correntes de pico de, aproximadamente, 30 kA, perto do solo, com um tempo de frente de onda de poucos microsegundos e tempo de cauda (tempo até o meio valor) de aproximadamente 50 μs . O desenvolvimento rápido de energia da descarga de retorno aquece o canal do líder a temperaturas próximas a 30.000K, o que gera uma alta pressão no canal, que se expande, e cria uma onda de choque que, na maioria das vezes, se escuta na forma de trovão. Após a descarga de retorno, a corrente pode cessar e o fenômeno completo pode terminar, neste caso, a descarga é chamada de raio simples (“single stroke flash”). No entanto, se houver ainda cargas adicionais no topo do canal, um contínuo, “dart leader”, pode propagar para baixo no canal residual da descarga de retorno, na velocidade de 3×10^6 m/s. Ainda, entre o fim da descarga de retorno e o início do “dart leader”, “os processos J e K” ocorrem na nuvem. De uma forma bastante resumida, pois,

Uman [8] dedica um capítulo de seu livro para cada componente da descarga, o “dart leader” é, geralmente, o responsável pelo início das descargas de retorno subseqüentes à primeira, em uma descarga atmosférica para a terra, depositando cargas no canal da corrente, de maneira a manter este canal em um potencial alto em relação ao da terra, ajustando o estágio para uma descarga de retorno subseqüente. O “processo J”, nas descargas para a terra, é identificado com um campo elétrico, tendo uma variação relativamente linear em uma escala de tempo de dezenas de milisegundos. O “processo K” é geralmente visto como uma “descarga recuante”, ou uma pequena descarga de retorno que ocorre, quando a descarga propagando dentro da nuvem, encontra com um pacote de cargas opostas às suas. Ainda há controvérsias se estes processos estão necessariamente relacionados com o início do “dart leader”. Este conduz para baixo uma carga da ordem de 1 C e uma corrente de aproximadamente 1 kA. Este líder inicia uma segunda descarga de retorno, ou outras, subseqüentes. Os “dart leaders” e as descargas de retorno subseqüentes geralmente não são ramificadas.

O tempo entre sucessivas descargas de retorno é, geralmente, de várias dezenas de milisegundos, mas pode ser décimos de segundo, se uma corrente de continuidade (“continuing current”) percorre o canal depois da descarga de retorno. As amplitudes da corrente de continuidade são da ordem de 100A e representam uma transferência de cargas da nuvem para a terra. A mudança típica do campo elétrico produzido pela corrente de continuidade é linear, para aproximadamente 0,1 segundos, e é consistente com a condução de aproximadamente 10 C de carga da nuvem para o solo. Entre um quarto e metade de todas as descargas nuvem-terra contêm a componente de corrente de continuidade.

Todos estes componentes da descarga atmosférica podem atuar nos eventuais danos causados por elas ao atingirem determinados pontos na terra.

3.2.3 Uma especial atenção ao raio longo

Grande parte das descargas atmosféricas possui raios curtos e longos, sendo que estes possuem geralmente uma carga relativamente alta, que muitas vezes é apontada como a principal responsável pelos danos, do tipo destrutivo, ocasionados pelas descargas atmosféricas.

Na literatura [8], há citações que a corrente é da ordem de 1000 A, e a duração da ordem de 1 ms para este parâmetro que pode fluir após a corrente de retorno. Em 1952, Hagenguth e Anderson [16] observaram esta componente de corrente, em medições realizadas no Empire State Building, a qual chamou de corrente intermediária (“intermediate current”). Um canal de corrente na faixa de 100 A, que algumas vezes, segue a corrente intermediária, é chamada de corrente de continuidade, embora uma distinção entre a corrente intermediária e uma corrente de continuidade relativamente curta, provavelmente, não tenha base física. Em 1962, Kitagawa e Brook [17] subdividiram a corrente de continuidade das descargas negativas nuvem-terra, em duas classes: as longas com duração ultrapassando 40 ms, e as curtas com durações inferiores a 40 ms. Estes mesmos pesquisadores, neste mesmo ano, introduziram ainda duas definições que são utilizadas freqüentemente na literatura: descarga híbrida, que contém no mínimo uma componente de corrente de continuidade longa, e descarga discreta, sem esta componente longa, porém podendo conter componentes curtas.

Nas descargas nuvem-terra negativas, as correntes de continuidade são muito importantes, uma vez que a maioria destas descargas possui, no mínimo, uma corrente de continuidade curta ou longa e, aproximadamente, 50% de todas as descargas contém um componente de continuidade longo, sendo que estas descargas transferem para a terra, aproximadamente, duas vezes mais cargas que as descargas sem esta componente. Sob o ponto de vista prático, o efeito da corrente de continuidade em objetos atingidos por uma descarga atmosférica é o de causar sérios danos

relativos ao aquecimento, como furos em superfícies metálicas de aeronaves e coberturas, e incêndios em florestas.

As correntes de continuidade têm sido medidas diretamente nas descargas que atingem torres apropriadas para isto e, também estimadas, através de medições remotas de campos eletromagnéticos gerados pelas descargas. Muitos pesquisadores têm se dedicado na determinação das correntes de continuidade. Até os estudos de Krehbiel [18] e outros em 1979, muitas determinações, utilizando medições de campo assumiam que o canal das cargas era vertical. Estes estudos observaram que as cargas da corrente de continuidade se distribuem horizontalmente na nuvem, assim muitos cálculos foram feitos com erros. De qualquer forma, há indicações de durações para a corrente de continuidade de até 500 ms, com média de 150 ms (Brook [19] e outros em 1962) e média de 184 ms nas medições de Williams e Brook [20] em 1963. Em relação ao nível das correntes de continuidade, há relatos de faixa de 38 a 130 A (Brook [19] – 1962), média de 184 A para 14 medições de Williams e Brook [20] (1963), faixa de 50 a 580 A (Krehbiel [18] 1979), faixa de 100 a 300 A (medições diretas) de Berger e Vogelsanger [21] em 1965. Em relação às cargas, estas estão de 3,4 a 31,2 C com média de 12 C nas medições de Brook e Kitagawa [17], média de 31 C nas medições de Williams e Brook [19] e faixa de 25 C a 80 C, nas medições de Berger e Vogelsanger [21].

O componente M é o nome dado ao aumento na luminosidade do canal, acompanhado por uma rápida variação do campo elétrico (mudança de campo elétrico M). Em trabalhos publicados em 1962, Kitagawa [17] e outros mostraram que as mudanças de campo M ocorrem durante correntes de continuidade curtas e longas.

3.2.4 Alguns trabalhos referentes às características das descargas atmosféricas (projetos de normas e trabalho publicado em revista)

Um trabalho bastante atual, realizado pelos grandes pesquisadores internacionais em proteção contra descargas atmosféricas, é o projeto de norma da IEC, o “Draft 81/216/CDV” [22], que dará origem à norma IEC 62305-1: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 1 – Princípios Gerais. Este projeto está sendo utilizado como base para a revisão da norma brasileira, a NBR 5419 [23], que teve início em julho de 2005. Em relação às características das descargas atmosféricas, este projeto descreve em quatro grandes anexos, os diversos parâmetros das correntes das descargas. O anexo A, de caráter informativo, descreve os principais parâmetros das correntes das descargas atmosféricas, citando as descargas para a terra, descendentes e ascendentes, os raios curtos e longos e suas durações. Apresenta uma tabela com os valores dos parâmetros obtidos dos trabalhos da CIGRE [24], [25], fixa os parâmetros máximos e mínimos das correntes das descargas para o nível de proteção I, mostrando que os efeitos mecânicos estão mais relacionados com o valor de pico da corrente e com a energia específica, do que os efeitos térmicos, que estão mais relacionados com a energia específica, quando está envolvida a um acoplamento resistivo, e à carga quando arcos acontecem na instalação. O anexo B, também de caráter informativo, apresenta a equação da corrente do raio, em função do tempo, para efeito de análises. O anexo C apresenta a simulação da corrente do raio com finalidade para ensaios. Neste anexo, são apresentados os parâmetros de ensaios, para simulação da energia específica do primeiro raio curto e da carga do raio longo, para a simulação da inclinação da corrente ascendente dos raios curtos e apresenta exemplos de geradores de ensaio para estas simulações. O anexo D apresenta os parâmetros de ensaio para simular os efeitos dos raios sobre componentes do SPDA. Entre estes parâmetros, são apresentados os mais relevantes para o

ponto de impacto, a avaliação da distribuição da corrente no sistema de proteção, os efeitos das correntes que podem causar possíveis danos, tais como, os efeitos térmicos, o aquecimento por efeito Joule, os danos térmicos no ponto de impacto, os efeitos mecânicos (interação magnética, forças eletrodinâmicas e seus efeitos, danos da onda de choque acústico), os efeitos combinados, e as descargas disruptivas que podem ocorrer devido aos raios. Para cada componente do SPDA, apresenta os problemas relevantes e os parâmetros de ensaio, e para os dispositivos de proteção de surtos, apresenta os parâmetros para os dispositivos com “gaps” e os com varistores de óxido metálico.

Enfim, esta norma, quando for publicada, será muito mais abrangente do que a atual, sendo bastante completa sobre o assunto de proteção contra descargas atmosféricas, não somente das estruturas, mas também dos sistemas, componentes, e até dos seres vivos.

Um trabalho desenvolvido no “Laboratoire de Génie Électrique de Paris (LGEP)” e na “Aerospatiale – Centre de Recherche Louis-Blériot” [26], apresenta como forma de onda normalizada de uma descarga atmosférica, uma corrente em forma de arco elétrico possuindo quatro componentes: um primeiro componente sendo um pulso de corrente com alta amplitude (da ordem de $200\text{kA} \pm 10\%$) e duração curta (inferior a $500\mu\text{s}$); o segundo componente com carga máxima de 10 C e intensidade média de corrente de $2\text{ kA} \pm 10\%$; o terceiro componente com carga máxima de $200\text{ C} \pm 20\%$ e intensidade média de corrente entre 200 e 800 A ; e o quarto componente sendo um outro pulso de corrente com amplitude máxima de $100\text{ kA} \pm 10\%$ e duração inferior a $500\mu\text{s}$. Este trabalho, que estuda os efeitos da descarga atmosférica nas estruturas das aeronaves, verifica o comportamento do aquecimento das folhas metálicas das aeronaves sob a ação de arcos elétricos móveis. Para isso, é utilizado um modelamento em 2D e 3D do fenômeno térmico que ocorre nos eletrodos, para estudar a influência da velocidade do

arco, da potência e da densidade de potência na superfície através do arco no aquecimento dos eletrodos.

3.3 TRABALHOS REFERENTES AOS DANOS CAUSADOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRETAS

Rakov e Uman descrevem muito bem os mecanismos básicos que regem os danos devidos às descargas atmosféricas no seu livro “Lightning – Physics and Effects” [27]. Resumidamente, descrevem que o tipo e a extensão dos danos devido às descargas atmosféricas que um objeto pode sofrer, dependem das características das descargas atmosféricas e das propriedades do objeto. As características físicas de maiores interesses são as várias propriedades relacionadas a forma de onda das correntes e dos campos eletromagnéticos oriundos das descargas, principalmente, na faixa de radio frequência. Danos podem ocorrer devido às radiações eletromagnéticas em outras faixas de frequência e também das ondas de choque acústicas. Quatro propriedades distintas das formas de ondas das correntes das descargas são consideradas importantes na ocorrência de danos: o pico da corrente (I); a máxima taxa de variação da corrente ($dI/dt \text{ max}$); a integral da corrente pelo tempo, ou seja, a carga transferida (C), e a integral da corrente ao quadrado pelo tempo, a qual os autores chamam de “ação integral” (I^2t). O parâmetro “pico da corrente” é particularmente importante nos casos de objetos ou sistemas que apresentam impedâncias essencialmente resistivas, tais como, em determinadas condições, hastes de aterramento, longas linhas de potência, ou mesmo árvores, onde a tensão V no objeto ou sistema em relação a um aterramento remoto será proporcional à corrente via a Lei de Ohm ($V=RI$), com R sendo a resistência efetiva no ponto de impacto da descarga. Assim, como exemplo, uma corrente de pico de 30kA injetada em um condutor de fase de uma linha de

potência com uma impedância característica de 500Ω (sendo que a resistência efetiva seria 250Ω , uma vez que os 500Ω seriam vistos em cada direção), produz uma tensão na linha de 7,5 MV em relação ao terra. Esta tensão pode levar a uma descarga elétrica entre fases, ou entre a fase atingida e o neutro ou a terra, através de materiais isolantes, ou através do ar. O parâmetro “máxima taxa de variação da corrente” é particularmente importante nos casos de objetos que apresentam impedância essencialmente indutiva, como em determinadas condições, fiações em um sistema eletrônico, onde o pico da tensão será proporcional à máxima taxa de variação da corrente de descarga ($V = L \, dI/dt$, onde L é a indutância por comprimento da fiação, e V é a diferença de tensão entre as duas pontas da fiação). O parâmetro “carga transferida” está ligado à severidade do aquecimento, ou queima e perfurações de chapas metálicas, sejam estas utilizadas em superfícies de aeronaves, ou em coberturas metálicas de edificações. Estes tipos de danos são proporcionais à carga transferida pelas descargas atmosféricas que, por sua vez, é proporcional à energia transmitida à superfície metálica. Geralmente, a transferência de grandes cargas é devido às descargas de longa duração (dezenas a centenas de ms) como as correntes de continuidade, cuja magnitude é da ordem de dezenas a centenas de ampéres, diferentemente das correntes de retorno, que possuem valores maiores, mas durações bem menores, produzindo assim, menores transferências de cargas. O parâmetro “ação integral” é, em uma primeira aproximação, o responsável pelo aquecimento e fusão de materiais resistivos, os quais podem ser ou não, bons condutores, e também pela explosão de materiais condutores fracos. O valor da ação integral é a integral de Joule no tempo no caso da resistência (R) igual a um Ohm. Desta maneira, a ação integral é a medida da habilidade da corrente de descarga de gerar calor, em um objeto atingido caracterizado pela resistência R . Por volta de 5% das descargas de retorno negativas nuvem-terra possuem ação integral excedendo $5,5 \times 10^5 \text{ A}^2\text{s}$ e aproximadamente 5% das positivas possuem ação integral excedendo $10^7 \text{ A}^2\text{s}$. No caso da maioria dos materiais, que possuem uma baixa

condutividade, este calor vaporiza o material interno e a pressão do gás resultante pode causar uma rachadura explosiva. Somando-se aos efeitos de aquecimento, a ação integral é também uma medida de alguns efeitos mecânicos, tais como o esmagamento de tubos metálicos condutores de descargas atmosféricas. Este efeito é função da força instantânea, a qual é proporcional ao quadrado da corrente e da duração da aplicação da força.

O projeto de norma da IEC, o “Draft 81/216/CDV” [22], também descreve, no seu capítulo 5 (Danos devidos às descargas atmosféricas), os danos às estruturas, incluindo os efeitos das descargas nestas, as fontes e tipos de danos que podem ocorrer, classificando-os em função da posição do ponto de impacto relativo à estrutura. Descreve também os danos aos serviços (linhas e tubulações de energia e telecomunicações, por exemplo), incluindo os efeitos, fontes e tipos de danos, classificando-os em função da posição do ponto de impacto relativo ao serviço considerado. Além disto, o projeto apresenta os tipos de perdas considerando as perdas de vida humana, de serviços públicos, de patrimônio cultural e de valores econômicos.

O Prof. Chisholm, em trabalho apresentado no VI International Symposium on Lightning Protection (VI SIPDA), em Santos, S.P., em novembro de 2001 [28], enfatizou, principalmente, três aspectos da proteção contra descargas atmosféricas dos cabos OPGW (OPTical-fibre Ground Wire): a) os métodos de ensaio para reprodução de danos observados devido às descargas diretas aos OPGW estão convergindo (porém necessitam de mais desenvolvimentos); b) a aplicação de OPGW abaixo dos condutores de fase é mostrada para aumentar a confiabilidade da linha em relação às descargas (inclusive aspectos econômicos); e c) a coordenação da proteção da linha de alta tensão com os circuitos de baixa tensão para os acessórios de OPGW é considerada para a definição dos requisitos de supressores de surtos.

Os OPGW são, geralmente, cabos-guarda com fibras ópticas que podem ser utilizadas para diversas finalidades. Aspectos das normas e ensaios de descargas diretas foram analisados neste trabalho, principalmente, no tocante aos danos causados pelas descargas e quais os tipos de onda devem ser utilizados em laboratórios para a simulação destes danos. Observações no campo em relação aos danos, estudos probabilísticos sobre a incidência de descargas diretas, critérios de falhas e danos, valores de pico de corrente de descarga, cargas totais e os parâmetros para ensaios das descargas são analisados, assim como, é apresentado o método de ensaio proposto pelo IEEE [29].

A aplicação de OPGW abaixo dos condutores de fase pode ser uma opção como um cabo redundante, sendo aplicado em conjunto com um outro cabo e eliminando a exposição do OPGW às descargas diretas. Foram apresentadas performances típicas de utilizações, em Ontário, que mostram uma menor taxa de desligamento das linhas com esta utilização.

A coordenação da proteção da linha de alta tensão com os circuitos de baixa tensão para os acessórios de OPGW é considerada, para a definição dos requisitos de supressores de surtos. Com o aumento do uso dos cabos OPGW, foram necessários muitos novos equipamentos, como repetidores, roteadores e outros dispositivos eletrônicos que são alimentados por um sistema de baixa tensão. Vários aspectos foram analisados, como o isolamento dos setores dos fios de aterramentos aéreos; divisores de potencial eletrostáticos; painéis solares; divisores resistivos de alta impedância e fontes de potência externas.

Como principais conclusões deste trabalho, o autor enfatizou que os métodos e parâmetros de ensaios para reprodução dos danos observados nos OPGW necessitam de um refinamento. Acredita que parte dos testes descritos na IEC [30], especificamente as componentes B e C das descargas, podem ser efetivos. Tem sido recomendado que a IEEE St 1138 [29] adote este método de ensaio, pois é uma maneira razoável de estimar os parâmetros de ensaios necessários

como uma função do comprimento da linha e da exposição às descargas. Sobre o uso de OPGW abaixo dos condutores de fase, este pode ser competitivo com a instalação do tipo ADSS (All-Dielectric Self Supporting), especialmente se é desejável uma significativa melhoria na taxa de descarga de retorno (backflashover). Conclui ainda que existem muitas opções para o fornecimento de energia para os dispositivos ópticos, que requerem menos que 100 W para a sua alimentação, e esta pode ser obtida da própria linha de transmissão, não se esquecendo dos dispositivos de proteção contra surtos que devem estar de acordo com as recomendações da IEC [31].

O trabalho [32], desenvolvido por Furnas Centrais Elétricas S.A. e pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), apresenta um estudo dos acidentes ocorridos e danos devido às descargas atmosféricas nos cabos OPGW das linhas de transmissão de Furnas e analisa os resultados de vários ensaios realizados em diversos cabos (convencionais e OPGW). Deste estudo, Furnas estabeleceu o seu critério de aceitação para cabos OPGW. Na parte experimental foram utilizadas as quatro classes de ensaios previstos na norma brasileira, NBR 14586 [7], que para efeito de danos em cabos deste tipo, considera apenas a corrente de continuidade (termo utilizado pela norma brasileira de cabos para raios com fibras ópticas, para especificar a componente contínua de baixa amplitude e longa duração da descarga atmosférica). Ao contrário da norma, que prevê somente a descarga descendente de polaridade positiva, os ensaios foram realizados nas duas polaridades.

O trabalho [33], de Claude Franck Loewenthal, mostra também a importância da corrente de continuidade nos danos dos cabos OPGW atingidos por descargas atmosféricas. Este trabalho, após apresentar características dos cabos pára-raios convencionais e dos diversos tipos de cabos

OPGW, mostra algumas falhas detectadas nos cabos devido às descargas e também os resultados de ensaios realizados nos dois tipos de cabos. Este estudo deu base para o grupo de estudos, responsável pela normalização dos ensaios em cabos OPGW, definirem as diretrizes da norma NBR 14586/2000: Cabos pára-raios com fibras ópticas para linhas aéreas de transmissão (OPGW) – Determinação dos efeitos da descarga atmosférica – Método de ensaio [7].

Dentro deste grupo de trabalhos, a utilização das telhas metálicas como parte integrante do sistema de captação de descargas atmosféricas é muito importante, principalmente na análise de danos verificados devido às descargas como também na eficácia da utilização desta técnica na proteção externa das edificações [34], [35], [36] e [37].

As telhas metálicas instaladas sobre estruturas também metálicas podem ser usadas como captadores, porém apresentam o risco de perfuração se a espessura for inferior a 2,5mm (IEC-61024-1) [1].

Nos casos em que é utilizada telha de única chapa, em geral o risco se resume à formação de goteiras que podem ser facilmente corrigidas.

Na maioria das grandes instalações industriais são utilizadas telhas com duas chapas com isolamento térmica entre elas (com porosidade entre 10 e 5%) não sendo detectado nenhum risco adicional com a entrada de água. Porém, quando o isolante térmico é uma manta de fibra de vidro ou lã de rocha, há o risco da entrada de água, e esta de encharcar a manta e aumentar o peso da telha. Em dois casos, ocorridos no Brasil, a elevação do peso da telha causou o colapso da estrutura que era do tipo espacial com tubos de alumínio.

Dois outros tipos de problemas já foram relatados e preocupam os projetistas na utilização das telhas metálicas: o perigo de explosão e o de incêndio.

Experiências realizadas na Alemanha [38] mostraram que certas telhas metálicas, quando cobertas por uma certa camada de água devido à chuva, ao serem atingidas por uma descarga atmosférica, podem ser parcialmente destruídas devido ao efeito eletro-hidráulico. Este efeito acontece quando uma descarga elétrica ocorre abaixo da superfície da água e um deslocamento de onda é formado pela expansão do canal do arco. Este deslocamento de onda propaga, concentricamente ao canal da descarga, com velocidade supersônica. O diâmetro do canal do arco é aumentado, dentro de poucos microssegundos, de zero a alguns milímetros e como resultado, uma onda de choque é gerada. A distribuição de pressão nas vizinhanças do arco decresce de um valor de 35000 atm a 3500 atm dentro de poucos microssegundos, sendo que este efeito é proporcionalmente reverso ao tempo de subida da corrente. A velocidade diminui a um valor de aproximadamente 100 m/s. Assim, este efeito pode destruir, parcialmente, alguns tipos de telhados metálicos cobertos por água.

Outro tipo de problema que pode acontecer nas telhas metálicas com isolante térmico ou acústico é o perigo de incêndio do material utilizado neste isolamento. Por ser feito, geralmente, por material inflamável, o efeito térmico das descargas atmosféricas que atingiram a telha podem dar início a um incêndio neste material ou em outros na proximidade.

Para confirmar os riscos e encontrar uma solução que não fosse a instalação de um sistema de captadores sobre a telha, foram realizados ensaios no IEE-USP – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo [34], [35], [36] e [37]. Os ensaios consistiram em aplicações de correntes com a energia recomendada pela IEC 61024 [1] para os diferentes níveis de proteção e verificação dos danos, comparando-os para os diferentes tipos de formas de onda. Este estudo, parte integrante desta tese, será melhor detalhado no capítulo referente ao subsistema de captação.

Um outro tipo de cobertura que merece ser estudada é aquela que utiliza telhas de concreto protendido [34], [35], [39]. Os danos devidos às descargas atmosféricas neste tipo de telhas são preocupantes devido aos longos vãos que estas costumam cobrir e também aos riscos envolvidos, se uma eventual queda de uma destas enormes e pesadas telhas ocorrer.

Estas telhas são utilizadas em grandes vãos e se uma descarga atmosférica atingir o SPDA, o que pode acontecer é que descargas disruptivas ocorram entre os condutores das malhas do sistema captor e os cabos de sustentação mecânica das telhas, devido a diferenças de potencial. Se isso acontecer, podem-se ter perfurações na superfície exposta às intempéries. Havendo a retirada da camada de concreto por uma descarga, o cabo de aço existente internamente à telha poderá sofrer, pela ação do tempo, uma corrosão que pode levar à sua ruptura e daí ao colapso da telha.

Quando a largura do prédio não é muito grande, até 40m, por exemplo, é possível proteger o prédio por postes laterais ou por postes suportando cabos horizontais esticados.

Os cabos em grandes vãos, de 100m, por exemplo, exigem postes de elevada resistência mecânica, o que pode inviabilizar o uso de proteção externa.

É possível, entretanto, fazer uma proteção combinada, com o método das malhas, mantida a uma altura não muito grande (20 cm, por exemplo), para correntes de menores intensidades.

Um edifício com um telhado desse tipo, com dimensões 100 m x 300 m, que foi protegido por uma malha de 10 m x 20 m, mantida a 20 cm de altura e por 8 postes (4 de cada lado), tem apresentado resultados satisfatórios, tendo sido observados no período de 1997 a 2001, descargas tanto nos postes como na malha, sem danos às telhas. Um outro edifício, protegido com malha diretamente sobre as telhas sofreu o colapso de uma telha, depois de 20 anos de uso, não tendo sido registrada a queda de raio sobre a telha, suspeitando-se que possa ter caído no sistema de proteção.

Assim, como no caso da telha metálica, este estudo é também parte integrante desta tese, melhor detalhado no capítulo referente ao subsistema de captação.

O trabalho [40], desenvolvido por membros do IEC TC 81/WG9 – CLC TC81/WG4 e pelo secretário da IEC/CLC TC81, mostra o desenvolvimento de uma aproximação probabilística para a avaliação de riscos devido a descargas atmosféricas. São definidas as fontes dos danos, os tipos de danos e os tipos de perdas e também o procedimento para análises de riscos. É considerada ainda, a maneira de análise dos diferentes meios de proteção para reduzir a probabilidade de risco.

Os efeitos dos raios nas estruturas e nos sistemas dependem das características da corrente do raio, do sistema e estruturas protegidas, assim como das medidas de proteção.

O objetivo do trabalho é dar subsídio científico e premissas essenciais a serem introduzidas para avaliação prática do risco devido às descargas atmosféricas, e para a avaliação do número de eventos perigosos, probabilidade dos danos e a quantidade de perdas conseqüentes.

Para ser efetiva, cada medida de proteção deve ser dimensionada e instalada de acordo com regras relevantes e devem satisfazer as condições gerais a serem adequadas à instalação. Isto significa que a medida deve suportar o esforço esperado, no local da sua instalação.

O critério de proteção da estrutura contra danos físicos e perigo de vida tem as seguintes finalidades:

- interceptar, conduzir e dispersar a corrente de descarga para a terra pelo sistema de proteção; e,

- evitar perigosas tensões de passo e de toque em uma área de até 3 metros fora da estrutura pelo aumento da resistência de contato, ou pelo isolamento elétrico do condutor exposto, ou por restrições físicas ou alarmes, quando necessários.

O critério de proteção de sistemas eletrônicos dentro da estrutura é descrito para:

- limitar sobretensões entre a entrada de serviço e o sistema de aterramento da estrutura;
- limitar diferenças de potencial entre aparelhos conectados no mesmo sistema de aterramento;
- limitar sobretensões induzidas nos circuitos internos devido às correntes da descarga;
- e,
- limitar sobretensões transmitidas da entrada de serviço da estrutura.

Em relação ao método de gerenciamento de risco, a série da IEC 62305 conterà uma parte (a de número 2), que descreverá a necessidade de proteção, os benefícios econômicos da instalação de medidas protetoras e a escolha destas medidas em termos de gerenciamento de risco.

3.4 TRABALHOS REFERENTES A BLINDAGENS, DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES NO SISTEMA DE PROTEÇÃO E TENSÕES INDUZIDAS EM EDIFÍCIOS ATINGIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Na bibliografia atual, existem muitos trabalhos sobre este assunto. Alguns dos mais recentes e importantes são resumidos a seguir:

O trabalho [41], apresentado no ICLP de 1998, refere-se a grandes túneis de concreto, os quais são utilizados como dutos de cabos para roteamento de linhas de energia e controle entre edifícios individuais em plantas industriais. No caso de uma descarga direta, uma fração da corrente do raio irá fluir pelo duto de cabos armado, causando sobretensões nos cabos localizados no seu interior. Ensaios em cabos (± 6 metros de comprimento) foram realizados para avaliar a eficiência de algumas formas de redução de fácil execução para instalações existentes.

A relação entre a tensão no cabo interno de controle e a corrente fluindo nas ferragens do duto de concreto dos cabos, pode ser descrita por uma impedância de transferência. Esta pode ser determinada por ensaios de baixa intensidade nos domínios de tempo ou da frequência.

O trabalho [42], apresentado no ICLP 2000, apresenta o fenômeno transitório associado às descargas atmosféricas e as respostas dos circuitos como base para um projeto apropriado de um sistema de proteção completo e para a avaliação correta da segurança das pessoas. No trabalho, uma aproximação circuital é escolhida para descrever o comportamento do impulso no sistema de proteção contra descargas atmosféricas, com diferentes características geométricas, diferindo na forma e dimensão das conexões aos sistemas de aterramento. Os modelos circuitais desenvolvidos foram implantados no programa EMTP.

O objetivo do trabalho é propor algumas sugestões gerais para o projeto do sistema de proteção adequado para edifícios altos, para os quais as normas internacionais ainda estão sendo preparadas e as normas em vigor sugerem requisitos adicionais, cuja validade é limitada para casos particulares. Como resultado, pode-se dizer que a tensão no terminal da terra é maior sob o condutor de descida atingido e, quanto menor o sistema de proteção, maior é a tensão. Pode-se dizer também que, pela adição de anéis de interconexão no meio dos condutores de descida, a

tensão no terminal de terra perto dos condutores de descida atingidos, pode ser sensivelmente reduzida nas estruturas consideradas. Este é um resultado interessante que mostra que anéis de interconexão podem ser úteis para uniformizar a distribuição de correntes em estruturas.

O trabalho [43], apresentado no ICLP 1992, apresenta a avaliação de efetividade da blindagem de uma estrutura que depende fortemente da construção geométrica das paredes da estrutura e do material utilizado. Uma definição geral do sistema é adaptada, para ser a relação entre o campo externo e o interno dos pulsos eletromagnéticos oriundos das descargas atmosféricas expressos em dB. A intensidade dos campos destes pulsos, dentro e fora das estruturas, com pouco ou, eventualmente, sem metal na estrutura da parede, pode ser, na maioria das vezes, a mesma. Nas estruturas que consistem em paredes metálicas com algumas aberturas, a principal contribuição para a intensidade do campo EM interno, é devida à penetração dos pulsos EM externos através das aberturas das estruturas. A maioria dos edifícios modernos tem sido construída com estruturas metálicas com certa densidade de concreto, tendo aberturas nas paredes não exatamente como as dos casos mencionados no trabalho. Os dois casos mencionados devem ser considerados simultaneamente.

Para descrever a penetração de um campo eletromagnético em uma estrutura de concreto e estrutura metálica como reforço, as paredes da estrutura podem ser consideradas como feitas de um material uniforme com uma continuidade e permeabilidade elétrica equivalente.

O trabalho descreve um modelo simples que pode ser usado, praticamente, para avaliar a eficiência da blindagem de uma estrutura, levando em conta o espectro de frequência de um pulso, e a generalização das características eletromagnéticas da estrutura das paredes.

O trabalho [44] analisa as descargas atmosféricas que atingem diretamente os edifícios de concreto armado, causando um mau funcionamento nos equipamentos de telecomunicações. São investigadas as correntes induzidas nos edifícios, para o desenvolvimento de um método de prevenção destes defeitos no caso destas descargas. O trabalho mostra os surtos induzidos calculados, através de observação das formas de ondas da corrente de descarga, utilizando o SPICE. Para desenvolver o método de proteção foi estudada a distribuição da corrente do surto no edifício e, então, foi calculada a tensão induzida nos cabos de comunicação e no aterramento. O trabalho descreve o resultado desta investigação, para a distribuição dos surtos nos edifícios de tamanho real, utilizados em centros de telecomunicações. O edifício é modelado por estruturas de fios, que são representadas por resistências e indutâncias, representando os pilares da edificação. Em um edifício de concreto armado, existem várias barras estruturais em cada pilar. A corrente de surto atmosférico flui, principalmente, na superfície dos condutores por causa do efeito pelicular. Entretanto, as barras estruturais foram modeladas como um condutor coluna, cuja área superficial total é igual às das barras. A corrente do surto atmosférico em um pilar foi calculada utilizando a corrente da descarga observada no topo da torre de telecomunicação. Isto foi comparado com surtos atmosféricos observados no pilar. Os resultados indicam que a forma de onda similar é obtida pelo cálculo, mostrando que o modelo utilizado é efetivo, para o cálculo de surtos atmosféricos nos pilares dos edifícios.

O trabalho [45] apresenta uma simulação, no domínio do tempo, da tensão induzida devido às descargas atmosféricas em circuitos elétricos (laços metálicos abertos), localizados dentro de edifícios altos e de estrutura metálica. No sentido de se fazer análises abrangentes, a simulação é feita considerando regiões diferentes dentro do edifício. Os resultados, relativos à densidade do

fluxo magnético e efeitos induzidos, ajudam na determinação de posições críticas de equipamentos. Eles são apresentados, e alguns deles, comparados com aqueles obtidos por outras metodologias propostas na literatura. O prognóstico de campos eletromagnéticos e seus efeitos induzidos têm se tornado requisitos obrigatórios na fase de projeto dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em edifícios. Se os campos eletromagnéticos se acoplam com componentes de equipamentos de alta susceptibilidade, isto pode resultar em danos materiais, mau funcionamento e alterações da informação, etc.

No trabalho é feita uma simulação, no domínio do tempo, da tensão induzida das descargas atmosféricas em anéis metálicos abertos situados em diferentes regiões dentro de edifícios altos com estruturas metálicas, quando atingidos diretamente pelos raios. A primeira parte do método consiste em subdividir o espectro de condutores, os feixes metálicos e as colunas do edifício, dentro de um número finito de unidades elementares. Depois disto, são obtidas a distribuição da corrente na estrutura metálica e a densidade do fluxo magnético na região de interesse. A densidade do fluxo magnético é calculada pela integração de dipolos infinitesimais de correntes através do comprimento de cada condutor e utilizando a teoria das imagens.

Na segunda parte do método, é obtida a derivada no tempo da densidade do fluxo magnético, calculada utilizando o método de diferenças finitas, e finalmente, depois da apropriada integração da derivada no tempo da densidade do fluxo magnético na área do anel, é calculada a tensão induzida.

No edifício considerado, cada coluna e feixe fazem parte do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, assim como os condutores de descida e os condutores da malha, no teto. Alguns critérios são assumidos nas simulações:

- a estrutura foi dividida em células idênticas;

- cada condutor do sistema de proteção contra descargas atmosféricas foi assumido como um condutor equivalente com seção circular resultante, com um diâmetro de 0,15m;
- foi adotado um valor médio para a impedância característica das colunas e feixes verticais e horizontais. Elas foram calculadas não levando em conta os efeitos mútuos;
- foi assumido um valor de resistividade de terra baixo e um valor de resistência de terra, de cada eletrodo de aterramento igual a 10 ohms, não variando com a corrente injetada;
- a descarga foi simulada, na maioria dos casos, como uma corrente unidirecional.

Como conclusão, foi apresentado um método, no domínio do tempo, para cálculos computacionais de campos transitórios eletromagnéticos e seus efeitos induzidos. Os resultados referentes a edifícios atingidos pelas descargas atmosféricas são computados e foi obtida uma boa concordância entre este método e outros já referenciados. Os resultados mostraram que este método é uma ferramenta confiável, disponível para análises de compatibilidade eletromagnética em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

O trabalho [46], apresentado no ICLP 2002 e publicado na revista Eletricidade Moderna de maio de 2004 apresenta, através de simulações em laboratório aplicadas a um modelo de edificação, os resultados da eficiência da blindagem eletromagnética fornecida por uma segunda camada de armadura em estruturas de concreto armado em comparação com as de uma camada. Foram realizadas medições de campos magnéticos, derivadas de campos e tensões induzidas, em vários tipos de estruturas, utilizando impulsos com várias formas de ondas. Os autores concluem que há melhoria na blindagem do concreto armado de camada dupla em comparação com o de camada única, durante uma descarga direta. Concluem também, que os campos magnéticos no interior de uma estrutura armada têm uma elevação significativamente mais lenta do que a corrente injetada,

e este efeito é mais pronunciado na estrutura de dupla camada. Para correntes de injeção que sobem mais rapidamente, a melhoria da blindagem é mais acentuada, devido ao aumento do deslocamento da corrente para a armadura externa.

O trabalho [47] do pesquisador polonês Andrej Sowa, refere-se à distribuição da corrente de descarga na estrutura de edifícios quando estes são atingidos diretamente pelas descargas atmosféricas. São apresentados resultados experimentais e determinações teóricas. O conhecimento desta distribuição é muito importante, tanto para efeito de cálculo das tensões induzidas no interior das edificações como para outras finalidades, tais como, blindagem eletromagnética das edificações, dimensionamento dos condutores de descidas e/ou ferragens da estrutura e suas amarrações, assim como, para cálculo de tensões que aparecem nos sistemas de proteção. Na época em que este artigo foi publicado, havia uma parte dos pesquisadores que afirmavam que a tendência da corrente era passar pelo lado externo da estrutura apesar da indutância ser maior e outros pesquisadores afirmavam que a maior parte da corrente percorre o condutor de descida mais próximo ao ponto em que a descarga atinge a edificação. Este trabalho é um dos que demonstra que a maior parte da corrente flui pela descida mais próxima.

O trabalho [48], do mesmo autor que o descrito anteriormente, apresenta os resultados de medições realizadas em ensaios de avaliação em condições naturais. Apresenta também cálculos matemáticos das tensões induzidas em laços no interior da edificação. Analisando o trabalho, verificamos que os níveis de corrente utilizados (de 150 a 350A), apesar de entender as dificuldades operacionais e de obtenção de valores melhores devido às fontes disponíveis, foram muito abaixo aos que acontecem na natureza. Como a intensidade do campo magnético depende, entre outros fatores, da intensidade da corrente e das distâncias envolvidas e a tensão induzida em

laços submetidos a estes campos depende do fluxo magnético concatenado, pode-se perder precisão nos valores medidos. Além disto, o circuito utilizado, onde o gerador instalado no telhado do edifício com os condutores de retorno muito próximos das descidas pode introduzir erros nas medições realizadas. Para um estudo mais próximo da realidade, poderia se utilizar a técnica de “captura” de descargas através de pequenos foguetes a partir de edificações, medindo-se assim, simultaneamente, as correntes envolvidas e as tensões induzidas em laços internos. É claro que seria uma pesquisa muito mais sofisticada e de difícil execução.

3.5 TRABALHOS REFERENTES À NORMALIZAÇÃO DE PROTEÇÃO DE EDIFICAÇÕES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A norma brasileira que trata sobre este assunto é a NBR 5419 de fevereiro de 2001 [23]. Em 2004, esta norma foi estudada pela Comissão de Estudos do Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03) e foi feito um projeto de emenda para esta norma. Este projeto de emenda se limitou a poucas modificações e complementos à atual norma, principalmente, no texto do Anexo E, que se refere ao ensaio de verificação de continuidade de armaduras em edificações construídas. Este projeto foi para Consulta Nacional em 2005 e ficou em votação até primeiro de maio de 2005. No mês de maio, foram analisados os votos e a emenda foi aprovada para publicação. A partir de junho de 2005, a Comissão de Estudos voltou a se reunir, mensalmente, para realizar uma revisão geral desta norma. Esta norma, a NBR 5419 [23], foi baseada nas “IEC 61024-1/1990 [1], IEC 61024-1-1/1991 – Guide A [49] e IEC 61024-1-2/1998 – Guide B [50]”, que são específicas para proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Na própria IEC, esta série 61024 está migrando para uma nova série: a IEC 62305 que abrangerá a proteção contra descargas atmosféricas de uma forma geral, não apenas a proteção de estruturas, mas

também de outros sistemas que possam ser atingidos pelas descargas. Assim, a título internacional, o assunto está sendo estudado pelo Comitê Técnico 81, que já desenvolveu diversos projetos de normas, entre eles, o que vai dar origem a norma IEC 62305-1: “Protection against lightning – Part 1 – General Principles” [51], cujo objetivo será fornecer os princípios gerais a serem seguidos na proteção contra descargas atmosféricas de estruturas, incluindo suas instalações e conteúdo, assim como, as pessoas e também os serviços utilizados por esta estrutura, tais como rede elétrica e telefônica. A parte 2 desta série será a IEC 62305-2, que determinará a necessidade de proteção, os benefícios econômicos das medidas de proteção instaladas e a seleção das medidas de proteção adequadas a serem determinadas em termos de gerenciamento de riscos. A parte 3 descreverá os critérios para projetos, instalação e manutenção de medidas de proteção contra descargas atmosféricas para reduzir danos físicos e perigo de vida, em uma estrutura. A parte 4 tratará dos critérios para projetos, instalação e manutenção de medidas de proteção contra descargas atmosféricas, para reduzir falhas de sistemas eletro-eletrônicos em uma estrutura e a parte 5, critérios para reduzir danos físicos e falhas em serviços fornecidos às estruturas, principalmente linhas de telecomunicações e rede elétrica.

Algumas destas partes já foram citadas anteriormente e melhor detalhadas. A comissão brasileira de normalização sobre o assunto iniciou o estudo do projeto de norma que dará origem à IEC 62305-1, em julho de 2005. Este projeto substituirá a norma ABNT NBR 5419/2005, cuja segunda edição foi publicada em 29 de julho de 2005, sendo válida a partir de 29 de agosto de 2005.

O trabalho [52], apresentado no ICLP 2002, inclui uma avaliação de três métodos de proteção contra descargas atmosféricas:

- método do ângulo de proteção (“protection angle”);

- método da malha de proteção (“mesh method”); e
- método da esfera rolante (“rolling sphere method”)

As limitações dos três métodos estão relacionadas com a área de captação de descargas e as superfícies vulneráveis do edifício.

Os critérios de utilização destes métodos foram normalizados e atualizados conforme mais informações eram obtidas, principalmente, através de relatos de ocorrências de descargas que ultrapassaram a proteção normalizada.

No trabalho, são fornecidas algumas características e extensões da validação dos diversos métodos de proteção contra descargas, como a seguir:

- Método de proteção angular (“Protection Angle Method”): historicamente e por um período de uns 100 anos, os ângulos ou as zonas de proteção foram determinados pelo método da tentativa e erro. Primeiramente, acreditava-se que a eficiência da proteção dependia apenas do ângulo α . Entretanto, no começo da década de 60, descobriu-se que, para construções acima de 30m, a eficiência da proteção não dependia apenas do ângulo α , mas também da altura da construção h . Atualmente, diversas normas especificam ângulos de proteção de acordo com a altura do edifício, como a IEC [1], a NFPA [53] e a NBR [23].
- Método da esfera rolante (“Rolling Sphere Method” - RSM): em 1978, Lee propôs um método, o “RSM”, como aplicação ao modelo eletrogeométrico simples, no desenvolvimento de terminais aéreos [54]. A validação do “RSM” está relacionada com a validação do “SEGM” (“simple electro-geometric method”) para linhas de transmissão, mas não há teorias ou estudos documentados que validem esta aplicação em edifícios e outras estruturas. Entretanto, existem dados de falhas de captação de descargas em sistemas de proteção de estruturas que utilizam o método “SEGM/RSM”, sendo que estas falhas estão associadas às descargas atmosféricas de baixa intensidade.

- Método das malhas (“Mesh Method”): não há documentos que justifiquem ou validem os espaçamentos especificados na norma IEC 61024 [1] quanto à eficiência de captação.

Em cima disto, criou-se a seguinte discussão: como o método angular e o “RSM” são empíricos, suas utilizações para captadores de sistemas de proteção necessitam de testes de validação, através de modelos teóricos independentes, ou pelo estudo sistemático do campo eletromagnético. Em razão destas incertezas, o trabalho ressalta que os padrões de proteção em sistemas de proteção deveriam incluir recomendações para assegurar que superfícies vulneráveis de estruturas sejam protegidas por captadores situados próximos a esta região.

O trabalho [55], apresentado no ICLP 2002, mostra inicialmente, a definição dos terminais aéreos que são utilizados em estruturas com o objetivo de capturar descargas atmosféricas, protegendo a estrutura contra os danos causados por uma descarga direta. Um método de posicionamento de terminais aéreos é utilizado para identificar o melhor local de instalação deste dispositivo. O trabalho comenta os três métodos de posicionamento mais utilizados e também um quarto, que segundo o autor, seria um aprimoramento do modelo eletrogeométrico:

- o método do ângulo de proteção (“Protection angle method”), como sendo uma pura construção geométrica, comumente encontrada em normas nacionais e internacionais;
- a Gaiola de Faraday, uma malha de condutores e/ou terminais aéreos que são dispostos ao longo da estrutura;
- o modelo Eletrogeométrico (“Electrogeometric model - EGM”), como sendo relações empíricas entre distâncias de impacto e picos de correntes de descarga. O exemplo mais comum é o método da esfera rolante e modelos físicos derivados de investigações em laboratório e de estudos das características de descargas atmosféricas.

Os três métodos são relativamente simples de serem implementados. Contudo, diversos cientistas e engenheiros concordam que existem limitações quanto à utilização destes métodos, especialmente, quando utilizados em estruturas de altura elevada.

Um sistema de proteção pode ser definido como eficiente, se atingir um determinado nível de proteção e segurança, a um menor custo possível. A otimização do posicionamento do terminal aéreo assegura o mais eficiente sistema de proteção para uma estrutura.

O método CVM (“collection volume method”) é um EGM (“electrogeometric method”), avançado, para posicionamento de terminais aéreos em estruturas. A principal característica deste método consiste na ênfase do estudo da intensidade do campo eletromagnético em pontos críticos da estrutura. Para a validação do método CVM, sabe-se das dificuldades de se avaliar um método de posicionamento em laboratório, assim sendo, medições, em condições naturais, são muito importantes para a validação do método. Esta validação pode ser avaliada a partir de dois pontos de vista: primeiramente, é necessário fazer uma avaliação do número de descargas interceptadas pelo sistema de proteção e comparar com o número esperado pelo modelo. Após esta avaliação, deve-se considerar a eficiência das interceptações alcançada pelo método. Também foi implementado um software, em Java, com o objetivo de facilitar o desenvolvimento de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. O programa calcula o volume de proteção dos terminais aéreos sobre uma estrutura, podendo mostrar seu resultado graficamente.

Como conclusões, foram apresentados os aspectos práticos e de projeto do CVM para o posicionamento de terminais aéreos, assim como testes conduzidos para a validação do método.

As vantagens do método, segundo o autor, são:

- possuir uma base científica;
- testes ao ar livre (condições naturais);
- não impor restrições quanto à altura da estrutura; e

- possuir uma ferramenta computacional que facilita os cálculos.

O trabalho [56], apresentado no ICLP 2002, intensifica a discussão sobre as diversas teorias de captação das descargas na proteção de edifícios. Ele afirma que o método de Eriksson é falho e que, a revisão deste, que é a criação do “CVM/FIM”, é também falha. O trabalho aponta, como principal falha no modelo de Eriksson [57], [58], a utilização de um fator de intensificação de campo exagerado. Afirma também que o “CVM” fornece distâncias de atracamento da ordem de uma magnitude maior do que valores medidos; critica as teorias da ERICO [59], [60], CVM/FIM, [61], [62], por se basearem na teoria de Eriksson, e estimarem fatores de intensificação de campo fora da faixa, o que faz com que este método forneça valores de raios de atração de um terminal aéreo aparentemente maiores do que realmente são, para justificar uma drástica redução no número de terminais aéreos e viabilizar comercialmente os captosres tipo ESE (Early Streamer Emission).

3.6 O PROCESSO DA JUNÇÃO (“ATTACHMENT”)

O processo da junção, ou seja, o último “salto”, que liga o líder descendente com o líder ascendente em uma descarga típica de nuvem à terra, é muito importante para o estudo de proteção de estruturas contra as descargas atmosféricas, uma vez que a distância correspondente a este salto é aquela que pode definir os volumes de proteção para os diversos métodos de captação. Ainda nos dias de hoje, existem teorias conflitantes em relação a este processo, sendo que diferentes modelamentos tentam justificar a utilização de diferentes tipos de captosres e métodos de proteção. Para o estudo deste processo, experiências em laboratórios de alta tensão, observações com medições de descargas naturais ou “trigadas” por meio de foguetes, e

simulações computacionais são realizadas no mundo inteiro, com o objetivo de encontrar um modelo ideal, e assim definir métodos mais precisos de proteção.

No caso do uso de foguetes para obtenção dos parâmetros da descarga atmosférica [3], existem duas técnicas mais utilizadas: a “clássica” e a “altitude”. A técnica mais efetiva, conhecida como “clássica”, é aquela onde se lança um pequeno foguete que arrasta um fino fio condutor, ligado à terra, em direção à nuvem carregada (ver Figura 5). A carga elétrica da nuvem é estimada pela medição do campo elétrico na terra. Na Flórida, valores de 4 a 10 kV/m, geralmente, são bons indicadores para se ter um início de descarga atmosférica utilizando-se este método.

Figura 5 – Uso de foguetes para captura de descargas atmosféricas – Técnica Clássica (Desenho adaptado do trabalho [3])

Nas experiências brasileiras, utilizam-se valores de 8 a 11 kV/m [63]. Quando o foguete, subindo com uma velocidade de aproximadamente 200 m/s, está a uma altitude entre 200 e 300 metros, o campo na ponta do foguete aumenta propiciando o início de um líder carregado positivamente

que se propaga em direção a nuvem. Estamos nos referindo às nuvens predominantes nas tempestades de verão, cuja grande maioria possui grandes quantidades de cargas negativas na sua parte inferior e está a uma altitude entre 5 e 7 quilômetros. O líder vaporiza o fio arrastado pelo foguete e inicia a chamada “corrente de continuidade inicial”, que é da ordem de centenas de ampéres, e que transporta efetivamente a carga negativa do centro de carga da nuvem através do caminho do fio até o equipamento de disparo na terra. Após o cessamento da corrente de continuidade inicial, existe um período sem corrente, seguido por uma ou mais seqüências de líderes descendentes negativos/correntes de retorno ascendentes. No período da corrente de continuidade inicial e corrente de retorno, o fenômeno é fortemente luminoso.

Os líderes negativos e as descargas de retorno subseqüentes nas descargas iniciadas por foguetes são similares ao processo que ocorre nas descargas naturais, entretanto os processos iniciais das descargas naturais são bastante diferentes das iniciadas artificialmente. As principais diferenças são que, nas descargas espontâneas, após a primeira descarga de retorno, geralmente, esta é seguida por uma corrente de continuidade de longa duração, enquanto que nas descargas induzidas artificialmente pelo método clássico, a corrente de continuidade vem antes das correntes de retorno e existe um período sem corrente. De qualquer forma, as descargas induzidas possuem descargas de retorno que são comparáveis às descargas de retorno naturais.

Uma outra técnica utilizada é a chamada “altitude” (ver Figura 6). Nesta técnica, o fio que é arrastado pelo foguete não é aterrado. O foguete sobe em direção à nuvem com uma velocidade de 200 m/s sendo que o fio ligado a ele é composto inicialmente por um fio de cobre de algumas centenas de metros seguido por um fio isolante de kevlar. Este método é utilizado principalmente para ensaiar captadores e blindagens de linhas de transmissão. Algumas vezes, existe ainda um terceiro fio condutor, de aproximadamente 50 metros, cuja função é direcionar a descarga à plataforma de lançamento para a medição da corrente da descarga. Neste método, o líder no

sistema foguete-fios é bidirecional, sendo que o superior geralmente transporta cargas positivas em direção à nuvem e o inferior carrega cargas negativas para baixo. Quando o líder negativo se aproxima da terra, um líder ascendente se inicia no solo ou na plataforma de lançamento e, uma vez que acontece a junção, há o aparecimento da primeira corrente de retorno, que tem uma velocidade duas ou mais vezes maior que a do líder bidirecional, sendo que ela atinge a ponta superior do líder positivo rapidamente, dentro de aproximadamente $10\ \mu\text{s}$. A corrente de continuidade inicial, vem logo em seguida após a primeira corrente de retorno, que é seguida por uma ou mais seqüências líder descendente/corrente de retorno ascendente. Assim, a primeira corrente de retorno e as descargas subseqüentes são distintas, neste método cuja descarga, em geral, é mais similar com as descargas nuvem-terra naturais, nos seus estágios iniciais.

Figura 6 – Uso de foguetes para captura de descargas atmosféricas – Técnica Altitude (Desenho adaptado do trabalho [3])

De qualquer forma, o processo de junção é a fase crítica da descarga ao atingir uma estrutura ou o solo sob o ponto de vista do SPDA [64]. Muitas experiências em laboratório, observações das descargas na natureza e modelamentos computacionais estão em desenvolvimento para a melhoria dos sistemas de proteção. Um dos parâmetros mais importantes ligados a este fenômeno é a distância de impacto (“striking distance”), distância entre o objeto a ser atingido e a ponta do líder descendente, no instante que o líder de conexão é iniciado no objeto.

3.7 A POLÊMICA DOS CAPTORES ESE.

Os capttores tipo ESE (“Early Streamer Emitters”) [65], ou seja, “emissores de descargas antecipados”, são terminais aéreos equipados com um dispositivo especial, ou desenvolvido com um formato especial, que supostamente criam um líder ascendente mais rápido que os criados por um terminal aéreo tradicional. Existem vários tipos diferentes destes capttores no mercado hoje em dia e cada tipo, segundo os seus fabricantes, tem um raio de proteção diferente. Cada um é projetado para substituir um certo número de capttores convencionais, tipo Franklin, por um número menor de capttores, tipo ESE. O usuário é levado a acreditar que estes dispositivos irão proteger uma área maior com um número menor de terminais aéreos. O primeiro e mais utilizado no passado é o chamado para raios radioativos. Este é equipado com uma fonte radioativa posicionada perto do topo do terminal, por exemplo, uma pastilha de amerício. Os materiais radioativos empregados são emissores de fracas partículas alfa com tempo de vida relativamente longo. Estes terminais, supostamente, ionizam as moléculas do ar nas vizinhanças continuamente, ou seja, com ou sem a presença de uma tempestade. O maior fabricante deste tipo de captor nos Estados Unidos da América é o Lightning Preventor of América, cujo

funcionamento descrito é: o isótopo radioativo atinge um átomo de onde sai um elétron, ficando um íon positivo; estes íons positivos são direcionados à nuvem, causando uma reação em cadeia a qual, por colisões, aumenta a quantidade de íons saindo da fonte. Vários experimentos foram realizados em vários países analisando estes terminais, alguns realizados por pesquisadores independentes e outros realizados ou patrocinados por fabricantes. Em quase todos os testes realizados por pesquisadores independentes, os resultados mostraram que os terminais radioativos não são melhores que os tradicionais. Estes tipos de captosres foram banidos em diversos países, como Inglaterra, Alemanha e Brasil por serem considerados dispositivos potencialmente perigosos às pessoas. No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) publicou no Diário Oficial da União, em 09 de maio de 1989, página 7070, a Resolução de nº 04, de abril de 1989, que suspende a concessão de autorização para utilização de material radioativo em para raios. Além disto, algumas prefeituras, como a da cidade de São Paulo, decretaram a proibição do uso de captor iônico radioativo (decreto Nº 32 329 de 23/09/92) e também a substituição dos para raios radioativos instalados, adequando o SPDA à norma brasileira NBR 5419 [23] (decreto Nº 33 132 de 23/04/93).

Os terminais não radioativos, com formatos especiais e que emitem pequenas descargas (Sparking ESE) são terminais aéreos projetados para terem um raio de proteção maior, devido a um formato específico do terminal, ou terminais aéreos que emitem descargas incompletas nas pontas quando submetidos a grandes campos elétricos. Estas descargas, segundo os fabricantes, causam um aumento da ionização nas pontas dos terminais aéreos. Os maiores fabricantes são: LPI - Lightning Protection International da Tasmânia (Austrália), Lightning Preventor of América (New York, USA), Indelec (França), National Lightning Protection Corporation (Colorado, USA).

O Prevectron, fabricado pela Indelec e pela National Lightning Protection Corporation, segundo os seus fabricantes, opera como um capacitor, agrupando cargas quando o campo elétrico aumenta. Quando o líder está se aproximando da área, o campo elétrico aumenta significativamente e faz com que o dispositivo emita descargas, criando um corona e iniciando vários líderes ascendentes. O que é interessante é que os outros captosres ESE são projetados para não formarem corona e os fabricantes anunciam que a presença do corona reprime a formação de líderes em vários pontos.

O Dynasphere, fabricado pela LPI, é descrito como um dispositivo composto por um esferóide flutuante com uma haste central aterrada, sendo a esfera flutuante aterrada através de um tubo estático de altíssima impedância. A esfera flutuante se apresenta aterrada para campos elétricos estáticos existentes antes da aproximação do líder. Desse modo, o seu formato geométrico cria uma intensificação menor do campo e existe um pequeno corona formado para distorcer o campo elétrico próximo. O dispositivo se torna ativo somente a poucos milisegundos da aproximação do líder descendente. Neste ponto, a esfera externa irá aumentar a tensão devido ao acoplamento capacitivo da aproximação do líder, e irá criar uma descarga entre ela mesma e a haste aterrada próxima.

Os Voltage Pulsing ESE são terminais aéreos que contêm um dispositivo auxiliar de potência que produz pulsos de tensão. Estes pulsos de tensão produzem íons positivos nos arredores do terminal. A frequência dos pulsos é projetada para limitar a formação de cargas espaciais (corona) nas redondezas do terminal aéreo. Este captor tipo ESE contem um transformador de alta tensão e um módulo eletrônico que detecta o aumento da intensidade do campo. Estes dispositivos são alimentados por baterias e fotocélulas. Supõe-se que o corona produzido é responsável pelo canal de íons positivos antes do início do líder. Alguns pesquisadores franceses

ensaaiaram estes tipos de terminais e os resultados mostraram que o modelo Helita Pulsar produz um líder ascendente de 10 a 50 μ s mais rápido que um terminal aéreo tipo Franklin.

Os principais argumentos contra o uso dos captores tipo ESE é que não existe um fundamento físico plausível para a reivindicação de um aumento das propriedades de proteção contra descargas atmosféricas para estes captores [66]. Mesmo que um líder ascendente de um captor tipo ESE possa ser lançado antes que o de um terminal comum, ele estará sujeito às mesmas leis físicas que o explicam, e não completará o seu caminho até a ponta do líder descendente, a menos que o campo elétrico seja suficientemente alto. Assim, não é fisicamente razoável acreditar que a distância de atração aumentada, atribuída a estes terminais, seja maior que a de um terminal tradicional na mesma posição.

3.8 OUTRAS POLÊMICAS ATUAIS REFERENTE AOS SUBSISTEMAS DE CAPTAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO

Uma das discussões mais atuais, relativas aos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas no mundo, é a normalização de sistemas com conceitos diferentes aos utilizados nas normas IEC [1], [49] e ABNT [23]. No final de 2004 e início de 2005, uma acirrada troca de correspondência eletrônica entre defensores do sistema DAS/CTS (Dissipation Array System/Charge Transfer System) e outros pesquisadores, principalmente o Dr. Aage Pedersen e Abdul Mousa, com cópia a diversos pesquisadores da área de descargas atmosféricas, participantes assíduos do ICLP (International Conference on Lightning Protection), veio à tona, no sentido de discutir a validade do sistema DAS/CTS e a sua normalização. Este sistema, desenvolvido pela Lightning Eliminators & Consultants Inc. [67], utiliza como base da sua teoria, o seguinte mecanismo para

a formação da descarga: durante a tempestade, uma separação de cargas é construída dentro da nuvem, esta separação, na maioria dos casos, deixa a base da nuvem com cargas negativas, que induzem uma carga similar de polaridade oposta na terra, concentrada na sua superfície bem abaixo da nuvem, com aproximadamente o mesmo tamanho e formato que na nuvem. Conforme a tempestade aumenta a sua intensidade, a separação das cargas continua dentro da nuvem e, assim, o ar entre a nuvem e a terra atua como um isolador. Descargas incompletas de baixa intensidade, chamadas de líder (“stepped leaders”), são formadas movendo-se da base da nuvem em direção à terra, em passos de comprimentos aproximadamente iguais, sendo este comprimento é relacionado com a carga nas nuvens de tempestade e também com o pico da corrente de retorno resultante da junção. Estes passos podem variar de 10 a 160 metros ou mais, para descargas negativas, segundo os defensores desta teoria. Conforme o líder vai se aproximando da terra, o campo elétrico vai aumentando a cada passo. Finalmente, a aproximadamente a um passo da terra, uma “zona de atingimento” é estabelecida a partir da ponta do líder. Esta “zona de atingimento” tem um formato hemisférico, com um raio de comprimento igual a um passo. O campo elétrico dentro da “zona de atingimento” é tão alto que cria descargas incompletas ascendentes, a partir de objetos aterrados. A primeira descarga ascendente que atinge o líder fecha o circuito e inicia o processo de neutralização de cargas. Quando uma estrutura está entre a terra e as nuvens de tempestades, esta estrutura também será carregada, uma vez que ela diminui o espaço de ar entre a terra e a nuvem, e ela pode dar início a descarga. A neutralização de cargas é causada pelo fluxo de elétrons de um corpo para outro. Este processo, a grosso modo, gera o mesmo resultado quando se curto-circuita os terminais de uma bateria. Quatro efeitos secundários separados acompanham a descarga: o pulso eletromagnético, o pulso eletrostático, os transitórios de corrente pela terra e a carga acumulada. O estudo destes efeitos levou os pesquisadores da Lightning Eliminators & Consultants, a desenvolverem um tipo

de proteção contra descargas atmosféricas “mais completo” que o tradicional. Segundo eles, cada instalação deve ser avaliada em função dos fatores de risco, da geografia, do tipo de solo e de muitos outros parâmetros antes da implementação do SPDA. Assim, levando em conta que a descarga atmosférica é um processo de neutralização do potencial entre a nuvem e a terra, qualquer sistema de prevenção de descarga deve facilitar este processo de maneira devagar e continuamente. O DAS (“Dissipation Array System”), conhecido no Brasil como Sistema Dissipativo, é projetado para prevenir que a descarga atinja tanto a área protegida como o próprio dispositivo. Os componentes do sistema primário são o “DAS Ionizer”, o “Spline Ball Diverter System” e o eletrodo de aterramento “Chem-rod”. Além disto, o GCC (“Ground Current Collector”) e vários tipos de TVSS (“Transient Voltage Surge Supression”) são utilizados no SPDA. Assim, os defensores desta técnica acreditam que desenvolveram uma tecnologia com o poder de eliminar a queda de raios em uma determinada área, e protegê-la contra os efeitos secundários das descargas, onde não for possível fazer uma proteção completa. De uma forma resumida, o sistema dissipativo funciona da seguinte forma: a área a ser protegida é estudada em relação ao risco de ocorrência das descargas, topografia, tipo de solo e dispositivos especiais, como o “DAS Ionizer” e/ou “Spline ball” (existem tipo terminais e tipo ionizadores), são instalados em pontos altos do local a ser protegido, como torres, telhados, postes, etc. Estes dispositivos, de forma constante e lentamente, dissipam cargas que se acumulam e se concentram no ar entre o local a ser protegido e a nuvem de tempestade. Estas cargas, chamadas de espacial, segundo os fabricantes dos dispositivos que utilizam esta técnica irão evitar que a descarga atinja o local protegido, caindo nas suas vizinhanças. Este sistema é complementado por um aterramento praticamente tradicional, a não ser pelo uso do “Chem-rod” que é um tipo de haste de aterramento em forma de tubo com pequenos furos e contendo no seu interior, um produto a base de sal, que escoar pelos furos para a terra, de forma a diminuir a resistência de terra da haste.

O subsistema de aterramento é complementado pelo “GCC” que é um “coletor” de corrente de terra, o qual é normalmente composto por um fio, ou um tubo de cobre, enterrado a uma profundidade de aproximadamente 25 centímetros, ao redor da área a ser protegida, e interligado ao sistema dissipativo, cujo objetivo é dissipar, através dos ionizadores, as cargas induzidas no solo pelas nuvens de tempestade. Todo o sistema é, ainda, complementado por supressores de surtos transitórios de tensão, para a proteção dos equipamentos eletro-eletrônicos. A argumentação principal dos fornecedores deste sistema é que, nos lugares onde ele foi instalado, a ocorrência de danos diminuiu consideravelmente. O que não se consegue provar é que esta diminuição é devido ao funcionamento da técnica proposta, ou se pela atuação dos equipamentos instalados, como funcionando conforme a técnica tradicional, uma vez que o uso de supressores de surtos bem selecionados diminui bastante a possibilidade de queima de equipamentos, assim como os dispositivos ionizadores utilizados neste sistema podem funcionar como captos e evitem danos às estruturas.

Ainda referentes a polêmicas na área de SPDA, no Brasil, o grupo que revisa a norma de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas [23], também utilizou a correspondência eletrônica para discutir os principais sistemas de captação utilizados atualmente. Há defensores do método eletrogeométrico como único com respaldo científico e, portanto, o único a ser utilizado, há defensores dos três métodos tradicionais utilizados, e quem defenda que o método de Franklin deva ser eliminado, pois não há comprovação científica que os ângulos descritos por ele, realmente determinam uma área protegida.

3.9 O USO DA FERRAGEM DO CONCRETO ARMADO COMO PARTE INTEGRANTE DO SISTEMA DE PROTEÇÃO: PRINCIPAIS POLÊMICAS E O QUE DIZEM AS PRINCIPAIS NORMAS.

Este assunto também está sendo muito discutido atualmente no grupo que revisa a norma brasileira de proteção contra descargas atmosféricas de estruturas. Uma grande polêmica foi instaurada, em relação ao uso das ferragens do concreto armado de edificações existentes como parte integrante do sistema de proteção, uma vez que a NBR 5419, edição de fevereiro de 2001 [23], possui o Anexo E (normativo), que descreve um ensaio de continuidade de armaduras para verificação da continuidade elétrica das ferragens de um edifício já construído e assim possibilita o uso desta ferragem como parte integrante do sistema de proteção. Este ensaio prevê uma verificação da continuidade utilizando uma máquina de solda e também, medições da impedância das ferragens entre alguns pontos da edificação com valores relativamente baixos de corrente, da ordem de 100 A, chegando a um mínimo de 1 A. Alguns participantes foram terminantemente contra a permanência deste anexo na norma, e outros aceitavam um aprimoramento no mesmo. As principais críticas ao anexo é que, com os testes descritos nele, não é possível garantir as exigências descritas na IEC (61024) e mesmo na NBR 5419, no seu capítulo de condutores de descida naturais, onde as armaduras de aço interligadas das estruturas de concreto armado podem ser consideradas condutores de descida naturais, desde que cerca de 50% dos cruzamentos de barras de armadura e estribos estejam firmemente amarradas com arame de aço torcido e as barras na região de trespasse apresentem comprimento de sobreposição de, no mínimo, 20 diâmetros, igualmente amarradas com arame de aço torcido, ou soldadas, ou interligadas por conexão mecânica adequada. Muitas normas sobre proteção contra descargas atmosféricas de estruturas permitem o uso das ferragens como condutores de descida naturais, por exemplo, a BS

6651 de 1985 e emendas de 1989 (British Standard), a DIN/VDE 0100 (norma alemã), a norma Suíça (ASE 4023 de 1987), a americana National Electrical Safety Code 1993, entre outras. Por outro lado, há argumentações que nenhum teste de continuidade, consegue garantir que as ferragens vão resistir aos esforços mecânicos decorrentes das descargas atmosféricas, que haverá redução das intensidades das ondas de tensão de modo a não criar acidentes humanos, e que o uso das ferragens se mantenha restrito às regiões que tenham elevadas ondas de corrente para evitar interferências em dispositivos eletrônicos, além da preocupação de que eventuais terminações abertas nas ferragens possam produzir oscilações de altas frequências.

Na defesa do uso das ferragens, argumenta-se que nunca houve um desabamento de um prédio devido a descargas atmosféricas, no entanto, há registros de muitos casos em que a descarga atingiu a ferragem e desceu “tranqüilamente” sem rachar a estrutura, eventualmente, “rachando” parte do concreto, no ponto onde a descarga atinge a edificação. Neste caso, muitas vezes, existem quedas de partes das muretas e do concreto onde as ferragens não estão ligadas aos pilares.

Ensaio de laboratório, realizados no IEE-USP [68] no início dos anos 90, mostraram a dificuldade de reproduzir todos os parâmetros da descarga atmosférica em laboratório. Com as correntes utilizadas, até 100 kA, 4/10 μ s, verificou-se que não houve o destacamento do concreto em relação ao ferro, e não se notou movimentação que provocasse o rompimento do concreto, nos casos onde as ferragens foram interligadas com arame torcido. Nos casos onde a ferragem não estava interligada, e havia uma distância de alguns milímetros entre os ferros, houve a explosão do concreto; com uma resistência de 10 Ω , houve passagem de corrente de até 60 kA com a mesma forma de onda. Novos ensaios foram realizados e foram medidas as forças de destacamento do ferro, comparando os resultados com ferragens de colunas de concreto similares

que não sofreram os ensaios. Não foram verificadas diferenças significativas nos esforços medidos.

Há argumentações, contra e a favor, em relação à preferência da descarga, em ter a maior parte da sua corrente conduzida pelas ferragens ou por uma descida externa condutora.

A favor da preferência das descargas às ferragens, há a argumentação em relação à quantidade de ferragens nas colunas de concreto face ao condutor de descida, concluindo que uma menor impedância medida em frequência industrial é suficiente para que a descarga procure as ferragens e não uma eventual descida externa. Fotos de edifícios, onde a descarga atingiu a ferragem próxima à descida e não esta, mostram esta preferência e tendência. Por outro lado, utilizando-se a teoria de ondas trafegantes, explica-se que o impulso atmosférico enxerga a impedância de surto, no caso dos vergalhões e/ou condutores ligados ao ponto de impacto, e se subdivide de acordo com os coeficientes de reflexão e refração do ponto. Há uma preocupação de que eventuais pontos abertos nas ferragens possam dar origens a reflexões sucessivas das ondas trafegantes, ocasionando perturbações de altas frequências e também eventuais aumentos de tensões, pondo em risco as pessoas dentro das estruturas, os equipamentos e a própria estrutura, no caso de descargas disruptivas no concreto. Além disto, foi muito questionado o teste de continuidade nas colunas em prédios existentes. De qualquer forma, este assunto é um dos mais importantes desta tese e será detalhado ao decorrer deste trabalho.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho foi dividir o tema de estudo em três grandes subsistemas: o subsistema de captação, o subsistema de descidas e o subsistema de aterramento. O estudo de cada uma destas subdivisões está contido em capítulos específicos sendo que: o capítulo 5 refere-se à Captação; o capítulo 6, às Descidas e o capítulo 7, ao Aterramento.

Inicialmente, para dar subsídio aos estudos de cada subdivisão, foi feita uma pesquisa bibliográfica, na qual os principais documentos estudados foram comentados e resumidos no Capítulo 3. Estes documentos foram agrupados por assuntos, sendo que, do primeiro grupo, referente às características das descargas, foi possível estabelecer determinados parâmetros das descargas a serem utilizados na parte experimental e também na parte computacional dos capítulos 5, 6 e 7.

De um outro conjunto de trabalhos, referente aos danos ocasionados pelas descargas diretas, foi possível obter uma metodologia para a realização dos ensaios, alguns parâmetros de ensaios e analisar os danos obtidos experimentalmente.

Para a verificação dos danos nas telhas metálicas e terminais aéreos, a metodologia utilizada foi a de passar correntes de impulsos pelas amostras, em forma de arco, simulando os raios curtos e pulsos de corrente contínua (em um tipo de telha também pulsos de corrente alternada), para simular os raios longos. No caso da simulação dos raios curtos, em um espaço entre o eletrodo ligado ao gerador de impulso e o corpo de prova (no caso, superfície da telha metálica ou ponta do terminal aéreo), foi estabelecido, por descarga disruptiva, um arco elétrico e observados os

danos no corpo de provas. No caso da simulação dos raios longos, como a tensão utilizada nas fontes não é suficiente para a ocorrência de descarga disruptiva, um pequeno fio de cobre foi instalado no espaço entre o eletrodo e os corpos de prova, de forma a iniciar o arco elétrico. Com o início da passagem de corrente por este pequeno fio, o mesmo se funde rapidamente e o arco se estabelece no local, até o desligamento da fonte. Nos dois casos, são registradas as correntes em forma de oscilogramas, onde se podem medir as formas de onda, valores de corrente e tempos envolvidos. A análise dos danos foi feita através de inspeção visual e medições das dimensões dos danos (diâmetro das perfurações e área dos demais danos).

No caso das telhas de concreto protendido, a metodologia utilizada foi a de verificar inicialmente os níveis de tensão de impulso necessários para a perfuração da telha e análise dos danos. Nesta verificação, foram aplicados impulsos de tensão com o eletrodo encostado diretamente na superfície da telha, sendo que os cabos de aço de sustentação mecânica das telhas foram ligados à terra. Vários níveis de tensão foram aplicados e as perfurações foram analisadas através de inspeção visual. Impulsos de corrente foram também aplicados da mesma forma, variando-se os valores de pico das correntes, e analisando-se os danos ocorridos.

O conjunto de trabalhos referentes às blindagens, distribuição de correntes e tensões induzidas nos edifícios, subsidiou, principalmente, os estudos de simulações computacionais para verificação da distribuição de correntes, de cálculos de tensões que aparecem no sistema, e as análises destes parâmetros, que auxiliaram na definição das verificações experimentais realizadas neste trabalho.

As simulações computacionais realizadas podem ser divididas em duas etapas, sendo que a primeira, assim como os principais trabalhos relacionados ao assunto e realizados na década de 90, não consideraram os efeitos das reflexões nos cálculos da distribuição das correntes nas

edificações. A segunda etapa considera estes efeitos e compara os resultados com os obtidos anteriormente.

O estudo das normas referentes ao assunto e também de trabalhos relativos à normalização, além de atualizar os conhecimentos necessários para a realização deste trabalho, apontou pontos polêmicos atuais que este trabalho se propõe a discutir e dar sua contribuição, principalmente no sentido de desmistificar algumas preocupações existentes quando se utiliza a técnica aqui estudada. Além disto, este estudo apontou algumas lacunas nas normas, referentes a algumas especificações necessárias, e sugere alguma complementação aos textos existentes, no que se refere ao uso de partes metálicas das estruturas no SPDA.

Ainda no Capítulo 3, referente ao estado da arte, são estudados vários pontos relacionados ao assunto, destacando-se os pontos obscuros e polêmicos que, de certa forma, motivaram as verificações efetuadas.

A metodologia utilizada nos capítulos referentes aos subsistemas de descidas e de aterramento é simples, baseada em verificações experimentais e computacionais, sempre com o objetivo de desenvolver subsídios para o uso da técnica.

No caso do uso das ferragens estruturais como parte integrante do subsistema de descidas, a metodologia utilizada foi a de acompanhar o comportamento de diversos tipos de emendas em ferragens embutidas em colunas de concreto, submetidas a impulsos de corrente (simulando os raios curtos) e pulsos de corrente contínua (simulando os raios longos). Este acompanhamento se deu através da medição da resistência elétrica nas diversas etapas das verificações experimentais e também na análise de radiografias das amostras antes e após os ensaios. Nestas verificações, foi ensaiada também uma amostra onde as ferragens não estavam interligadas, sendo a metodologia utilizada a mesma para as outras amostras.

No caso da utilização da fundação da edificação como subsistema de aterramento, a metodologia utilizada foi a de construir pequenas colunas de concreto, com ferragens adequadamente instaladas no seu interior, e enterrá-las em um tanque metálico contendo terra. Com um gerador de impulsos ajustado, foram aplicados impulsos de tensão de forma a verificar a drenagem de corrente impulsiva pelo concreto e pela terra. Foram ajustados dois níveis de tensão com polaridades positiva e negativa, e registrados os oscilogramas de tensão e de corrente. Destes oscilogramas, foi possível o cálculo das impedâncias de impulso e assim, a análise dos diversos parâmetros utilizados. Os resultados foram comparados com os obtidos em uma haste de aço cobreada, utilizada em aterramentos.

As metodologias foram aqui descritas de forma resumida sendo que, nos capítulos específicos, as mesmas foram detalhadas, e os parâmetros utilizados descritos de forma mais abrangente.

5 O SUBSISTEMA DE CAPTAÇÃO

Diversos componentes naturais da edificação podem ser utilizados (com um certo critério) como parte integrante do subsistema de captação do sistema de proteção contra descargas atmosféricas externo das edificações. Telhados metálicos, estruturas metálicas (carcaça de máquinas e tanques metálicos) no topo dos edifícios, torres metálicas de antenas, rufos metálicos, guarda-corpos metálicos, enfim, diversos componentes metálicos podem ser utilizados, porém alguns cuidados devem ser tomados para que danos, perfurações, descargas disruptivas ou algum outro problema não ocorram.

Os principais cuidados referem-se à continuidade elétrica entre os elementos a serem utilizados, e entre estes e os demais subsistemas do sistema de proteção, à capacidade de condução da corrente das descargas, à capacidade térmica e dinâmica de suportar os efeitos do arco da descarga atmosférica, à não geração de pontos quentes na estrutura que possam dar início a incêndios, explosões e perfurações, além dos cuidados relativos às configurações geométricas dos componentes metálicos a serem utilizados, para que todas as regras necessárias para a proteção da estrutura sejam cumpridas.

Os materiais recomendados pela norma brasileira [23] para serem utilizados como componentes do SPDA são: cobre, alumínio, aço galvanizado à quente, aço inox, aço coberto com camada de zinco aplicado à quente, aço coberto com camada de cobre (espessura mínima de 254 μ m), aço de construção embutido em concreto. Esta norma indica uma tabela (transcrita neste texto como Tabela 5.1) com as espessuras mínimas que estes componentes devem possuir em função do material, da sua utilização e do tipo de dano admissível.

Tabela 5.1 – Espessuras mínimas dos componentes do SPDA.

Material	Captore (mm)			Descidas (mm)	Aterramento (mm)
	NPQ	NPF	PPF		
Aço galvanizado a quente	4	2,5	0,5	0,5	4
Cobre	5	2,5	0,5	0,5	0,5
Alumínio	7	2,5	0,5	0,5	- -
Aço Inox	4	2,5	0,5	0,5	5
NPQ – não gera ponto quente NPF – não perfura PPF – pode perfurar					

Em termos do subsistema de captação, algumas verificações experimentais foram realizadas em telhados metálicos e também em telhas de concreto protendido.

5.1 VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS EM TELHAS METÁLICAS

As telhas metálicas podem e, em muitos casos, devem ser utilizadas como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Os principais problemas vão desde pequenas perfurações até explosões, ou quedas das telhas e das estruturas que as sustentam [34], [35], [36]. Estas telhas podem ser utilizadas de diversas maneiras. Algumas vezes são folhas únicas metálicas, outras vezes possuem uma manta térmica colada em sua superfície inferior, outras são do tipo “sanduíche”, sendo duas chapas metálicas possuindo, entre elas, um material, geralmente isolante térmico e/ou acústico.

Segundo a IEC-61024-1 [1], se a telha for uma única folha e a sua espessura for inferior a 2,5 mm, o maior perigo é a perfuração e, com isso, a formação de goteiras nos dias de chuva. No caso de ter algum material isolante em contato com a chapa metálica, outros problemas devem ser estudados, como o perigo de incêndio deste material, um eventual aumento de peso das telhas, devido à infiltração de água no material isolante, acarretando no colapso da estrutura de sustentação das telhas, e até o perigo de explosão da telha, quando esta estiver coberta por uma camada de água e for atingida por uma descarga atmosférica [38] devido ao efeito eletro hidráulico.

Para verificar alguns destes problemas, vários ensaios foram realizados em telhas metálicas. Inicialmente foi ensaiada uma telha metálica composta por uma folha de aço pintada com 0,7 mm de espessura e uma manta de lã de rocha colada na superfície inferior com espessura de 30 mm. Vamos identificar esta telha como “Telha metálica nº1”. Para isto, estudaram-se, inicialmente, as características da descarga atmosférica para se definir que tipo de corrente seria utilizada nos ensaios.

Como já descrito anteriormente, a descarga atmosférica, em geral, possui vários parâmetros e em termos da corrente, diversas componentes com formas de onda diferentes compõem uma descarga completa.

A IEC 1024-1-1, 1993 [49] recomenda os seguintes valores para os diversos níveis de proteção conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros das correntes de descarga em relação aos níveis de proteção, segundo a IEC 1024-1-1/1993.

	Nível de proteção		
	I	II	III - IV
-Valor de crista da corrente (kA)	200	150	100
- Carga Total (C)	100	75	50
-Carga para Impulso (C)	100	75	50
-Energia Específica W/R (kJ/Ω)	10000	5600	2500
- Taxa de variação média di/dt 30/90% (kA/μs)	200	150	100

A nova série da IEC (IEC 62305-1), na sua parte 1, Princípios gerais, apresenta a Tabela 5.3, transcrita a seguir, com os valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas de acordo com os níveis de proteção.

Tabela 5.3 – Valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas de acordo com os níveis de proteção

PRIMEIRO RAIOS CURTO			NÍVEL DE PROTEÇÃO			
Parâmetros da Corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Pico da Corrente	I	kA	200	150	100	
Carga do Raio Curto	Q _{curto}	C	100	75	50	
Energia Específica	W/R	kJ/Ω	10.000	5.625	2.500	
Parâmetros de Tempo	T ₁ /T ₂	µs/ µs	10/ 350			
RAIOS CURTOS SUBSEQÜENTES			NÍVEL DE PROTEÇÃO			
Parâmetros de Corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Pico de Corrente	I	kA	50	37,5	25	
Inclinação Média	di/ dt	kA/ µs	200	150	100	
Parâmetros de Tempo	T ₁ /T ₂	µs/ µs	0,25/ 100			

RAIO LONGO			NÍVEL DE PROTEÇÃO			
Parâmetros da Corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Carga do Raio longo	Q _{longo}	C	200	150	100	
Parâmetro do Tempo	T _{longo}	s	0,5			
DESCARGA ATMOSFÉRICA			NÍVEL DE PROTEÇÃO			
Parâmetro da Corrente	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Carga da Descarga Atmosférica	Q _{descarga}	C	300	225	150	

Esta nova série apresenta também uma outra tabela, aqui transcrita como Tabela 5.4, com os valores mínimos dos parâmetros das descargas atmosféricas e correspondentes raios das esferas rolantes, em função dos níveis de proteção.

Tabela 5.4 – Valores mínimos dos parâmetros das descargas atmosféricas e correspondentes raios das esferas rolantes, em função dos níveis de proteção

CRITÉRIO DE INTERCEPÇÃO			NÍVEL DE PROTEÇÃO			
	Símbolo	Unidade	I	II	III	IV
Corrente de pico mínima	I	kA	3	5	10	16
Raio da esfera rolante	R	m	20	30	45	60

Tanto a IEC [49] como a NBR 5419 [23], especificam a maioria de seus parâmetros em função dos níveis de proteção. Estes níveis de proteção são os termos de classificação de um SPDA que denotam a sua eficiência. Eles expressam a probabilidade com a qual um SPDA protege um volume contra os efeitos das descargas atmosféricas. Com base nas estatísticas de valores para os parâmetros das descargas e no modelo eletrogeométrico, em algumas normas regionais são indicadas as seguintes eficiências globais teóricas, esperadas para cada nível de proteção [9], conforme Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Eficiência do SPDA em função do nível de proteção

Nível de proteção	Eficiência
I	98%
II	95%
III	90%
IV	80%

Resumidamente, pode-se dizer que o **Nível I** destina-se às estruturas nas quais uma falha do SPDA pode causar danos às estruturas vizinhas e/ou ao meio ambiente [9]. Segundo a norma NBR 5419 [23], para Nível I, estão classificadas as estruturas com risco confinado, como as estações de telecomunicações e usinas elétricas, onde a interrupção de serviços públicos é inaceitável, por breve ou longo período de tempo, e também indústrias, com risco indireto para as imediações devido a incêndios. Neste nível também estão classificadas as estruturas com risco para os arredores, como as refinarias, postos de combustível, fábrica de fogos, fábrica de munições, onde existe risco de incêndio e explosão para a instalação e seus arredores, e também estão classificadas as estruturas com risco para o meio ambiente, como as indústrias químicas, as usinas nucleares e laboratórios bioquímicos, onde o risco de incêndio e falhas de operação pode trazer consequências perigosas para o local e para o meio ambiente.

O **Nível II** é destinado às estruturas, cujos danos, em caso de falhas, serão elevados ou haverá destruição de bens insubstituíveis e/ou históricos, mas, em qualquer caso, se restringirão à própria estrutura e seu conteúdo. Classificam-se também como Nível II, as estruturas com grande aglomeração de público, onde, em caso de falha, existe risco de pânico [9]. A NBR 5419 [23] classifica estruturas comuns, como teatros, escolas, lojas de departamentos, áreas esportivas e igrejas, em termos de danos às instalações elétricas e possibilidade de pânico; bancos, companhias de seguro e comerciais que, além dos efeitos anteriores, teriam os efeitos indiretos,

como a perda de comunicações, falhas de computadores e perda de dados; hospitais, casas de repouso e prisões, onde devem ser levados em conta também as dificuldades de resgate de pessoas e efeitos indiretos em pessoas em tratamento intensivo, e museus e locais arqueológicos, cuja perda de patrimônio cultural é insubstituível.

O **Nível III** é destinado às estruturas de uso comum, como as residências, escritórios e fábricas comuns (excluindo as descritas nos níveis anteriores) [9], cujos danos normalmente são limitados aos objetos no ponto de impacto, ou no caminho por onde a descarga percorre, e pode acontecer a perfuração da isolação das instalações elétricas, incêndio ou outros danos materiais [23].

O **Nível IV** é destinado às estruturas construídas de material não inflamável, com pouco acesso de pessoas e com conteúdo não inflamável, como depósitos em concreto armado, alvenaria ou estrutura metálica de produtos agrícolas não inflamáveis [9].

A maioria das experiências realizadas neste estudo tentou utilizar os parâmetros mais críticos, (definidos para o nível I) sempre que possível. Porém, devido às limitações das fontes de ensaio, ou do tipo de circuito utilizado, algumas vezes, isto não foi possível, sendo então utilizados os maiores valores disponíveis na ocasião dos ensaios.

A geração em laboratório da descarga completa com os seus diversos componentes é difícil e requer fontes e equipamentos que envolvem um custo bastante alto. Dependendo do tipo de dano que se quer verificar, algumas normas já estão restringindo os parâmetros a serem utilizados nos ensaios. Como exemplo, podemos citar a norma brasileira para cabos pára-raios tipo OPGW – “Optical Ground Wires” [7] que, nos ensaios de desempenho quanto às descargas atmosféricas, somente são utilizados os parâmetros referentes à corrente de continuidade, ou seja, a corrente de pequena amplitude, longa duração e unidirecional que flui após o primeiro raio curto. Esta parte

da descarga é a que tem, geralmente, a maior energia térmica. Assim, em danos, onde este tipo de energia tem maior influência, pode-se, de forma aproximada, simular a descarga atmosférica completa, apenas por este parâmetro, que é mais fácil de produzir em laboratório.

Os danos do tipo explosivos, além deste parâmetro de longa duração, têm também relação com os surtos de alta frequência. Neste caso, ondas de corrente com alto valor de pico (100 a 200 kA) e forma de onda normalizada, de 10/350 μ s, são geralmente utilizadas, e às vezes, seguidas pela corrente de longa duração. Estes níveis de corrente com esta forma de onda são de difícil obtenção nos laboratórios existentes no Brasil. Até meados de 2004, somente três laboratórios na Alemanha eram capazes de obter estas correntes.

5.1.1 Procedimentos utilizados nas simulações laboratoriais

Nos ensaios realizados nos laboratórios do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, na telha metálica nº 1 (telha metálica com camada isolante de lã de rocha), foram utilizados os seguintes tipos de corrente:

- impulso de corrente, com forma de onda 6/13 μ s e correntes na faixa de 16 a 26kA;
- corrente alternada, 60Hz, com vários níveis de amplitude e várias durações; e
- corrente contínua, com vários níveis de amplitude e várias durações.

A telha metálica nº1 foi submetida a estas correntes em forma de arco elétrico, cada tipo separadamente. Além da telha metálica, um terminal aéreo instalado na telha utilizado em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, também foi submetido a estes arcos.

A corrente alternada, uma tentativa de simulação do raio longo, obedecendo às quantidades de carga (C), foi utilizada para comparação, em termos de danos, com os outros tipos de corrente.

A telha metálica nº 1 utilizada nos ensaios tem as seguintes características:

- na superfície superior, uma chapa de aço (“painted steel sheet”) pintada, com 0,7 mm de espessura;
- na superfície inferior, enchimento com lã de rocha (“wool rock”), com espessura de 30 mm;
- dimensões: 1,25m X 1,40m.

O terminal aéreo, que também foi ensaiado, foi instalado na emenda da telha (vide Figura 7) e possui um comprimento de 0,3 metros.

Figura 7 – Terminal aéreo ensaiado

Para a realização dos ensaios, a telha metálica foi instalada nos laboratórios na posição horizontal e os vários tipos e níveis de corrente foram aplicados diretamente à chapa metálica, ou na ponta do terminal aéreo, através de descarga elétrica produzida em um “gap” formado entre a chapa ou a ponta do terminal aéreo e uma haste metálica, posicionada de modo conveniente, ligada à fonte (ver Figuras 8 e 9). Para a formação de arco elétrico, foi utilizado um fio de material condutor,

que se fundiu durante a aplicação, nos casos da simulação do raio longo. No caso de correntes impulsivas, um “gap” entre a haste interligada à fonte e à chapa ou a ponta do terminal aéreo foi mantido no local de ocorrência do arco, sendo que no circuito havia um outro “gap” que foi diminuído até a ocorrência da descarga disruptiva.

Figura 8 – Detalhe da telha ensaiada e posicionamento do eletrodo

Figura 9 – Detalhe do fio condutor para inicialização do arco elétrico após sua fusão

Foram registrados os valores e forma de onda das correntes e a duração das aplicações. Em cada aplicação, foram verificados os danos que as correntes de arco produziram na chapa metálica, ou na ponta do terminal aéreo.

Em uma parte da telha foram instaladas pequenas barreiras feitas com barras de isopor e cola de silicone para possibilitar a retenção de uma camada de água sobre a telha. Novos ensaios foram realizados de maneira a estabelecer a formação do arco dentro da camada de água. Os resultados foram comparados com os obtidos a seco.

5.1.2 Resultados obtidos nos ensaios em telhas metálicas com isolante de lã de rocha

5.1.2.1 Ensaios realizados com corrente alternada a seco

Inicialmente, várias aplicações foram realizadas com formação de arco entre a haste auxiliar e o terminal aéreo. Nestas aplicações, o nível de corrente foi variado, ficando na faixa de 450 A (valor eficaz) e 643 A (valor eficaz). A duração do arco foi de 50 ms até 591 ms. Com isso, foram obtidos valores de carga, na faixa de 23 A.s até 379 A.s, e valores de I^2t na faixa de $10.125A^2s$ até $243.589A^2s$. Nestas aplicações, nos terminais aéreos, não foram constatadas as ocorrências de chama em nenhuma parte da telha, nem no terminal aéreo. Somente foram constatados sinais de desgaste na ponta do terminal aéreo, local onde ocorreram os arcos elétricos (vide Figura 10).

Figura 10 – Detalhe da ponta do terminal aéreo após os arcos

Os ensaios, onde a formação de arco se deu diretamente na superfície da telha, foram realizados com correntes da ordem de 475 A (valor eficaz) e 650 A (valor eficaz). As durações impostas a estes ensaios foram na faixa de 139 ms a 1.140 ms. Com isso, foram obtidos valores de carga, na faixa de 66A.s até 743A.s, e valores de I^2t na faixa de 31.362 A²s até 484.619 A²s.

Nestas aplicações, somente nos ensaios com carga de 66 A.s, não houve a perfuração de chapa no local de ocorrência do arco. Neste caso, a superfície metálica no local do arco apresentou-se levemente queimada, não ocorrendo a formação de chama, sendo que, imediatamente após a ocorrência do arco, a mesma permaneceu incandescente por aproximadamente 3 segundos.

Nas aplicações com carga superiores a 66 A.s, foram constatados desgastes e perfurações na chapa metálica, conforme a Tabela 5.6. Chamaremos de desgaste, os efeitos do arco na chapa metálica ao redor da perfuração, considerando eventuais carbonizações, queima superficial de material, derretimento superficial, entre outros.

Tabela 5.6: Danos ocorridos nos ensaios com corrente alternada a seco

Carga (A.s)	Diâmetro aproximado do desgaste (mm)	Diâmetro aproximado da perfuração (mm)	Tempo de manutenção da chama após arco (s)
66	25	Não houve perfuração	Não houve
100	25	10	4
284	70	25	10
560	70	35	12
742	100	50	24

Nas aplicações onde houve a perfuração da camada metálica da telha, foi constatada a ocorrência de chama na camada de enchimento. Nestas aplicações, as chamas se auto-extingiram após os tempos citados na Tabela 5.6.

Os valores de carga bem superiores aos normalizados, no caso, 560 A.s e 742 A.s, foram utilizados para verificação mais rigorosa do tempo de chama no material isolante e sua eventual auto-extinção.

Detalhes dos danos provocados pelos arcos na telha podem ser vistos nas Figuras 11, 12, 13 e 14.

Um oscilograma típico da corrente de arco obtido nestes ensaios pode ser visto na Figura 15.

Figura 11 – Detalhe do dano e da haste auxiliar

Figura 12 – Detalhe do dano com 284 A.s.

Figura 13 – Detalhe do dano com 66A.s.

Figura 14 – Detalhe do dano com 100 A.s.

Figura 15 – Exemplo de oscilograma de corrente

5.1.2.2 Ensaios realizados com corrente alternada, sendo o arco estabelecido no interior de uma camada de água.

Para verificar o experimento realizado na Alemanha [38], onde o efeito eletro-hidráulico pode ser o causador de explosões em telhas metálicas com uma camada de água na superfície, atingidas por descargas atmosféricas, algumas simulações foram realizadas nos laboratórios do IEE-USP [34].

Uma parte da mesma telha metálica já ensaiada a seco (telha metálica nº 1), foi ensaiada com o arco estabelecido entre um eletrodo e a superfície metálica dentro de uma camada de água (ver Figura 16). Com uma tensão da fonte em vazio de, aproximadamente, 7.800V, fez-se circular correntes alternadas da ordem de 420 A (valor eficaz) por tempos de 138ms a 1.296ms. Foram obtidos valores de carga de 58 A.s a 549 A.s, e valores de I^2t de 24.344 A²s a 232.257 A²s. Para valores de carga até 79 A.s, não foram constatadas ocorrências de perfuração da chapa metálica, somente marcas na superfície (ver Figura 17). Para valores de cargas maiores, foram constatadas perfurações na chapa (Figura 18)

Figura 16 – Ensaio com o arco de corrente alternada estabelecido no interior de uma camada de água

Figura 17 – Detalhe do local de estabelecimento do arco

Figura 18 – Detalhe do dano na telha e no eletrodo – Pulsos de corrente alternada

5.1.2.3 Ensaios realizados com corrente contínua a seco.

Ensaios com pulsos de corrente contínua foram realizados da mesma forma que os com corrente alternada, onde a formação de arco se deu diretamente na superfície da telha. Foram realizados com correntes da ordem de 266 A (valor médio) e 286 A (valor médio). As durações impostas a estes ensaios foram na faixa de 125 ms a um pouco mais de 1.440 ms. Assim, foram obtidos valores de carga na faixa de 36 A.s até, aproximadamente, 390 A.s, e valores de I^2t na faixa de 10.224 A²s até, aproximadamente, 105.755 A²s.

Nestas aplicações, em todos os ensaios, houve a perfuração da chapa no local de ocorrência do arco. Nos casos onde ocorreram chamas, estas se auto-extingiram após os tempos citados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Danos ocorridos nos ensaios com pulsos de corrente contínua

Carga (A.s)	Diâmetro aproximado do desgaste (mm)	Diâmetro aproximado da perfuração (mm)	Tempo de manutenção da chama após arco (s)
36	60	5	Não houve
70	70	17	2
192	70	27	5
390**	90	45	*

NOTAS:

* - Nesta aplicação, não foi constatada a ocorrência de chama, porém o local onde foi estabelecido o arco coincidiu com uma travessa de sustentação da telha, sem material inflamável sob a folha metálica. Estima-se que se tivesse o material de enchimento, este daria início à chama também.

** - Este valor de carga é aproximado, uma vez que o oscilograma obtido não registrou o sinal de corrente completo. A duração da corrente, utilizada no cálculo da carga, foi estimada pela verificação do tempo programado no sistema, realizada logo após a aplicação.

Detalhes dos danos provocados pelos arcos na telha podem ser vistos nas Figuras 19, 20, 21. Um oscilograma típico da corrente de arco obtido nestes ensaios pode ser visto na Figura 22.

Figura 19 – Detalhe do dano na telha no ensaio com arco em corrente contínua

Figura 20 – Detalhe do fio condutor utilizado para início do arco de corrente contínua

Figura 21 – Detalhe dos danos no ensaio com corrente contínua

Figura 22 – Oscilograma típico do pulso de corrente contínua utilizado

5.1.2.4 Ensaios realizados com corrente contínua, sendo o arco estabelecido no interior de uma camada de água.

Uma aplicação com pulsos de corrente contínua, com carga de 76 A.s, corrente de 256 A em 296 ms, foi feita com o arco estabelecido dentro de uma camada de água (“gap” de 5 mm e camada de água de 40 mm). O valor de I^2t foi de 19.398 A²s. Nesta aplicação, foi constatada a ocorrência de desgaste e perfuração da telha com os seguintes diâmetros aproximados: 25 mm de desgaste e 20 mm de perfuração (ver Figuras 23 e 24).

Figura 23 - Detalhe da montagem para ensaio com o arco de corrente contínua estabelecido no interior de uma camada de água.

Figura 24 – Detalhe do dano no ensaio de corrente contínua na água.

5.1.2.5 Ensaios realizados com impulso de corrente a seco

Utilizando a mesma telha metálica dos demais ensaios, impulsos de corrente foram aplicados diretamente sobre a superfície metálica (ver Figura 25). Os valores de pico das correntes ficaram na faixa de 16,9 kA a 26 kA, com forma de onda 6/13 μ s. Nas aplicações realizadas, não foi constatada nenhuma marca no local do arco (ver Figura 26).

Foto 25 – Montagem para ensaios com correntes impulsivas

Foto 26 – Detalhe do local onde ocorreu a descarga de impulso de corrente

5.1.2.6 Ensaios realizados com impulso de corrente, sendo o arco estabelecido no interior de uma camada de água.

Nos ensaios com impulsos de corrente, onde o arco foi estabelecido dentro de uma camada de água, os valores de pico das correntes foram de 25 kA a 29,3 kA, com a mesma forma de onda dos ensaios a seco (ver Figura 27). Nestes ensaios, a camada de água foi de 4 cm de espessura e o “gap” diminuído para 2,5 cm, mesmas características dos ensaios anteriores.

Verificou-se que, durante os impulsos de corrente, houve uma forte movimentação da água, porém nenhuma marca na superfície metálica da telha (ver Figura 28).

Figura 27 – Montagem do ensaio com corrente impulsiva no interior de uma camada de água.

Figura 28 – Detalhe do local onde ocorreu a descarga.

5.1.3 Ensaios realizados em outros tipos de telhas

Outros tipos de telhas, com outros materiais e espessuras, foram também estudados e ensaiados nos laboratórios do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP, onde foram simuladas correntes impulsivas e correntes de continuidade. Com a experiência prévia dos ensaios realizados na telha metálica nº 1, verificou-se que, com as fontes laboratoriais disponíveis, dificilmente seriam obtidos resultados significativos em ensaios, onde o arco ocorresse no interior de uma camada d'água, e também uma correlação razoável entre os ensaios com corrente contínua e alternada. Em vista disto, foram realizados apenas os ensaios com correntes impulsivas e com os pulsos de corrente contínua, todos a seco. Os danos foram analisados e comparados para os diversos tipos de amostras levando-se em conta os valores de corrente, I^2t e A.s., utilizados em cada aplicação. O uso de terminais aéreos, como pontos preferenciais para as descargas, também foi analisado,

sob o aspecto de danos, devido às descargas atmosféricas em telhas metálicas. A montagem destes terminais aéreos pode ser vista na Figura 29.

Figura 29 – Terminais aéreos ensaiados

Relembrando, as coberturas metálicas podem ser utilizadas como captadores naturais, desde que satisfaçam algumas condições descritas na norma NBR 5419, 2001 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas [23]. Estas condições estão relacionadas com as espessuras dos elementos metálicos (a Tabela 5.1 especifica as espessuras mínimas para os diversos componentes do SPDA, o tipo de material e, se pode haver perfuração ou não, ou geração de ponto quente), com o revestimento do elemento metálico (não deve ser revestido de material isolante), com a continuidade elétrica entre as diversas partes e os elementos não-metálicos acima ou sobre o elemento metálico. As telhas metálicas a serem utilizadas em edificações, onde não é permitida a ocorrência de perfurações no telhado, devem ter uma espessura de, no mínimo, 2,5 mm de chapa metálica, seja ela de aço galvanizado a quente, cobre, alumínio ou aço inoxidável. A grande maioria das telhas metálicas que estão no mercado possui espessura bem menor que este valor.

Assim como na telha metálica nº 1, outras telhas metálicas (telhas tipo sanduíche e telhas simples) foram submetidas a aplicações de impulsos de corrente para simular os raios curtos e pulsos de corrente contínua, para simular as correntes de continuidade (raios longos). Um tubo de cobre, fixado na telha tipo sanduíche, também foi submetido aos pulsos de corrente com maior energia, simulando-se a descarga atingindo um terminal aéreo. Além destes novos tipos de telhas, quatro modelos de terminais aéreos (com fixação horizontal e dois furos, com rosca mecânica e duas porcas, com rosca soberba e tipo reforçado com quatro porcas) foram instalados em outras telhas metálicas simples e submetidos aos pulsos de corrente contínua.

A telha metálica tipo “sanduíche”, chamada aqui de telha metálica nº 2, utilizada principalmente para isolamento térmico, também foi submetida às correntes (ver Figura 30). Outras telhas metálicas simples, ou seja, sem enchimento térmico ou acústico, também foram submetidas aos ensaios.

Figura 30: Montagem para ensaios de pulsos de corrente contínua, na telha nº 2

Uma outra verificação, realizada nas telhas nº 1 e nº 2, já perfuradas pelas descargas simuladas, foi feita no sentido de se verificar a variação do peso das mesmas quando submetidas à chuva. Assim, pedaços das telhas foram pesados e submetidos a uma chuva, onde foi medida a precipitação de 2,5 mm/minuto na vertical e 3 mm/minuto na horizontal, por um tempo de 10 minutos e novamente pesados (ver Figura 31 referente ao ajuste da precipitação). Depois disto, foram mergulhados em água por um tempo de 10 minutos e novamente pesados.

Figura 31: Ajuste da precipitação da chuva

Um dos principais objetivos desta parte do trabalho é o de comparar o comportamento de alguns tipos de telhas metálicas em relação às descargas atmosféricas, principalmente, com diferentes tipos de enchimento utilizados para isolamento/acústica. Relembrando, a telha anterior (telha metálica nº 1) é composta na parte superior por uma chapa de aço pintado com espessura de 0,7 mm e na parte inferior (interna) por uma manta de lã de rocha com 30 mm de espessura. A telha

metálica nº 2 é composta por um pedaço de um painel com duas chapas de aço pintadas de espessura 0,55 mm cada, preenchido por poliuretano expandido, formando uma camada de 30 mm. Segundo o fabricante do painel, o poliuretano utilizado é formado por uma espuma rígida termofixa (que não amolece com a temperatura) de células fechadas, gerada pela reação entre um polioli e um reagente isocianato com gás. Este material possui, na sua composição, elementos retardantes, que impedem a propagação das chamas por carbonificação, e conseqüente falta de oxigenação. Considerando-se apenas os resultados dos ensaios de impulso de corrente e pulsos de corrente contínua, que foram os ensaios realizados nesta telha com preenchimento de poliuretano (na telha nº1 foram realizados ensaios com corrente alternada e também ensaios onde o arco ocorreu dentro de uma camada de água), verificamos que, na telha com manta de lã de rocha, nos ensaios de impulsos de corrente com valores de crista na faixa de 16,9 a 26 kA e forma de onda 6/13µs, nem uma marca ou danos ocorreram e nos ensaios com pulsos de corrente contínua ocorreram os danos já citados na Tabela 5.7.

No pedaço de painel com poliuretano, foram realizados ensaios de impulso de corrente e de corrente contínua, cujos parâmetros de ensaios são apresentados a seguir.

5.1.3.1 Ensaios de impulso de corrente no painel preenchido com poliuretano (telha nº 2)

Utilizando-se um gerador de impulsos de corrente, de 45 kJ, tensão de carga de até 200kV, foram aplicados 2 impulsos de corrente com as seguintes características: impulso 1 – valor de pico da corrente 18,5 kA, forma de onda 9,25/19µs, espaço entre o eletrodo (esfera metálica) e a chapa metálica menor que 1 centímetro; e impulso 2 – valor de pico da corrente 27,1 kA, forma de onda

9,38/19 μ s, espaço entre o eletrodo e a chapa metálica aproximadamente de 1 centímetro. As figuras 32 e 33 apresentam detalhes da montagem com o eletrodo utilizado e também das perfurações e carbonização oriundas dos impulsos aplicados.

Figura 32: Detalhe da montagem e do eletrodo utilizado no ensaio de impulso na Telha nº 2.

Figura 33: Detalhe das perfurações e carbonização ocorridas no ensaio de impulso na Telha nº 2.

5.1.3.2 Ensaios com pulsos de corrente contínua no painel preenchido com poliuretano (telha nº 2)

Utilizando-se uma fonte composta por um transformador trifásico de 3 MVA, 13,2kV+/- 6%, 220-380-440-760V, e uma ponte retificadora trifásica de onda completa, arcos elétricos formados por pulsos de corrente contínua foram estabelecidos em um “gap” de, aproximadamente, 1 centímetro entre um eletrodo de cobre e o painel metálico, anotou-se os valores eficazes destes pulsos, calculou-se os equivalentes da carga, em A.s. e o I^2t , e verificou-se os eventuais danos ocorridos (Tabela 5.8). A Figura 34 mostra um detalhe dos danos referentes a uma das aplicações na telha nº2.

Figura 34: Detalhes dos danos na Telha nº 2

**Tabela 5.8 – Danos verificados nos ensaios com pulsos de corrente contínua – Telha nº 2
com enchimento de poliuretano**

APLIC.	VALOR EFICAZ DA CORRENTE (A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I^2t (A ² s)	ÁREA APROXIMADA DO DANO (mm ²)	DIÂMETRO APROXIMADO DA PERFURAÇÃO (mm)	TEMPO DE CHAMA APÓS O ARCO (s)
1	579,6	72,3	41,9	24288	2500	5	4
2	641,4	93,1	59,7	38300	3200	10	7
3	644,3	163,6	105,4	67914	3200	15	16
4	628,9	304,2	191,0	120315	7200	25	20
5	634,0	490,3	310,6	197079	11700	28	25
6*	605,0	488,1	295,3	178656	Não houve	Não houve	Não houve

* Nesta aplicação, o arco foi estabelecido entre o eletrodo e a ponta de um tubo de cobre instalado no painel simulando um terminal aéreo (ver Figura 35).

Figura 35: Ensaio com pulsos de corrente contínua, em um tubo fixado na telha nº 2, simulando um terminal aéreo

5.1.3.3 Ensaios de impulso de corrente em telhas metálicas simples sem enchimento (Telhas nº 3 e nº 4)

Utilizando-se o mesmo gerador de impulsos de corrente, de 45 kJ, foram aplicados 2 impulsos de corrente com as seguintes características, em 2 telhas metálicas de mesma espessura, porém com desenhos diferentes: Telha 3- impulso 1 – valor de pico da corrente 19,2 kA, forma de onda 7,63/18,4 μ s, espaço entre o eletrodo e a chapa metálica de, aproximadamente, 3 centímetros; e impulso 2 – valor de pico da corrente 28,0 kA, forma de onda 9,25/18,9 μ s, espaço entre o eletrodo e a chapa metálica, aproximadamente, de 3 centímetros. A Figura 36 mostra alguns detalhes do gerador de impulsos utilizado, do eletrodo e da telha nº 3.

Figura 36: Detalhes do Gerador de Impulsos, do eletrodo e da Telha nº 3

A Figura 37 mostra alguns detalhes da perfuração referente ao impulso 2 aplicado na telha nº 3, na parte inferior.

Figura 37: Detalhe da perfuração e carbonização na telha nº 3 devido ao impulso 2

Na Telha 4 foram aplicados também dois impulsos, o impulso 1 – valor de pico da corrente 18,3 kA, forma de onda 9,63/19,4 μ s, espaço entre o eletrodo e a chapa metálica de aproximadamente 1 centímetro; e o impulso 2 – valor de pico da corrente 26,8 kA, forma de onda 9,5/19,2 μ s, espaço entre o eletrodo e a chapa metálica aproximadamente de 1 centímetro. A Figura 38 mostra alguns detalhes do eletrodo utilizado nos ensaios na telha nº4.

Figura 38: Detalhe do eletrodo utilizado nos ensaios na Telha nº 4

5.1.3.4 Ensaios com pulsos de corrente contínua em telhas metálicas simples sem enchimento.

Utilizando-se a mesma fonte composta por um transformador trifásico de 3 MVA, e uma ponte retificadora, arcos elétricos, formados por pulsos de corrente contínua, foram estabelecidos em um “gap” de, aproximadamente, 1 centímetro entre um eletrodo de cobre e a telha metálica nº 3. Anotou-se os valores eficazes destes pulsos, calculou-se os equivalentes da carga em A.s., e o I^2t , e verificou-se os eventuais danos ocorridos (Tabela 5.9). A Figura 39 mostra detalhes do eletrodo utilizado e da conexão do retorno para a fonte.

Figura 39: Detalhe do eletrodo utilizado e da conexão de retorno para a fonte

As Figuras 40 e 41 mostram detalhes dos danos ocorridos nestes ensaios na Telha nº 3

Figura 40: Detalhes dos danos na Telha nº 3, na aplicação nº 1

Figura 41: Detalhes dos danos na Telha nº 3, na aplicação nº 5

O início do arco se deu através da fusão de um pequeno condutor de cobre como pode ser vista na Figura 42.

Figura 42: Detalhe do condutor utilizado para início do arco nos ensaios na Telha nº 3

Tabela 5.9 – Danos nos ensaios de laboratório com pulsos de corrente contínua – Telha simples nº 3

APLIC.	VALOR EFICAZ DA CORRENTE (A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I^2t (A ² s)	ÁREA APROXIMADA DO DANO (mm ²)	DIÂMETRO APROXIMADO DA PERFURAÇÃO (mm)
1	658	84,5	55,6	36585	1000	10
2	656	91,7	60,1	39461	1050	11
3	650	150,0	97,5	63375	1200	15
4	653	257,5	168,0	109800	1200	20
5	642	358,0	229,8	147554	4900	25
6	640	540,5	346,0	221388	4900	35

5.1.3.5 Ensaios de pulsos de corrente contínua em terminais aéreos

Em uma telha metálica simples sem enchimento (telha nº 5), foram instalados três modelos de terminais aéreos (com fixação horizontal e dois furos como pode ser visto na Figura 43, com rosca mecânica e duas porcas, como pode se visto na Figura 44, e tipo reforçado com quatro porcas como pode ser visto na Figura 45) e, na telha metálica com enchimento de poliuretano, foi instalado um terminal aéreo com rosca soberba, fixado diretamente na telha e no poliuretano, ou seja, com pouca área de contato entre o terminal aéreo e a chapa metálica, como pode ser vista na Figura 46.

Figura 43: Terminal Aéreo com fixação horizontal e dois furos.

Figura 44 – Terminal Aéreo com rosca mecânica e duas porcas

Figura 45 – Terminal Aéreo reforçado com quatro porcas

Figura 46: Terminal aéreo simples com rosca soberba

Na ponta dos terminais aéreos instalados na telha simples nº 5, sem enchimento, foram aplicados os valores descritos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Ensaio de pulsos de corrente contínua nos terminais aéreos

APLIC.	TIPO DE TERMINAL	VALOR EFICAZ DA CORRENTE (A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	Com 1 porca e 1 contraporca	2350	123	289	679267
2	idem	2274	127	289	656726
3	idem	2318	133	308	714625
4	Duplo com porca e contraporca	2349	123	289	678689
5	idem	2350	122	287	673745
6	idem	2329	124	289	672695
7	Suporte horizontal	2351	126	296	696427
8	idem	2329	133	309	721424
9	idem	2388	127	303	724223

No terminal aéreo com rosca soberba, que foi instalado na telha com enchimento de poliuretano (telha nº 2), foram aplicados os seguintes valores: corrente de 2154 A (valor eficaz) em um tempo de 122 ms, o que equivale a uma carga de 263 As. Nesta aplicação, verificaram-se danos em torno do furo onde foi enroscado o terminal aéreo, com um diâmetro de, aproximadamente, 20 mm, danos na ponta do terminal aéreo e fogo no poliuretano que se auto extinguiu após 7 segundos. A Figura 47 mostra o fogo no poliuretano durante a aplicação no terminal aéreo.

Figura 47: Ensaio no Terminal aéreo na Telha nº 2 – Detalhe do fogo no poliuretano.

5.1.3.6 Verificação da variação de peso das telhas com isolamento térmico, secas e molhadas.

Após os testes com corrente, as telhas com isolamento térmico, contendo as perfurações devido aos testes, foram pesadas, submetidas a 10 minutos de chuva com precipitação de 2,5 mm/minuto na vertical e 3 mm/minuto na horizontal (ver Figura 48), pesadas novamente e imersas em água com o objetivo de se verificar o aumento de peso devido à penetração de água, em telhas deste tipo, perfuradas por descargas atmosféricas.

Figura 48: Detalhe dos testes de chuva nas telhas

O pedaço de telha com enchimento de poliuretano (telha nº 2), de dimensões 120 x 20 centímetros e espessura 3 centímetros, pesou, a seco, 2000 gramas. Após 10 minutos de chuva sobre a face perfurada da telha, não foi possível verificar alguma variação do peso com a balança utilizada, permanecendo o valor de 2000 gramas. Após 10 minutos, imerso em água, o peso do pedaço de telha aumentou para 2020 gramas, ou seja, aumentou 1% do seu peso original.

A telha com manta de lã de rocha, telha nº 1, (com dimensões 1,25 por 1,40 metros e espessura da manta de lã de rocha de 3 centímetros) pesou inicialmente 35,4 kg. Após 10 minutos de chuva sobre a face perfurada, seu peso aumentou para 36,6 kg, ou seja, um aumento de 3,4%. Esta telha, por ter dimensões maiores que o tanque disponível, foi molhada durante 10 minutos, principalmente nas laterais com acesso à manta, com uma mangueira com o objetivo de deixar a manta totalmente molhada. Após isto, a telha foi novamente pesada onde se verificou um aumento de peso para 41 kg, ou seja, um aumento de aproximadamente 16%.

5.1.4 Análise dos resultados

Os ensaios de impulso de corrente, com os parâmetros aplicados, mostraram pequenas perfurações (diâmetros da ordem de furos de agulhas), nas telhas metálicas, com espessuras da ordem de 0,55 milímetros, sendo elas do tipo sanduíche ou simples, telhas nº 2, 3, 4 (ver Figura 49).

Figura 49: Detalhes de uma perfuração no ensaio com impulso atmosférico

Os ensaios com pulsos de corrente contínua, utilizado para simulação das correntes de continuidade, mostraram perfurações e desgastes, principalmente carbonização, conforme descrito nas Tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, mesmo nos menores valores de carga (C) indicados pela norma (ver Figura 50). Os diâmetros das perfurações aumentaram de forma praticamente linear com o aumento da carga, sendo que, para valores de carga próximos ao valor especificado para nível I (300C), foram verificadas perfurações com diâmetros de aproximadamente 28 milímetros (ver Figura 51).

Figura 50: Detalhes do eletrodo e da perfuração

Figura 51: Detalhe da perfuração

A telha com enchimento de poliuretano (telha nº 2) apresentou chamas após as aplicações dos pulsos de corrente contínua, sendo que estas se auto-extingiram após alguns segundos da aplicação (ver Figura 52).

Figura 52: Detalhe da perfuração na telha com poliuretano – telha nº 2

Os ensaios realizados em terminais aéreos, instalados em telhas metálicas de baixas espessuras, mostraram que é necessário ter uma boa área de contato do terminal com a telha, para que as correntes de continuidade fluam pela telha sem danificá-la. De uma forma geral, se a descarga atmosférica atingir os terminais aéreos e não diretamente a telha metálica, e estes tiverem uma boa área de contato com a telha (aproximadamente 6 centímetros quadrados – ver Figura 53), a probabilidade de se ter danos e perfurações na telha é muito pequena, ou seja, as telhas metálicas, mesmo com pequena espessura, conduzem as correntes das descargas atmosféricas de forma a não ocorrerem perfurações e/ou elevações de temperaturas perigosas.

Figura 53: Detalhe do terminal aéreo após ensaios

A Figura 54 mostra a área sob a base do terminal aéreo, com um bom contato, que nada sofreu, para conduzir a corrente de ensaio. Os danos (“chamuscamentos”), verificados nas Figuras 53 e 54, correspondem às queimas, devido ao material fundido, da ponta do terminal aéreo, quando os arcos ocorreram.

Figura 54: Detalhe do contato entre a base do terminal aéreo e a telha metálica após o ensaio

As Figuras 55 e 56 mostram os danos ocorridos na condução da corrente de ensaio por um terminal aéreo com pouca área de contato com a telha metálica. A Figura 55 mostra o contato com a superfície superior e a Figura 56 com a superfície inferior.

Figura 55: Detalhe dos danos, na superfície superior, de um terminal aéreo com pouca área de contato com a telha, após a passagem da corrente de ensaio.

Figura 56: Detalhe dos danos, na superfície inferior, de um terminal aéreo com pouca área de contato com a telha, após a passagem da corrente de ensaio.

Em relação à elevação do peso de telhas com enchimento térmico/acústico, esta depende da porosidade do material utilizado. O poliuretano mostrou ter baixa porosidade, de forma a impedir a penetração excessiva de água no interior da telha e aumentar, consideravelmente, o peso da mesma. Já a manta de lã de rocha mostrou alta porosidade, o que pode aumentar significativamente o peso da telha com a penetração da água.

5.1.5 Recomendações para proteção contra descargas atmosféricas de edificações com cobertura metálica

As coberturas metálicas podem ser utilizadas como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, desde que obedçam as espessuras mínimas descritas pelas normas. Caso a espessura da cobertura metálica for inferior à normalizada, cuidados especiais devem ser tomados para evitar danos. Não é recomendável utilizar estas coberturas com enchimento térmico/acústico em edificações contendo materiais sujeitos às ignições que possam inflamá-los. Recomenda-se fortemente o uso de terminais aéreos instalados nestas coberturas, considerando o método eletrogeométrico e proceder às inspeções visuais, conforme recomendações das normas, e cada vez que se tiver notícia de que o sistema foi atingido por uma descarga atmosférica. Verificar as continuidades elétricas entre os subsistemas que compõe o SPDA.

Em relação ao uso de terminais aéreos nas coberturas metálicas, considerando “h” a altura do terminal aéreo em metros, e “R” os raios da esfera rolante, utilizada no método eletrogeométrico, apresentamos a Tabela 5.11, onde se pode verificar o maior espaçamento entre terminais aéreos, em função do nível de proteção. Conforme a Tabela 5.4, o raio da esfera rolante para o nível de proteção I é de 20 metros, para o nível II é de 30 metros e assim por diante. Calculamos o espaçamento máximo entre terminais aéreos (0,25 m a 0,6 m) e hastes captoras tipo Franklin (1 a

10 metros) pelo método eletrogeométrico, de forma que a esfera rolante, entre dois terminais ou hastes iguais, tangencie o ponto médio entre os mesmos. Assim, se considerarmos, por exemplo, dois terminais aéreos de 0,25 m cada, para uma proteção nível I, bastam espaçá-los com menos de 6,3 metros que estarão obedecendo ao método eletrogeométrico.

Tabela 5.11 – Espaçamento máximo entre terminais aéreos ou hastes captoras, em função do nível de proteção, obedecendo ao método eletrogeométrico.

h(m)	R(m)	20 (nível I)	30 (nível II)	45 (nível III)	60 (nível IV)
0,25		6,3	7,7	9,5	10,9
0,35		7,5	9,1	11,2	12,9
0,5		8,9	10,9	13,4	15,5
0,6		9,7	11,9	14,6	16,9
1		12,5	15,4	18,9	21,8
2		17,4	21,5	26,5	30,7
3		21,1	26,2	32,3	37,5
4		24,0	29,9	37,1	43,1
5		26,5	33,2	41,2	48,0
6		28,6	36,0	44,9	52,3
7		30,4	38,5	48,2	56,2
8		32,0	40,8	51,2	59,9
9		33,4	42,8	54,0	63,2
10		34,6	44,7	56,6	66,3

Se considerarmos grandes áreas, onde a disposição dos terminais aéreos ou hastes captoras possuir forma de quadrados, a maior distância entre os terminais aéreos dispostos em quadrado será a diagonal, assim a Tabela 5.12 apresenta os espaçamentos máximos, nas laterais dos quadrados ou retângulos entre os terminais aéreos, quando eles forem dispostos desta forma.

Tabela 5.12 – Espaçamento máximo, nas laterais de quadrados ou retângulos entre terminais aéreos ou hastes captoras dispostas destas formas, em função do nível de proteção obedecendo ao método eletrogeométrico.

h(m)	R(m)	20 (nível I)	30 (nível II)	45 (nível III)	60 (nível IV)
0,25		4,5	5,5	6,7	7,7
0,35		5,3	6,5	7,9	9,2
0,5		6,3	7,7	9,5	10,9
0,6		6,9	8,4	10,4	12,0
1		8,8	10,9	13,3	15,4
2		12,3	15,2	18,8	21,7
3		14,9	18,5	22,8	26,5
4		17,0	21,2	26,2	30,5
5		18,7	23,5	29,2	33,9
6		20,2	25,5	31,7	37,0
7		21,5	27,2	34,1	39,8
8		22,6	28,8	36,2	42,3
9		23,6	30,3	38,2	44,7
10		24,5	31,6	40,0	46,9

Assim, o uso de componentes naturais das edificações, como coberturas metálicas, mastros, rufos, calhas, pilares, ferragens, guarda-corpos, tubos e tanques metálicos, podem e devem ser utilizados como parte integrante dos SPDAs, desde que cuidados sejam tomados. No caso de coberturas metálicas atingidas por descargas atmosféricas, perfurações, chamas e, até mesmo explosões, podem ocorrer. As perfurações em telhas com enchimento térmico/acústico podem ter o seu interior penetrado pela chuva o que pode aumentar o peso do telhado. O uso de terminais aéreos em coberturas metálicas é altamente recomendável.

5.1.6 Comparação e análise dos parâmetros verificados nos ensaios

Inicialmente, ao analisarmos os resultados dos ensaios na Telha nº 1 (Telha metálica com manta de lã de rocha) em relação ao uso de pulsos de corrente contínua e de corrente alternada para simulação da componente correspondente à corrente de continuidade, verificamos pouca relação entre os resultados, como pode ser analisado na Figura 57.

Figura 57: Gráfico do diâmetro das perfurações em função da carga, para a Telha nº 1

Os desgastes e perfurações para uma mesma carga, em uma telha metálica, em relação aos raios longos, são maiores em corrente contínua. Sob este aspecto, não há sentido em utilizar corrente alternada para simulação do raio longo em laboratório. Os fenômenos acoplados aos arcos e os danos em superfícies metálicas são diferentes para corrente contínua e alternada. Mesmo considerando-se em relação ao I^2t , não há correlação entre os resultados obtidos com corrente

alternada e contínua (ver Figura 58). A análise que pode ser feita é que, para um mesmo I^2t , os danos com corrente contínua são muito maiores que com corrente alternada.

Figura 58: Gráfico do diâmetro das perfurações em função do I^2t , para a Telha nº 1

Ressaltamos que foram realizados ensaios com pulsos de corrente alternada na tentativa de simulação em laboratório do raio longo, pela facilidade de geração destes pulsos. Na análise dos resultados obtidos, verificamos que o comportamento dos arcos em corrente alternada e em corrente contínua são bem diferentes. Se compararmos a forma das perfurações ocorridas nos ensaios onde o arco foi estabelecido dentro de uma camada de água, verificamos que nas aplicações com corrente contínua, o arco permaneceu restrito a uma região onde ocorreu a perfuração. No caso do arco em corrente alternada, não ocorreu este confinamento, ocasionando diversas pequenas perfurações na telha. Desta forma, não é possível simular, em laboratório, a corrente de continuidade dos raios longos através de pulsos de corrente alternada.

Comparando-se as perfurações ocorridas entre as telhas nº 1 (Chapa de aço pintada com 0,7 mm de espessura e com manta de lã de rocha), a de nº 2 (Painel composto por duas chapas de aço pintados de espessura 0,55 mm cada, preenchido por poliuretano expandido) e a nº 3 (Chapa de aço simples pintada de espessura de 0,55 mm), verificamos que, tanto para uma mesma carga (A.s), (ver Figura 59), ou para um mesmo I^2t , (ver Figura 60), as perfurações maiores foram na Telha nº 1. Não foram analisadas as composições do aço das diversas telhas. Foram utilizadas amostras fornecidas por dois fabricantes diferentes. A Telha nº 1 foi desenvolvida por um fabricante e as demais por um outro diferente. No caso das Telhas nº 2 e nº 3, por terem as chapas de aço muito parecidas e praticamente com a mesma espessura, os resultados das perfurações foram muito parecidos (ver Figuras 59 e 60).

Figura 59: Gráfico do diâmetro das perfurações, em função da carga, para várias telhas.

Figura 60: Gráfico do diâmetro das perfurações, em função do $I^2 t$, para várias telhas.

Sob o aspecto de danos nas telhas metálicas, verificamos que, em relação aos raios curtos, com os valores que foram possíveis simular em laboratório, os danos foram pequenos, limitando-se a minúsculos furos (tipo perfuração por agulhas) nas telhas com espessuras menores. Para este tipo de simulação verificamos que o parâmetro mais relevante é o $I^2 t$, além do valor de crista da corrente e da forma de onda, pois a carga do raio curto ($A.s$) é bem menor, se comparada com a do raio longo. No caso do raio longo, o parâmetro mais relevante é a carga, devendo os testes serem realizados em função deste parâmetro.

Em relação aos ensaios realizados com o arco ocorrendo dentro de uma camada de água, pouco se pode concluir, com os parâmetros aplicados. O efeito explosivo do raio está mais ligado ao raio curto o qual não pudemos simular convenientemente no laboratório.

5.1.7 Análise dos danos devidos aos efeitos térmicos no ponto de impacto das descargas.

Muitos modelos teóricos, para o cálculo dos efeitos térmicos no ponto de impacto do canal do raio, em superfícies metálicas têm sido desenvolvidos. Um modelo relativamente simples, e que pode ser utilizado para verificar o tamanho do dano que as descargas podem ocasionar nos telhados metálicos, é o modelo “queda de tensão anodo-ou-catodo” [51]. A aplicação deste modelo é particularmente efetiva para folhas de metal finas, como a maioria das chapas utilizadas nas coberturas metálicas. De qualquer forma, este modelo fornece resultados conservativos, uma vez que, é postulado que toda a energia injetada no ponto de impacto do raio é utilizada para fundir ou vaporizar o material condutor, desprezando a difusão do calor no metal.

No modelo “queda de tensão anodo-ou-catodo”, a transmissão de energia “W” do canal do arco para a chapa metálica é assumida como dada pela queda de tensão anodo/catodo $u_{a,c}$ multiplicada pela carga Q da corrente do raio:

$$W = \int u_{a,c} i dt = u_{a,c} \int i dt = u_{a,c} \cdot Q \quad (1)$$

Como $u_{a,c}$ é razoavelmente constante na faixa de corrente aqui considerada, a carga da corrente do raio (Q) é a principal responsável pela conversão de energia no canal do arco.

A queda de tensão anodo/catodo $u_{a,c}$ tem um valor típico de algumas dezenas de volts.

Uma aproximação simplificada assume que toda a energia desenvolvida no canal do arco é utilizada somente para a fusão. A seguinte equação utiliza esta suposição, mas isto leva a um volume fundido superestimado.

$$V = \frac{u_{a,c} Q}{\gamma} \cdot \frac{1}{c_w(\theta_s - \theta_u) + c_s} \quad (2)$$

onde:

V: Volume de metal fundido [m³]

u_{a,c}: Queda de tensão anodo-ou-catodo (assumido como constante) [V]

Q: Carga da corrente do raio [C]

γ : Densidade do material [kg/m³]

c_w: Capacidade térmica [J/kgK]

θ_s : Temperatura de fusão [°C]

θ_u : Temperatura ambiente [°C]

c_s: Calor latente de fusão [J/kg]

Valores característicos dos parâmetros físicos descritos nesta equação, para diferentes materiais utilizados em SPDA estão registrados na Tabela 5.13.

Basicamente, a carga a ser considerada deveria ser a soma da carga da corrente de retorno e da corrente do raio longo; experiências de laboratório têm mostrado que os efeitos da corrente de retorno têm menor importância se comparada com os efeitos da corrente do raio longo. Nos cálculos aqui apresentados utilizamos somente a carga referente ao raio longo.

Tabela 5.13 – Características físicas de materiais típicos utilizados em componentes de SPDA

Grandeza Física	Descrição	Material			
		Alumínio	Aço doce	Cobre	Aço Inoxidável (*)
ρ_0 [Ωm]	<i>Resistividade a temp. ambiente</i>	$29 \cdot 10^{-9}$	$120 \cdot 10^{-9}$	$17,8 \cdot 10^{-9}$	$0,7 \cdot 10^{-6}$
α [1/K]	<i>Coefficiente de temperatura</i>	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$
γ [kg/m^3]	<i>Densidade do material</i>	2700	7700	8920	$8 \cdot 10^3$
θ_s [$^{\circ}\text{C}$]	<i>Temperatura de fusão</i>	658	1530	1080	1500
c_s [J/kg]	<i>Calor latente de fusão</i>	$397 \cdot 10^3$	$272 \cdot 10^3$	$209 \cdot 10^3$	-
c_w [J/kgK]	<i>Capacidade Térmica</i>	908	469	385	500
(*) material não magnético					

Utilizando este modelo, vamos comparar a seguir, o volume do material fundido verificado nos ensaios de simulação do raio longo nas telhas metálicas, com o volume de metal fundido calculado pelo modelo.

A maioria das perfurações ocorridas nos ensaios de simulação do raio longo tem um formato circular. Consideramos o volume de material fundido nos ensaios (V_e) como o volume de um cilindro onde “ d ” é o diâmetro aproximado da perfuração (diâmetro do cilindro) e “ e ” a espessura da chapa metálica (altura do cilindro).

$$V_e = \frac{\pi.d^2}{4}.e \quad (3)$$

Nos ensaios foram registrados os valores da tensão de arco, onde podem ser estimados os valores da queda de tensão anodo/catodo ($u_{a,c}$). As temperaturas ambientes (θ_u) durante os ensaios também foram anotadas, e a carga utilizada em cada aplicação foi também calculada. Para o cálculo do volume do metal fundido utilizamos os parâmetros descritos na Tabela 5.13 considerando a chapa metálica ensaiada como sendo uma chapa de aço doce.

Para se estimar os valores da queda de tensão anodo/catodo ($u_{a,c}$) temos que levar em conta que a distribuição da tensão em um arco elétrico se dá em três partes: a queda de tensão na base do arco no anodo, a na base do arco no catodo e a queda de tensão ao longo do arco. A queda de tensão anodo/catodo ($u_{a,c}$) tem valores típicos na faixa de 5 a 10V. Admitimos o valor de 7,5V para os cálculos apresentados a seguir.

5.1.7.1. Ensaios realizados com pulsos de corrente contínua na telha N°1 (telha metálica com camada de lã de rocha)

A telha N°1 tem uma espessura na chapa de aço de 0,7 mm e uma manta de lã de rocha com espessura 30 mm. Estamos considerando que o aço utilizado tem as características do aço doce. Utilizamos os dados descritos na Tabela 5.7 para obtermos o volume aproximado medido do material fundido em cada aplicação e o volume estimado pelo cálculo do material fundido. A Tabela 5.14 apresenta os resultados medidos e calculados.

Tabela 5.14 – Comparação do volume aproximado medido com o volume estimado por cálculo, dos danos na Telha nº 1.

Aplic.	Valor eficaz da corrente [A]	Duração da aplicação [ms]	Carga [C]	Espessura da chapa [mm]	Diâmetro aproximado medido da perfuração [mm]	Volume aproximado medido da perfuração [m³]	Volume estimado por cálculo para a perfuração [m³]
1	288	125	36,0	0,70	5	1,3744E-08	3,33E-08
2	266	263	70,0	0,70	17	1,5888E-07	6,477E-08
3	270	711	192,0	0,70	27	4,0078E-07	1,777E-07

5.1.7.2. Ensaios realizados com pulsos de corrente contínua na telha N°2 (telha metálica com enchimento de poliuretano)

A telha N°2 tem duas chapas de aço com espessura de 0,55mm cada, e está preenchida com poliuretano. Estamos considerando que o aço utilizado tem as características do aço doce e verificamos que os danos ocorreram somente na chapa superior e no enchimento.

Utilizamos os dados descritos na Tabela 5.8 para obtermos o volume aproximado medido do material fundido em cada aplicação e o volume estimado pelo cálculo do material fundido.

A Tabela 5.15 apresenta os resultados medidos e calculados.

**Tabela 5.15 – Comparação do volume aproximado medido
com o volume estimado por cálculo, dos danos na Telha nº 2.**

Aplic.	Valor eficaz da corrente [A]	Duração da aplicação [ms]	Carga [C]	Espessura da chapa [mm]	Diâmetro aproximado medido da perfuração [mm]	Volume aproximado medido da perfuração [m³]	Volume estimado por cálculo para a perfuração [m³]
1	579,6	72,3	41,9	0,55	5	1,07992E-08	4,16E-08
2	641,4	93,1	59,7	0,55	10	4,31969E-08	5,93E-08
3	644,3	163,6	105,4	0,55	15	9,7193E-08	1,05E-07
4	628,9	304,2	191,3	0,55	25	2,69981E-07	1,90E-07
5	634	490,3	310,9	0,55	28	3,38664E-07	3,09E-07

5.1.7.3. Ensaios realizados com pulsos de corrente contínua na telha N°3 (telha metálica simples)

A telha N°3 é composta por uma chapa simples metálica que tem uma espessura de 0,55mm e estamos considerando que o aço utilizado tem as características do aço doce. Utilizamos os dados descritos na Tabela 5.9 para obtermos o volume aproximado medido do material fundido em cada aplicação e o volume estimado pelo cálculo do material fundido. A Tabela 5.16 apresenta os resultados medidos e calculados.

Tabela 5.16 – Comparação do volume aproximado medido com o volume estimado por cálculo, dos danos na Telha nº 3.

Aplic.	Valor eficaz da corrente [A]	Duração da aplicação [ms]	Carga [C]	Espessura da chapa [mm]	Diâmetro aprox. medido da perfuração [mm]	Volume aproximado medido da perfuração [m³]	Volume estimado por cálculo para a perfuração [m³]
1	658	84,5	55,6	0,55	10	4,31969E-08	5,52249E-08
2	656	91,7	60,2	0,55	11	5,22682E-08	5,97483E-08
3	650	150	97,5	0,55	15	9,7193E-08	9,68405E-08
4	653	257	167,8	0,55	20	1,72788E-07	1,66686E-07
5	642	358	229,8	0,55	25	2,69981E-07	2,28281E-07
6	640	540,5	345,9	0,55	35	5,29162E-07	3,4358E-07

5.1.7.4. Análise dos resultados obtidos no estudo dos danos devidos aos efeitos térmicos no ponto de impacto das descargas.

Analisando-se os resultados descritos nas Tabelas 5.14, 5.15, e 5.16, verificamos que os valores dos volumes dos materiais fundidos calculados e medidos foram razoavelmente próximos, principalmente para a Telha Nº 3, onde o material envolvido é somente a folha metálica de aço. Nos outros casos, além do material metálico, há o material isolante que faz parte do material fundido, porém não foi contabilizado nos cálculos. De qualquer forma, o modelo pode ser utilizado, desde que se saiba a composição, mesmo que aproximada, do material metálico. Com este modelo é possível estimar eventuais danos em folhas metálicas atingidas pelas descargas atmosféricas.

5.2. PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM EDIFICAÇÕES QUE UTILIZAM TELHAS DE CONCRETO PROTENDIDO PARA SUA COBERTURA

As telhas de concreto protendido são usualmente utilizadas para coberturas de edificações com longos vãos. Estas telhas possuem, internamente, cabos de aço para a sua sustentação mecânica. Para a proteção de edifícios com este tipo de cobertura, geralmente, utiliza-se uma malha de cabos de cobre nu, com dimensões especificadas na norma NBR 5419 [23]. Esta malha é instalada, geralmente, a uma distância aproximada de 20 centímetros da telha e suspensa por isoladores apropriados. Se uma descarga atmosférica atingir a malha de captação, algum ponto desta pode ter seu potencial elétrico elevado a um valor tal, que pode originar uma descarga disruptiva entre os condutores da malha e a telha, podendo, eventualmente, perfurar a camada de concreto que cobre o cabo de aço, expondo-o às intempéries. O cabo de aço pode sofrer corrosão, comprometendo a rigidez mecânica da telha. Foram realizadas experiências de laboratório [39], com o objetivo de determinar as tensões de impulso capazes de perfurar um trecho de telha de concreto protendido. Além destes, foram realizados ensaios de tensão disruptiva (V50%) em um isolador sobre a telha e sobre uma placa metálica para verificar eventuais diferenças nos valores de V50% e, assim, um aumento de isolamento ou não.

Foram realizados também ensaios com impulsos de corrente, com o objetivo de relacionar o tamanho do dano com os valores de corrente.

5.2.1 Ensaio de tensão de impulso atmosférico

Foi utilizado na execução do ensaio de tensão de impulso atmosférico, um gerador de impulsos de tensão de 90 kJ, 1200 kV.

Para a realização do ensaio, a telha foi colocada em uma base de isoladores com 2m de altura e toda sua ferragem interna foi aterrada. A Figura 61 mostra detalhes da ligação da ferragem interna da telha ao aterramento.

Figura 61: Detalhe da ligação da ferragem interna da telha de concreto protendido ao aterramento

Foram aplicados três impulsos de tensão de polaridade positiva através de uma barra de alumínio, de seção 35 mm x 2 mm, colocada diretamente sobre a telha. A cada aplicação, deslocou-se a barra de maneira que o estrago provocado pelo impulso anterior não fosse afetado pela aplicação seguinte.

A forma de onda do impulso foi de 1,2 x 54 μ s. Os valores prospectivos de crista foram 100 kV, 60 kV e 800 kV, observando-se a disrupção elétrica entre a barra e a ferragem da telha com 69 kV, 49 kV e 125 kV, respectivamente. Alguns dos estragos provocados pelas disrupções estão registrados nas Figuras 62 e 63.

Figura 62 – Detalhe do eletrodo e do dano para tensão prospectiva de 800kV

Figura 63 - Detalhe do dano (na lateral) para tensão prospectiva de 60 kV.

Neste ensaio (Figuras 62 e 63), observou-se que, dependendo da construção da telha de concreto protendido, o nível de tensão de impulso necessário para a perfuração da camada de concreto é bastante baixo, podendo ser menor que 50 kV.

5.2.2 Comparação da tensão disruptiva de um isolador sobre a telha e sobre uma placa metálica

O objetivo desse ensaio foi verificar se há diferença significativa na tensão disruptiva de um isolador, quando este valor é obtido através de um ensaio normalizado (como o isolador sobre uma folha metálica) e quando o ensaio é realizado sobre a telha (Figuras 64 e 65).

Figura 64 - Ensaio realizado em isolador sobre chapa metálica

Figura 65 - Ensaio realizado em isolador sobre a telha

O ensaio de descarga disruptiva a 50% com impulso atmosférico foi, então, realizado em duas situações: a primeira sobre uma placa metálica e a segunda sobre a telha. Utilizou-se o método de acréscimos e decréscimos de acordo com a IEC 60060.1-1989 [69], com 20 aplicações de impulso atmosférico normalizado em cada polaridade.

A Tabela 5.17 apresenta os resultados destes ensaios.

Tabela 5.17 – Resultados dos ensaios no isolador sobre a telha e sobre uma chapa metálica

	Tensão ($V_{50\%}$)	
	Polaridade +	Polaridade -
Placa Metálica	113 kV	177 kV
Telha	120 kV	175 kV
Diferença (%)	6,2 %	1,7 %

Analisando-se estes resultados, verifica-se que, para impulsos de polaridade negativa, a telha de concreto protendido comporta-se praticamente como um plano condutor. Para a polaridade positiva, há um pequeno aumento na tensão disruptiva a 50% nos ensaios sobre a telha, porém não se pode afirmar uma melhoria na isolação nestas condições.

5.2.3 Ensaio de impulso de corrente

O ensaio foi realizado com um gerador de impulsos de 600 kV, 45 kJ.

O procedimento de ensaio foi semelhante ao de tensão de impulso atmosférico. A telha foi colocada sobre uma base isolada, com toda sua ferragem aterrada.

Foram aplicados 8 impulsos de corrente, sendo o eletrodo, uma esfera metálica, de 40 mm de diâmetro, colocada diretamente sobre a telha. Nesse caso, a esfera também foi deslocada a cada aplicação para não interferir no resultado da aplicação anterior.

A forma de onda do primeiro ciclo de polaridade positiva dos impulsos de corrente foi de $9,5 \times 20 \mu\text{s}$ (ver Figura 66). Verificaram-se reversões na onda devido às características do circuito utilizado, sendo este um circuito R, L, C super amortecido e, neste caso, o resistor utilizado não tinha o valor suficiente para evitar esta reversão.

Figura 66 – Oscilograma de corrente

Tentou-se correlacionar o tamanho dos estragos com o nível de corrente, porém o que se notou foi que o tamanho do estrago depende do projeto da telha, mais exatamente da camada de concreto entre a superfície da telha e a ferragem no ponto da descarga (ver Figuras 67 e 68).

Figura 67 – Montagem para ensaio de impulso de corrente.

Figura 68 – Ensaio de impulsos de corrente – detalhe do dano.

5.2.4. Análise dos resultados obtidos nos ensaios nas telhas de concreto protendido

Os ensaios realizados no pedaço de telha de concreto protendido mostraram que, em termos de tensão, com níveis relativamente baixos, considerando-se surtos atmosféricos inferiores a 50 kV, já é possível a ocorrência de perfurações, com danos no concreto. Os ensaios mostraram também que este tipo de telha pode apresentar uma característica de um plano condutor, eletricamente falando, e que valores de correntes relativamente baixos, da ordem de 5 kA de pico, já são suficientes para danos na camada de concreto, que podem ser maiores ou menores, dependendo do caminho que a descarga percorre no concreto para atingir a ferragem aterrada.

5.2.5 Recomendações especiais para projetos de proteção contra descargas atmosféricas para edificações com telhados de concreto protendido

Tendo em vista este problema de eventuais descargas disruptivas entre o sistema de proteção e a ferragem de sustentação das telhas de concreto protendido, quando o SPDA for atingido por uma descarga atmosférica, é recomendável que as edificações, que possuam este tipo de telhado, sejam protegidas de forma especial, conforme a seguir.

5.2.5.1 Edificações com até 60 metros de largura

Recomenda-se utilizar nestas edificações proteção externa composta por postes laterais ao edifício. As alturas e as posições dos postes devem ser calculadas pelo Método Eletrogeométrico (EGM). Considerando nível de proteção III, há uma probabilidade de falha de 10%, ou seja, descargas de correntes de crista, iguais ou inferiores a 10 kA poderão atingir o telhado da edificação. Neste caso, podem ser tomadas as seguintes decisões: instalar uma malha captora de 10 m x 10 m. sobre o telhado, isolada deste com isoladores com distância de isolamento mínima de 5 centímetros, ou inspecionar o telhado sempre que houver notícia de queda de descarga, além da inspeção anual obrigatória. Se o concreto for danificado, corrigir o dano utilizando concreto impermeável.

5.2.5.2 Edificações muito largas (100 a 200 metros de largura)

Instalar postes laterais e malhas com projeto combinado, sendo os postes dimensionados pelo modelo EGM e as malhas pelo método de Faraday. Os postes devem dar proteção para descargas de maior intensidade (por exemplo, maiores que 20 ou 25 kA) e as malhas deverão receber as descargas de menor intensidade. As malhas deverão estar apoiadas em isoladores com distâncias de isolamento que evitem descargas que possam danificar as telhas. O cálculo destas distâncias deve ser feito levando em conta as tensões geradas ao longo dos condutores pela corrente que passa por eles.

Recomenda-se também interligar o sistema de proteção com a ferragem de todas as colunas de sustentação do edifício.

5.3. VERIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DA DESCARGA AO ATINGIREM AS EDIFICAÇÕES

Saber como a corrente da descarga atmosférica se distribui no SPDA, ao atingir uma estrutura, é muito importante. Ainda mais se o subsistema de descida, em questão, é aquele que utiliza as ferragens das colunas de concreto, pois a corrente irá se subdividir nos vários ramos da estrutura. Para alguns casos mais comuns, foram desenvolvidos cálculos, inicialmente na mesma linha dos trabalhos desenvolvidos na década de 90 (os trabalhos do Sowa [47], [48], [70] e do Sartori e Cardoso [45], [71]), onde não se consideravam as reflexões das ondas nas ferragens e, em seguida, considerando estas reflexões, uma vez que os fenômenos envolvidos possuem parâmetros de altas frequências e velocidades da ordem da velocidade da luz, e assim, ao mudarem de meio encontrando impedâncias características diferentes, ocorrem reflexões e transmissões e estas devem ser levadas em consideração.

Sabendo-se a porcentagem da corrente que passa por cada ramo ou descida do SPDA, podem-se calcular as tensões que aparecem nestes condutores e também estimar eventuais danos que estas tensões e/ou correntes possam acarretar nas estruturas.

Este estudo inicial, baseado nos fluxos magnéticos gerados pelas correntes das descargas, foi importante para a verificação dos parâmetros mais significativos a serem considerados e mostrou um tipo de metodologia para este tipo de estudo. O estudo, baseado na teoria das linhas de transmissão, onde se consideram as reflexões e impedâncias características, é mais completo e representa melhor a realidade. É apresentado a seguir, um resumo dos resultados obtidos no

estudo inicial para alguns casos simulados, sendo que, no apêndice A, os detalhes do desenvolvimento realizado.

5.3.1 Cálculo de tensões em condutores de descida, sem considerar as reflexões.

Considerando-se edificações, que utilizam o Método de Faraday para proteção contra descargas atmosféricas e/ou a ferragem da estrutura como parte integrante do sistema de proteção, foi desenvolvido um método de cálculo, utilizando o MATLAB para a determinação da distribuição da corrente da descarga nos condutores de descida (ferragens ou cabos de cobre) e também para a determinação da tensão ao longo dos condutores do SPDA. Foram estudados dois tipos de estruturas: inicialmente, uma de forma de cubo representando um edifício com um sistema de proteção, composto por uma malha captora, correspondendo a um condutor fixado nas arestas superiores, sendo as arestas laterais, as quatro descidas e o aterramento (ver Figura 69); e uma outra estrutura, um pouco mais complexa, com um número maior de descidas como se fosse composta por quatro cubos justapostos (malha captora composta por quatro quadrados e nove descidas).

No caso 1 (edificação em forma de cubo) foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Comprimento de cada aresta: 24 metros
- Variação da corrente: 100kA/ μ s
- Seção dos condutores de descida: 35 mm²
- Corrente da descarga: modelo descrito na equação (A13) e Tabela A.1, inclusos no Apêndice A

Fig. 69 – Estrutura em forma de cubo: descidas e pontos onde foram calculadas as tensões

Os resultados são apresentados a seguir:

- Distribuição da corrente:

Descida 1: 58,3%

Descida 2: 16,7%

Descida 3: 8,3%

Descida 4: 16,7%

- Cálculo das tensões:

Ponto V1: 3500 kV

Ponto V2: 1000 kV

Ponto V3: 500 kV

Ponto V4: 1000 kV

No caso 2 (edificação com 9 descidas e a descarga atingindo o centro – V_{22} conforme Figura 70), foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Comprimento de cada aresta: 10 metros (considerando 4 cubos justapostos)

- Variação da corrente: foram simulados quatro valores – 10 kA/ μ s – 30 kA/ μ s – 50 kA/ μ s – 100 kA/ μ s
- Seção dos condutores de descida: 35 mm²
- Corrente da descarga: modelo descrito na equação (A13) e Tabela A.1, inclusos no Apêndice A

Fig. 70 – Estrutura mais complexa: descidas e pontos onde foram calculadas as tensões

Os resultados são apresentados a seguir:

- Distribuição da corrente:
 Descidas 11; 13; 31 e 33: 2,9%
 Descidas 12; 21; 23 e 32: 11,8%
 Descida 22: 40,9%
- Cálculo das tensões (para 100 kA/ μ s):
 Pontos V₁₁; 13; 31 e 33: 74,8 kV
 Pontos V₁₂; 21; 23 e 32: 296,4 kV
 Ponto V₂₂: 1026,6 kV

- Tensões máximas para outras variações de corrente (todas em V_{22}):

Para 50 kA/ μ s: 513 kV

Para 30 kA/ μ s: 308 kV

Para 10 kA/ μ s: 103 kV

No caso 3 (edificação com 9 descidas e a descarga atingindo o canto – V_{31} conforme Figura 70), foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Comprimento de cada aresta: 10 metros (considerando 4 cubos justapostos)
- Variação da corrente: foram simulados quatro valores – 10 kA/ μ s – 30 kA/ μ s – 50 kA/ μ s – 100 kA/ μ s
- Seção dos condutores de descida: 35 mm²
- Corrente da descarga: modelo descrito na equação (A13) e Tabela A.1, inclusos no Apêndice A

Os resultados são apresentados a seguir:

- Distribuição da corrente:

Descidas 11 e 33: 5,0%

Descidas 12 e 23: 2,3%

Descida 22: 3,1%

Descida 13: 2,4%

Descidas 21 e 32: 11,8%

Descida 31: 56,2%

- Cálculo das tensões (para 100 kA/ μ s):

Pontos V_{11} e 33 : 126 kV

Pontos V_{12} e 23 : 59 kV

Ponto V_{13} : 61 kV

Ponto V_{22} : 78 kV

Pontos V_{21} e 32 : 295 kV

Ponto V_{31} : 1410 kV

- Tensões máximas para outras variações de corrente (todas em V_{31}):

Para 50 kA/ μ s: 705 kV

Para 30 kA/ μ s: 423 kV

Para 10 kA/ μ s: 141 kV

No caso 4 (edificação com 9 descidas sendo cada uma composta por 4 condutores e a descarga atingindo o centro – V_{22} conforme Figura 70), foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Comprimento de cada aresta: 10 metros (considerando quatro cubos justapostos)
- Variação da corrente: foram simulados dois valores – 50 kA/ μ s - 100 kA/ μ s
- Seção dos condutores de descida: 35 mm² (seção de cada condutor do feixe de 4 condutores por coluna)
- Corrente da descarga: modelo descrito na equação (A13) e Tabela A.1, inclusos no Apêndice A

Esta simulação é idêntica à do caso 2, com a diferença que cada descida foi considerada como sendo uma coluna com 4 ferragens em paralelo.

Os resultados são apresentados a seguir:

- Distribuição da corrente:

Descidas 11; 13; 31 e 33: 1,7%

Descidas 12; 21 23 e 32: 4,2%

Descida 22: 77%

- Tensões máximas para duas variações de corrente (todas em V_{22}):

Para 100 kA/ μ s: 481 kV

Para 50 kA/ μ s: 240 kV

Os resultados apresentados neste estudo inicial não consideraram as reflexões, e referem-se apenas às condições descritas. Estes resultados mostram que a maior parte da corrente flui pelo condutor de descida mais próximo do ponto de impacto e neste ponto aparecerá o maior nível de tensão.

5.3.2 Cálculo de tensões em condutores de descida, considerando as reflexões.

5.3.2.1 Reflexão de ondas em junções - considerações teóricas:

Quando uma onda trafegante em uma linha de transmissão encontra uma junção com outra linha ou com uma terminação, parte da onda incidente é refletida e parte é transmitida. As ondas

incidente, refletida e transmitida são originadas de acordo com a Lei de Kirchhoff (ver Figura 71).

Figura 71 – Ondas incidente, transmitida e refletida.

As correntes transmitidas e refletidas são determinadas a partir dos coeficientes de reflexão (β) e transmissão (α) da junção, definidos a seguir:

$$\beta = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

$$\alpha = (1 - \beta) \quad (5)$$

onde Z é a impedância característica, ou de surto do condutor, dada por:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

Calculamos agora, a corrente resultante de uma descarga atmosférica, trafegando por um condutor de descida aterrado ($Z_g = 0$ e $\beta = 1$) – ver Figura 72.

Figura 72 - Condutor Aterrado – Ondas incidente e refletida

Utilizaremos o modelo de Heidler, para a descarga atmosférica descontaminada (sem efeito das reflexões) [72], cuja forma de onda é composta pela soma de duas funções:

$$i_0(h, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t / \tau_1)^N}{1 + (t / \tau_1)^N} \exp(-t / \tau_2) \quad (7)$$

$$\eta = \exp \left[- \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right) \left(N \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1/N} \right] \quad (8)$$

Onde I_0 é a amplitude da corrente da base do canal, τ_1 é a constante de tempo para a frente de onda, τ_2 é a constante de tempo do decaimento da onda, η é o fator de correção da amplitude e N é um expoente entre 2 e 10.

A Tabela 5.18 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para simulação da corrente incidente descontaminada (sem o efeito das reflexões) [72].

Tabela 5.18 - Parâmetros da função de Heidler que reproduzem uma corrente de retorno subsequente típica incidente, sem contaminação (sem efeito das reflexões).

Parâmetro	Descrição	Valor
I_{01} (kA)	Amplitude da corrente da base do canal para a onda 01	10.7
τ_{11} (μs)	Constante de tempo para a frente de onda 01	0.25
τ_{21} (μs)	Constante de tempo do decaimento da onda 01	2.5
I_{02} (kA)	Amplitude da corrente da base do canal para a onda 02	6.5
τ_{12} (μs)	Constante de tempo para a frente de onda 02	2.1
τ_{22} (μs)	Constante de tempo do decaimento da onda 02	230

A Figura 73 mostra o oscilograma da onda incidente e da corrente calculada na simulação com a reflexão.

A soma das duas funções, com os parâmetros descritos na Tabela 5.18 e utilizando-se o expoente N igual a 2, produz uma onda com um tempo de frente relativamente pequeno, ou seja, uma taxa de variação de corrente bastante alta, o que faz com que esta corrente represente bem uma corrente de retorno subsequente. Utilizamos este tipo de onda, pois com um dI/dt alto, os efeitos das reflexões são mais críticos.

Figura 73 – Oscilograma da onda incidente da corrente calculada na simulação com reflexão – Condutor aterrado.

Agora calcularemos a corrente em um condutor de descida com terminação em aberto ($Z_2 = \infty$ e $\beta = -1$), conforme pode ser visto na Figura 74:

Figura 74: Oscilograma da onda incidente e da corrente calculada na simulação com reflexão – Condutor em aberto.

Para estas duas simulações, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- comprimento do condutor = 200m
- ponto de medição de corrente = 100m
- velocidade de propagação da onda considerada = 300m/μs

A seguir, apresentamos o cálculo da corrente de reflexão em uma torre de 248m, atingida por uma descarga atmosférica. A velocidade de propagação considerada foi de 300m/μs (velocidade da luz) e a impedância de aterramento foi de 10 Ω. Os oscilogramas podem ser analisados na Figura 75.

Figura 75 – Oscilograma da onda incidente e da corrente calculada na simulação com reflexão – Impedância de aterramento de 10 Ω.

Nas três simulações apresentadas, foi utilizado o programa MATLAB. Para o caso da torre com 248 metros, foi feita uma comparação com os resultados obtidos, utilizando-se o programa PSPICE. Esta comparação pode ser vista na Figura 76.

Figura 76 – Comparação MATLAB x PSPICE – Caso de uma torre de 248 metros.

Nesta comparação, o oscilograma “com bolinhas” representa a descarga atmosférica descontaminada, ou seja, sem os efeitos das reflexões no topo e na base da torre. O oscilograma “com pequenos triângulos” corresponde à corrente calculada pelo MATLAB na base da torre, e o oscilograma “sem marcações” corresponde à corrente calculada pelo PSPICE na base da torre.

Na simulação da torre em PSPICE, utilizamos o modelo da Figura 77:

Figura 77 – Modelo utilizado para simulação da torre em PSPICE

A diferença existente entre os picos da corrente nas duas simulações é devido ao modelo do canal da descarga atmosférica utilizado, modelado no PSPICE como uma resistência de $3000\ \Omega$.

5.3.2.2. Reflexões e transmissões em junções tipo T:

Considerando uma junção, onde existe uma conexão entre mais de dois condutores, como na Figura 78, podemos verificar que a onda incidente terá uma parte refletida e a parte transmitida dividida em duas partes.

Figura 78 – Ondas em junção tipo T.

Neste caso, as linhas 2 e 3 comportam-se como se as suas impedâncias características fossem conectadas em paralelo, podendo ser representadas como na Figura 79.

Figura 79 – Representação utilizada para junção tipo T com as impedâncias em paralelo.

Considerando os valores a seguir, podemos realizar a seguinte simulação, ainda utilizando o MATLAB:

- $Z_1 = 300 \, \Omega$
- $Z_2 = Z_3 = 300 \, \Omega$
- Velocidade da onda = $300\text{m}/\mu\text{s}$

A Figura 80 apresenta a corrente com reflexão em Z_1 e a Figura 81, as correntes em Z_2 e Z_3 .

Figura 80: Corrente em Z1

Figura 81: Corrente em Z2 e Z3

Para facilitar o cálculo das distribuições de correntes existentes na estrutura, pode-se determinar a impedância característica equivalente da associação entre os condutores. Por exemplo, a Figura 82 apresenta um modelo para uma junção T em PSPICE:

Figura 82 – Modelo utilizado para simulação de uma junção tipo T

T1, T2 e T6 é o modelo de linha de transmissão ideal sem perdas para três condutores, com as seguintes características:

- Linha 1:
 - comprimento = 10m
 - impedância característica = $68 \, \Omega$
- Linha 2:
 - comprimento = 20m
 - impedância característica = $68 \, \Omega$
- Linha 6:
 - comprimento = 20m
 - impedância característica = $36.5 \, \Omega$

Calculando a impedância característica equivalente, podemos utilizar o seguinte modelo no PSPICE (ver Figura 83) para a simulação:

Figura 83 – Modelo utilizado considerando a impedância característica equivalente

Onde T2 é obtida da associação das linhas em paralelo da junção T. Sua impedância característica é de 23.7Ω , que é o resultado da associação em paralelo de Z2 e Z6.

Obtivemos então os seguintes gráficos de correntes apresentados na Figura 84.

Figura 84 – Oscilogramas obtidos na simulação.

A curva em amarelo (nas cópias em branco e preto, este gráfico corresponde à onda com bolinhas) representa o modelo de Heidler para a corrente de retorno subsequente, utilizado na fonte de corrente. A curva em rosa (nas cópias em branco e preto, este gráfico corresponde à onda com triângulos) foi obtida através da soma das correntes em T2 e T6 do primeiro modelo

esquemático do PSPICE e a curva em azul (nas cópias em branco e preto, este gráfico corresponde à onda sem marcações) representa a corrente da associação de T2 e T6. Como as duas curvas obtidas (as curvas em azul e em rosa) possuem uma boa aproximação, podemos utilizar o conceito de impedância equivalente para o cálculo de distribuições de corrente em estruturas.

5.3.2.3 Reflexões em sistemas de proteção de uma edificação

Consideremos o seguinte sistema de proteção de uma construção, onde J_p é a corrente da descarga atmosférica e J_1 a J_4 são as correntes medidas com reflexão em cada condutor vertical aterrado. Este é o mesmo exemplo utilizado nos cálculos sem reflexão, representando uma estrutura em forma de cubo e a descarga atingindo um dos cantos (ver Figura 69).

Em uma primeira simulação, iremos utilizar as seguintes dimensões: 20m x 20m x 20m.

Utilizamos, como condutores de descida, as ferragens de uma coluna de concreto armado. Dessa forma, algumas considerações são feitas:

- A velocidade de propagação da descarga atmosférica no concreto armado foi considerada constante e igual a 1/3 da velocidade da luz, calculada pela expressão:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}} \quad (9)$$

Sendo, $\mu_r=1$ e $\epsilon_r=9$, aproximadamente.

Adotamos a velocidade de propagação da onda no concreto armado como 1/3 da velocidade da luz, apesar de não ter encontrado na literatura científica um consenso em relação a este valor (há

quem defenda que esta velocidade pode ser de 3 a 9 vezes menor do que se a ferragem estivesse no ar; ou que, para camadas de concreto da ordem de centímetros, a velocidade é a mesma que no ar; ou que esta velocidade depende muito dos outros componentes próximos ao condutor, por exemplo, outras ferragens muito próximas). Como a maioria dos trabalhos, que se referem à velocidade de uma onda, em um condutor instalado no solo, considera que esta onda viaja a uma velocidade aproximadamente igual a 1/3 da velocidade da luz e considerando os materiais utilizados na formação do concreto (água, pedra, cimento e areia), adotamos este valor para as nossas simulações.

- A impedância característica adotada foi de aproximadamente 68Ω , constante, calculada pela seguinte expressão, válida para cabos coaxiais:

$$Z_0 = \left(\frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \log \frac{R}{r} \quad (10)$$

Onde:

- r = raio do condutor embutido no concreto, em metros.
- R = distância do condutor embutido no concreto até a sua imagem em relação à superfície do dielétrico, isto é, duas vezes a distância do condutor embutido no concreto à superfície do concreto.
- ϵ_r = constante dielétrica, relativa do dielétrico (concreto) que existe entre o condutor embutido e a superfície do concreto.

Para um condutor de 35mm^2 ($r=3.34\text{mm}$) e $R=0.1\text{m}$, a impedância característica é de aproximadamente 68Ω (valor já utilizado nas simulações anteriores).

Como
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (11)$$

e
$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (12),$$

Obtemos os valores de L e C, para o modelo de linha de transmissão ideal, sem perdas:

$$L = 0.68 \mu\text{H/m}$$

$$C = 0.147 \text{ nF/m}$$

Assim podemos montar o modelo no PSPICE apresentado na Figura 85

Figura 85 – Modelo utilizado para a estrutura em forma de cubo.

Para estas condições, obtivemos a distribuição da corrente apresentada, em forma de gráfico, na

Figura 86.

Figura 86 – Distribuição das correntes considerando as reflexões.

Considerando-se agora uma impedância de aterramento com um valor igual a $10\ \Omega$, podemos complementar o modelo, conforme a Figura 87.

Figura 87 – Modelo utilizado com a inclusão da resistência de aterramento.

Nestas condições, a distribuição das correntes se dá conforme apresentado na Figura 88.

Figura 88 – Distribuição das correntes, considerando as reflexões e a resistência de aterramento.

Diversos resultados das simulações, considerando uma resistência de aterramento de $10\ \Omega$, são apresentados na Tabela 5.19, para propagação da corrente em condutor de ferro embutido em concreto, para diversas dimensões de estruturas em forma de cubo.

Tabela 5.19 – Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Com resistência de aterramento de $10\ \Omega$

Corrente injetada no ponto P	Medidas da estrutura (m)	Valor máximo da tensão	Valor de pico da corrente (%)
Função de Heidler	24x24x24	Ponto V1: 389 kV	Condutor J1: 58
		Pontos V2 = V4: 260 kV	Condutor J2=J4: 39
		Ponto V3: 346 kV	Condutor J3: 49
	20x20x20	Ponto V1: 374 kV	Condutor J1: 57
		Pontos V2 = V4: 249 kV	Condutor J2=J4: 55
		Ponto V3: 331 kV	Condutor J3: 47
	10x10x10	Ponto V1: 269 kV	Condutor J1: 53
		Pontos V2 = V4: 180 kV	Condutor J2=J4: 35
		Ponto V3: 232 kV	Condutor J3: 34
	5x5x5	Ponto V1: 181 kV	Condutor J1: 42
		Pontos V2 = V4: 123 kV	Condutor J2=J4: 27
		Ponto V3: 135 kV	Condutor J3: 25
	2x2x2	Ponto V1: 65 kV	Condutor J1: 29
		Pontos V2 = V4: 46 kV	Condutor J2=J4: 23
		Ponto V3: 46 kV	Condutor J3: 24

Os resultados das simulações, considerando a corrente propagando em condutor de ferro no ar e uma resistência de aterramento de 10 Ω , são apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Com corrente propagando no ferro no ar

Corrente injetada no ponto P	Medidas (m)	Valor máximo da tensão	Valor de pico da corrente (%)
Função de Heidler	24x24x24	Ponto V1: 909 kV	Condutor J1: 52
		Pontos V2 = V4: 597 kV	Condutor J2=J4: 31
		Ponto V3: 734 kV	Condutor J3: 28
	20x20x20	Ponto V1: 778 kV	Condutor J1: 50
		Pontos V2 = V4: 510 kV	Condutor J2=J4: 28
		Ponto V3: 602 kV	Condutor J3: 26
	10x10x10	Ponto V1: 405 kV	Condutor J1: 43
		Pontos V2 = V4: 258 kV	Condutor J2=J4: 24
		Ponto V3: 247 kV	Condutor J3: 21
	5x5x5	Ponto V1: 188 kV	Condutor J1: 38
		Pontos V2 = V4: 108 kV	Condutor J2=J4: 24
		Ponto V3: 94 kV	Condutor J3: 26
	2x2x2	Ponto V1: 80 kV	Condutor J1: 32
		Pontos V2 = V4: 48 kV	Condutor J2=J4: 25
		Ponto V3: 44 kV	Condutor J3: 24

Consideramos agora uma estrutura mais complexa com 9 descidas, composta por condutores de 35mm^2 cada (dimensões de cada reticulado: 10x10x10), mesma estrutura estudada no exemplo sem reflexão, ou seja, como se fossem quatro cubos de aresta de 10 metros justapostos e a descarga atingindo o centro da edificação conforme a Figura 89.

Figura 89 – Estrutura com nove descidas e a descarga atingindo o centro.

Os resultados são apresentados em forma de gráfico, conforme a Figura 90.

Figura 90 – Resultados das simulações realizadas na estrutura da Figura 89.

Para este caso, as simulações foram feitas para duas estruturas diferentes, uma considerando quatro cubos justapostos de dimensões 10 x 10 x 10 m. e uma outra menor com quatro cubos justapostos de dimensões 5 x 5 x 5 m. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Estrutura mais complexa – descidas simples

Corrente injetada no ponto P	Dimensões do reticulado (m)	Valor máximo da tensão	Valor de pico da corrente (%)
Função de Heidler	(10x10x10)	Ponto 1: 159 kV	Condutor 1: 29
		Ponto 2: 83 kV	Condutor 2: 18
		Ponto 3: 105 kV	Condutor 3: 15
	(5x5x5)	Ponto 1: 107 kV	Condutor 1: 23
		Ponto 2: 62 kV	Condutor 2: 13
		Ponto 3: 67 kV	Condutor 3: 12

Como foi feito nas simulações nas quais não foram consideradas as reflexões, considerando-se quatro condutores em cada descida para a formação da coluna de concreto, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Estrutura mais complexa – descidas composta por colunas com quatro condutores

Corrente injetada no ponto P	Dimensões do reticulado (m)	Valor máximo da tensão	Valor de pico da corrente (%)
Função de Heidler	(10x10x10)	Ponto 1: 40 kV	Condutor 1: 17
		Ponto 2: 25 kV	Condutor 2: 12
		Ponto 3: 27 kV	Condutor 3: 12
	(5x5x5)	Ponto 1: 28 kV	Condutor 1: 13
		Ponto 2: 20 kV	Condutor 2: 11
		Ponto 3: 21 kV	Condutor 3: 11

Considerando agora, que o raio atingiu o ponto 1, na estrutura com um condutor de descida em cada aresta, conforme o desenho da Figura 91, os resultados das simulações estão apresentados em forma de gráficos na Figura 92, considerando-se uma resistência de aterramento de $10\ \Omega$.

Figura 91 – Modelo da estrutura estudada – Descarga atingindo o canto – Pontos onde foram medidas as tensões.

Figura 92 – Resultados da simulação realizada

Para este caso, a distribuição da corrente e os valores da tensão nos pontos marcados na Figura 91, estão apresentados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Valores máximos de tensão e distribuição das correntes – Estrutura mais complexa – descidas simples com a descarga atingindo o canto

Corrente injetada no ponto P	Dimensões do reticulado (m)	Valor máximo da tensão	Valor de pico da corrente (%)
Função de Heidler	(10x10x10)	Ponto 1: 264 kV	Condutor 1: 45
		Ponto 2: 131 kV	Condutor 2: 21
		Ponto 3: 104 kV	Condutor 3: 16
		Ponto 4: 87 kV	Condutor 4: 13
		Ponto 5: 95 kV	Condutor 5: 14
		Ponto 6: 125 kV	Condutor 6: 18
	(5x5x5)	Ponto 1: 169 kV	Condutor 1: 35
		Ponto 2: 81 kV	Condutor 2: 16
		Ponto 3: 63 kV	Condutor 3: 12
		Ponto 4: 53 kV	Condutor 4: 11
		Ponto 5: 56 kV	Condutor 5: 11
		Ponto 6: 68 kV	Condutor 6: 11

5.3.3 Análise das simulações realizadas

Neste trabalho foram avaliadas três configurações básicas, a estrutura em forma de cubo com a descarga atingindo um dos cantos, como a mostrado na Figura 69, a estrutura mais complexa (quatro cubos justapostos) com a descarga atingindo o centro da edificação, como mostrado nas Figuras 70 e 89, e esta mesma estrutura, com a descarga atingindo um dos cantos, como nas Figuras 70 e 91.

5.3.3.1 Análise das simulações realizadas na estrutura em forma de cubo.

Nas simulações realizadas, na estrutura em forma de cubo, sem considerar as reflexões, para os parâmetros utilizados (descarga com os parâmetros da Tabela A.1, cubo de 24 x 24 x 24 metros, cabos de bitola 35 mm², variação da corrente de 100kA/μs, entre outros), verificou-se que a maior parte da corrente flui pelo condutor da descida mais próxima do ponto que foi atingido pela descarga. Aproximadamente 58% da corrente flui por esta descida, 17% em cada uma das descidas nos outros cantos subseqüentes e aproximadamente 8% no canto diametralmente oposto ao canto atingido pela descarga.

Ainda com os parâmetros utilizados, verificaram-se, nesta simulação, tensões da ordem de 3.500 kV no condutor de descida em um ponto mais próximo do ponto que foi atingido pela descarga. Nos outros pontos, foram verificados valores de tensão de aproximadamente 1000 kV e 500 kV que já são valores extremamente altos, que podem originar facilmente descargas disruptivas entre pontos da estrutura, ou próximos a ela, que estejam em outro potencial elétrico. Estas descargas disruptivas podem ocasionar vários tipos de danos nos locais onde ocorrerem.

Considerando-se agora as reflexões, em função dos programas utilizados, outras considerações foram usadas nas simulações: as dimensões da estrutura (simuladas várias dimensões), a velocidade da propagação da descarga no concreto armado (simuladas também para condutores no ar), os valores da impedância característica (cálculo válido para cabos coaxiais), a resistência de aterramento (cálculos para R=0 e R=10 Ω), além da equação utilizada para representação de descarga atmosférica (modelo de Heiddler com os parâmetros da Tabela 5.18 que representa bem uma corrente de retorno subseqüente típica).

As simulações foram iniciadas utilizando o programa MATLAB, para casos mais simples (torre sendo atingida pela descarga), os quais foram comparados com as simulações utilizando o

PSPICE, em que verificamos uma semelhança muito grande entre os resultados, exceto por algumas diferenças entre os valores de pico, pelo fato que, no PSPICE, o canal da descarga foi modelado como uma resistência de $3000\ \Omega$. Assim, pela facilidade de montagem dos circuitos e apresentação dos resultados, optamos por utilizar o PSPICE para as simulações que se seguiram.

Para a estrutura em forma de cubo, inicialmente, considerou-se uma resistência de aterramento igual a zero, obtendo-se as ondas da Figura 86. Para ficarmos mais próximo da realidade, incluímos uma resistência de $10\ \Omega$ em cada descida e os resultados estão descritos na Tabela 5.19. Nesta tabela, podemos verificar a distribuição das correntes, considerando estruturas de diversas dimensões (arestas de 24, 20, 10, 5 e 2 metros), sendo a propagação das ondas em condutor de ferro embutido em concreto. Verificamos também, os valores máximos de tensões referentes às condições simuladas.

Analisando-se os resultados da Tabela 5.19, verificamos que, para as estruturas maiores, ou seja, em torno de 24 ou 20 metros, os efeitos das reflexões são maiores, devido ao comprimento de condutores maiores, o que já era esperado. Estes efeitos são demonstrados em maiores percentuais dos valores de pico das correntes. No caso de estruturas muito pequenas, não é significativo o efeito da reflexão, como se pode verificar no exemplo com aresta de 2 metros. Neste caso, além de se verificar que o efeito da reflexão nos valores de pico da corrente é pequeno, praticamente a corrente se divide igualmente pelos condutores de descida, uma vez que estes são bastante curtos e a impedância característica vista pela descarga é praticamente a mesma para as quatro descidas.

Apesar de algumas premissas nos casos com reflexão e sem reflexão terem sido diferentes, comparando-se os exemplos da estrutura com aresta de 24 metros nas duas simulações, verificamos que para a descida próxima ao ponto de impacto da descarga, a porcentagem da corrente que desce por esta é praticamente a mesma: 58% nas simulações com ou sem as

reflexões. Nas outras descidas da estrutura, a distribuição das correntes acontece de forma diferenciada, uma vez que, para o caso onde foi considerada a reflexão, os percentuais são bem maiores dos que nos casos onde as reflexões não foram consideradas.

Ainda analisando a Tabela 5.19, em termos de valores máximos da tensão no sistema de proteção devido às correntes que percorrem por ele, estes são maiores em pontos perto do ponto do impacto, da mesma maneira como ocorreu no caso onde não foram consideradas as reflexões, e com níveis suficientes a gerarem descargas disruptivas perigosas no sistema, considerando os parâmetros utilizados.

Considerando agora um sistema de proteção, onde os condutores não estão embutidos no concreto, ou seja, nos sistemas mais tradicionais com descidas externas, verificamos pequenas diferenças na distribuição das correntes, comparando-se com o caso das ferragens embutidas no concreto (porcentagens um pouco menor, por exemplo, de 57% para 52%), porém considerando-se as tensões máximas calculadas, estes são maiores nos casos com a ferragem fora do concreto (mais do que o dobro) do que nos embutidos no concreto.

5.3.3.2 Análise das simulações realizadas na estrutura com nove descidas e a descarga atingindo o centro.

Na simulação onde não foram consideradas as reflexões, verificamos que, se considerarmos cada descida composta por quatro condutores (Tabela A.4), a porcentagem da corrente que irá fluir pela descida central será bem maior, da ordem de 77%, comparando-se com 41% no caso de uma só descida. Em termos das tensões máximas no sistema de proteção, as encontradas no sistema com um condutor por descida foram muito maiores (mais do que o dobro) que as encontradas no sistema com quatro condutores por descida. De qualquer forma, o nível de tensão, da ordem de

1000kV para um caso e 480kV para o outro, já é bastante alto em termos de possibilidade de descargas disruptivas perigosas.

Considerando-se agora as simulações onde foram consideradas as reflexões, para os parâmetros considerados, a distribuição da corrente se mostrou mais homogênea, ou seja, a corrente se distribuiu igualmente entre as descidas, menos a da central, que teve uma parcela um pouco maior, não chegando ao dobro do que as demais, principalmente no caso de um condutor por descida. No caso de quatro condutores por descida, a corrente se distribuiu praticamente igual entre as descidas. Estas verificações são válidas para edificações relativamente pequenas (alturas de até 10 metros, largura e comprimento de 20 metros).

5.3.3.3 Análise das simulações realizadas na estrutura com nove descidas e a descarga atingindo o canto.

Nas simulações onde a descarga atinge o canto da edificação, para os parâmetros utilizados, verificou-se que a maior parcela da corrente flui pela descida do canto, onde houve o impacto da descarga, sendo um pouco maior no caso em que não foram consideradas as reflexões com 56% da corrente e 45% no caso com reflexões.

De uma forma geral, os valores máximos de tensão obtidos nas simulações, onde foram consideradas as reflexões, mostraram-se menores que os outros (sem reflexão) e bem mais próximos do real, uma vez que as observações dos danos em edificações devido às descargas disruptivas não são tão freqüentes, quanto seriam, se valores muito superiores a 1000kV ocorressem cada vez que um prédio fosse atingido por uma descarga atmosférica.

6. O SUBSISTEMA DE DESCIDA

6.1 VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS REFERENTES AO SUBSISTEMA DE DESCIDA

6.1.1 A utilização das ferragens como parte integrante do subsistema de descida

A norma brasileira sobre proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, NBR 5419, nas suas versões de fevereiro de 2001 [23] e também na de 2005, permite a utilização das ferragens estruturais como parte integrante do sistema de proteção. Neste capítulo, comparam-se diversos tipos de emendas que podem ser realizadas em ferragens, através de ensaios e verificações [73], [74]. Basicamente quatro tipos de emendas foram estudados: a mais comum, que é a amarração das ferragens através de arame (ver Figura 93), a solda elétrica (ver Figura 94), a solda exotérmica (ver Figura 95) e a utilização de luvas específicas para emendas de ferragens (ver Figura 96).

Figura 93 – (a) Emenda com arame; (b) detalhe.

Figura 94 – (a) Emenda por solda elétrica; (b) detalhe.

Figura 95 – (a) Emenda por solda exotérmica; (b) detalhe.

Figura 96 – (a) Emenda por luva; (b) detalhe.

Inicialmente, foram medidas as resistências elétricas de cada emenda antes de construir as colunas de concreto. A Figura 97 mostra os aparelhos utilizados para a medição das resistências elétricas. Cada corpo de prova foi instalado em uma caixa de madeira e esta foi preenchida com concreto de forma a simular pequenas colunas de concreto. Estas colunas de concreto foram radiografadas e as resistências elétricas medidas novamente.

Figura 97: Aparelhos utilizados para medição das resistências elétricas das emendas

Correntes impulsivas e pulsos de corrente contínua foram passadas pelas ferragens, sendo que, após as aplicações, novas radiografias e medições de resistências elétricas foram realizadas.

Os objetivos principais desta parte do estudo são: comparar o comportamento das diversas emendas de ferragens em relação à condução de descargas atmosféricas e estimar valores da impedância das ferragens a serem utilizadas como parte integrante do sistema de proteção.

Além disto, uma coluna de concreto nos mesmos moldes das anteriores foi feita de forma que as ferragens não foram emendadas, ficando espaçadas cerca de 5 milímetros uma da outra. Esta coluna foi também radiografada e passaram-se as correntes de ensaio pelas suas ferragens.

Os resultados destes ensaios e estas verificações são apresentados neste capítulo, assim como as conclusões e cálculos da impedância das ferragens de edificações em que se propõe a utilização das ferragens como parte integrante do sistema de proteção contra descarga atmosférica.

Na revisão da norma NBR 5419, 2001 [23], uma grande discussão sobre o uso das ferragens como parte integrante dos sistemas de descidas veio novamente à tona. Segundo esta norma (item 5.1.2.5.4 da norma), “as armaduras de aço interligadas das estruturas de concreto armado podem ser consideradas condutores de descida naturais (...)” desde que sigam algumas regras: “cerca de 50% dos cruzamentos de barras da armadura, incluindo os estribos, estejam firmemente amarradas com arame de aço torcido e as barras na região de trespassse apresentem comprimento de sobreposição de, no mínimo 20 diâmetros, igualmente amarradas com arame de aço torcido, ou soldadas, ou interligadas por conexão mecânica adequada”; além disso, “em alternativa, sejam embutidos na estrutura, condutores de descidas específicos, com continuidade elétrica assegurada por solda ou por conexão mecânica adequada, e interligadas às armaduras de aço para equalização de potencial (anexo D da norma)”; e ainda, “em construções de concreto pré-moldado, seja assegurada a continuidade elétrica da armadura de aço de cada elemento, bem como entre os elementos adjacentes de concreto pré-moldado”. O anexo D da NBR 5419/2001 [23], é normativo e refere-se ao “uso opcional de ferragem específica em estruturas de concreto armado”. Ele prevê o uso das ferragens como aterramento das fundações e também como descidas sempre para edificações novas e com instalação de condutores adicionais. A norma ainda prevê que, “para as edificações de concreto armado existentes, poderá ser implantado um SPDA com descidas externas ou, opcionalmente, poderão ser utilizadas como descidas as armaduras do concreto. Neste último caso, devem ser realizados testes de continuidade e estes devem resultar em resistências medidas inferiores a 1Ω . As medições deverão ser realizadas

entre o topo e a base de alguns pilares e também entre as armaduras de pilares diferentes, para averiguar a continuidade através de vigas e lajes. As medições poderão ser realizadas conforme o anexo E”. Este anexo E da norma, em sua versão de 2001, é também de caráter normativo e descreve um ensaio para a verificação da continuidade elétrica de armaduras. Foi justamente este anexo E, o grande alvo da discussão ocorrida no grupo que revisa esta norma. Muitos participantes utilizam o anexo E, porém declaram que ele necessita de revisão, outros não aceitam este anexo, e acreditam que as medições ali descritas não são suficientes para a utilização das ferragens das colunas de concreto como condutores de descidas em prédios existentes. De qualquer forma, na reunião de agosto de 2004, o grupo votou esta questão, revisando o texto do anexo E, e mantendo-o na norma. Assim, as ferragens das colunas de concreto, segundo a norma brasileira de proteção contra descargas atmosféricas, podem ser utilizadas como parte integrante do SPDA desde que obedeçam alguns requisitos. A publicação do Anexo E, revisado em uma emenda à norma brasileira ocorreu dia 29 de julho de 2005, contendo sete páginas com as alterações na NBR 5419 de 2001, sendo que o início da validade deste documento foi o dia 29 de agosto de 2005. Basicamente as diferenças entre o anexo antigo e o atual é que a versão 2005 está melhor detalhada a forma que deve ser feita esta medição, com um desenho e também não aparece a opção do uso da máquina de solda como verificação da continuidade elétrica das ferragens. Esta emenda foi publicada separadamente, mas a norma completa foi publicada como uma segunda edição (ano de 2005), e contendo todas as modificações indicadas na emenda.

6.1.2 Metodologia utilizada nesta verificação

Foram preparadas as quatro emendas em vergalhões de aço com superfície nervurada, segundo o fabricante, obtida por laminação a quente de tarugos de lingotamento contínuo, para utilização em armaduras de concreto armado e de diâmetro nominal 10 mm. As Figuras 93, 94, 95, 96 mostram estas emendas antes da concretagem das colunas. Foram medidas as resistências elétricas destas emendas, antes da concretagem, utilizando um micro-ohmímetro. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 6.1. Estas ferragens emendadas foram instaladas em caixas de madeira com as seguintes dimensões: 19 x 19 x 54 cm com uma janela de 15 x 9 cm para preenchimento com concreto utilizado em colunas de concreto armado, formando pequenas colunas de 15 x 15 x 42 cm. A Figura 98 mostra detalhes das caixas utilizadas e da instalação das ferragens nas mesmas.

Figura 98: Detalhes das caixas utilizadas para confecção das colunas e da instalação das ferragens nas caixas.

O concreto utilizado para a confecção das colunas teve sua composição feita de acordo com os padrões normais utilizados na construção civil para edificações residenciais. A Figura 99 mostra a preparação das colunas a serem ensaiadas.

Figura 99: Preparação das colunas de concreto a serem ensaiadas.

Antes de serem ensaiadas, as amostras de colunas de concreto tiveram um tempo de “cura” superior a 60 dias. As amostras ficaram “ao tempo”, na posição vertical, sem controle da temperatura e da umidade, como pode ser visto na Figura 100.

Figura 100: Amostras durante o tempo de “cura”.

Após este tempo de “cura”, as amostras foram radiografadas, utilizando um aparelho de raios X, modelo Gigantos (Siemens), modificado para ensaios de laboratório com potência 800mA/150kV, e filmes T-MAT G/RA de 18 x 24 cm (KODAK) em chassi radiográfico Konex de 18 x 24 cm. A Figura 101 mostra o aparelho utilizado para as radiografias.

Figura 101: Aparelho utilizado para as radiografias

As medições das resistências elétricas, desta vez com as emendas no interior das colunas, foram feitas novamente (ver valores descritos na Tabela 6.2) e as amostras foram submetidas a 5 aplicações de impulsos de corrente, sendo que os valores de crista variaram de 18 a 30 kA e as formas de onda de 9/19 μ s (os valores aplicados estão descritos nas Tabelas 6.3 a 6.7). Procurou-se utilizar os valores com maior energia possível, com o gerador utilizado. Detalhes da montagem utilizada para os ensaios podem ser vistas na Figura 102. Logo após as aplicações de impulsos de corrente, foram medidas, novamente, as resistências elétricas das amostras (ver Tabela 6.8).

Figura 102: Montagem utilizada para os ensaios de impulso atmosférico

Utilizando-se uma fonte composta por um transformador trifásico de 3 MVA, 13,2kV $\pm$ 6%, 220-380-440-760V, e uma ponte retificadora de onda completa, pulsos de corrente contínua foram passados pelas amostras, anotando-se os valores eficazes destes pulsos e calculando-se os equivalentes da carga em A.s. Utilizaram-se os valores mais críticos descritos na norma IEC 1024-1-1 de 1993 [49] e também no projeto da IEC [22], para a carga total, nível I, sendo de 300 C em cada aplicação, que simula a carga total para uma descarga atmosférica (ver Tabela 5.3). Foram feitas 3 aplicações em cada amostra, simulando as correntes dos raios longos. Após estas aplicações, as resistências elétricas foram medidas, utilizando o mesmo aparelho e as amostras foram novamente radiografadas.

Para a coluna com as ferragens sem emenda, ou seja, distanciadas de 5mm uma da outra, o procedimento utilizado foi similar. Com a coluna já concretada, mediu-se a resistência elétrica entre as ferragens, utilizando-se inicialmente um megômetro que trabalha na tensão de 2500V.

Com este aparelho, não foi possível realizar a medição, pois a tensão aplicada foi suficiente para interligar as ferragens, indicando valores perto de zero para a resistência elétrica. Utilizou-se então, um multímetro na função de Ohmímetro, que atua na tensão de 9V, sendo assim possível estimar a resistência entre as barras. Foram feitas as mesmas aplicações que nas colunas com emendas, assim como, as medições de resistência elétrica e radiografias.

6.1.3 Resultados obtidos e valores aplicados nos ensaios

6.1.3.1 Medição da resistência elétrica das emendas antes da concretagem das colunas

As amostras foram identificadas como:

CP1 – Emenda feita com solda exotérmica

CP2 – Emenda feita através de amarração com arame de aço torcido (3 pontos)

CP3 – Emenda feita através de luva especial para conexão de ferragens

CP4 – Emenda feita com solda elétrica (3 pontos)

Para realizar estas medições, foi utilizado um micro-ohmímetro digital, modelo MPK-204. As medições foram realizadas com uma corrente de ensaio de 8 A, em uma temperatura ambiente de 23 °C, utilizando-se um comprimento útil de 800 mm, sendo que nas emendas com trespasse (CP1, CP2 e CP4), a região de trespasse foi de 200 mm (equivalente a 20 vezes o diâmetro da ferragem).

Os valores medidos das resistências foram corrigidos para a temperatura de referência 20°C, utilizando-se um coeficiente de temperatura a 20 °C de 0,006 [1/K] para o aço [75].

A Tabela 6.1 apresenta os valores medidos da resistência elétrica antes da concretagem das colunas.

Tabela 6.1 – Valores medidos da resistência elétrica antes da concretagem

CORPO DE PROVA	VALOR MEDIDO (Ω)	VALOR CORRIGIDO (Ω) (Temp. de referência: 20°C)
01	$1774 \cdot 10^{-6}$	$1806 \cdot 10^{-6}$
02	$10,69 \cdot 10^{-3}$	$10,88 \cdot 10^{-3}$
03	$1708 \cdot 10^{-6}$	$1739 \cdot 10^{-6}$
04	$1537 \cdot 10^{-6}$	$1565 \cdot 10^{-6}$

6.1.3.2 Medição da resistência elétrica das emendas após a concretagem das colunas

As ferragens foram instaladas em caixas de madeira, que foram preenchidas com concreto, formando as colunas para ensaios. Estas colunas ficaram expostas ao sol por mais de 60 dias para endurecimento e secagem do concreto e, antes das aplicações dos impulsos de corrente, foram medidas novamente as resistências elétricas. Como já citado, na confecção destas colunas foi feita uma adicional sem emendas (Corpo de prova 5), com um espaço de aproximadamente 5mm entre as barras trespasadas (região de trespasse de 200mm). As medições das resistências foram feitas na temperatura ambiente de 17°C. A Tabela 6.2 apresenta os valores da resistência elétrica medida após a concretagem e cura do concreto.

Tabela 6.2 – Valores obtidos nas medições de resistência elétrica após a concretagem e cura do concreto

CORPO DE PROVA	VALOR MEDIDO (Ω)	VALOR CORRIGIDO (Ω) (Temp. de referência: 20°C)
01	$1697 \cdot 10^{-6}$	$1666 \cdot 10^{-6}$
02	$18,96 \cdot 10^{-3}$	$18,61 \cdot 10^{-3}$
03	$1681 \cdot 10^{-6}$	$1650 \cdot 10^{-6}$
04	$1537 \cdot 10^{-6}$	$1509 \cdot 10^{-6}$
05	$4,7 \cdot 10^6$	$4,6 \cdot 10^6$

6.1.3.3 Impulsos de corrente

Utilizando-se um gerador de impulsos de corrente, de 45 kJ, tensão de carga de até 200kV, foram aplicados 5 impulsos de corrente em cada corpo de prova. Os valores de crista de corrente e a forma de onda de cada impulso aplicado, estão descritos nas Tabelas 6.3 a 6.7.

Tabela 6.3 – Impulsos de corrente no CORPO DE PROVA 01 – Emenda exotérmica

APLICAÇÃO	VALOR DE CRISTA (kA)	FORMA DE ONDA (μs)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	19,5	9,2/19,0	0,272	6710
2	22,2	9,1/18,9	0,312	9440
3	24,7	9,1/18,8	0,348	12200
4	28,3	9,1/18,9	0,396	16900
5	29,6	9,4/18,9	0,415	18700

Tabela 6.4 – Impulsos de corrente no CORPO DE PROVA 02 – Emenda feita com arame torcido

APLICAÇÃO	VALOR DE CRISTA (kA)	FORMA DE ONDA (μs)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	19,2	9,2/18,2	0,271	6580
2	20,7	9,5/19,0	0,289	7720
3	23,7	9,1/18,9	0,334	10900
4	27,7	9,2/18,9	0,392	16200
5	30,2	9,2/19,0	0,424	19600

Tabela 6.5 – Impulsos de corrente no CORPO DE PROVA 03 – Emenda feita com luva

APLICAÇÃO	VALOR DE CRISTA (kA)	FORMA DE ONDA (μs)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	18,3	7,7/18,2	0,258	5790
2	21,3	6,9/18,0	0,299	8320
3	23,7	9,2/18,8	0,336	11200
4	28,3	9,4/19,1	0,397	16600
5	29,9	9,4/19,0	0,423	19300

Tabela 6.6 – Impulsos de corrente no CORPO DE PROVA 04 – Emenda feita com solda elétrica

APLICAÇÃO	VALOR DE CRISTA (kA)	FORMA DE ONDA (μs)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	19,2	9,4/18,7	0,271	6630
2	20,1	9,2/18,8	0,284	7430
3	24,7	9,2/18,9	0,349	12300
4	28,0	9,2/18,9	0,396	16600
5	29,6	9,1/18,8	0,417	18900

Tabela 6.7 – Impulsos de corrente no CORPO DE PROVA 05 – Sem emenda

APLICAÇÃO	VALOR DE CRISTA (kA)	FORMA DE ONDA (μs)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	19,2	8,6/18,7	0,271	6460
2	21,0	9,5/19,2	0,297	8090
3	23,5	9,2/19,0	0,330	10600
4	27,7	9,4/19,1	0,395	16200
5	29,6	9,2/19,1	0,419	18700

6.1.3.4 Medição da resistência elétrica das emendas após a aplicação de impulsos de corrente nas colunas

Após as aplicações dos impulsos de corrente, foram medidas novamente as resistências elétricas. A temperatura ambiente foi de 17 °C. A Tabela 6.8 apresenta os resultados destas medições.

Tabela 6.8 - Valores da resistência elétrica medidos após a aplicação dos impulsos de corrente

CORPO DE PROVA	VALOR MEDIDO (Ω)	VALOR CORRIGIDO (Ω) (Temp. de referência: 20°C)
01	$1711 \cdot 10^{-6}$	$1680 \cdot 10^{-6}$
02	$4,82 \cdot 10^{-3}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$
03	$1800 \cdot 10^{-6}$	$1767 \cdot 10^{-6}$
04	$1612 \cdot 10^{-6}$	$1582 \cdot 10^{-6}$
05	$10,8 \cdot 10^6 *$	$10,6 \cdot 10^6 *$

* Este valor de resistência elétrica foi variando conforme o tempo, sendo que, após 30 minutos das aplicações de impulsos de corrente, o valor caiu para 7,7 M Ω e, após 24 horas, este valor modificou para 4 k Ω . Para a medição da resistência neste corpo de prova (sem emendas), foi utilizado um multímetro funcionando na posição de ohmímetro.

6.1.3.5 Aplicação dos pulsos de corrente contínua.

As colunas de concreto foram levadas ao Laboratório de Altas Correntes do IEE-USP, onde foram aplicados três pulsos de corrente contínua em cada corpo de prova para simular as correntes do raio longo. Os valores eficazes da corrente e o tempo de aplicação de cada pulso estão descritos nas Tabelas 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13.

Tabela 6.9 – Pulsos de corrente contínua - Corpo de prova 01

APLICAÇÃO	VALOR EFICAZ DA CORRENTE (A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	653,0	489,1	319	208556
2	683,0	491,8	335,8	229419
3	684,0	492,1	336,6	230231

Tabela 6.10 – Pulsos de corrente contínua - Corpo de prova 02

APLICAÇÃO	VALOR EFICAZ DA CORRENTE (A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	679,2	492,1	334,1	227011
2	679,2	519,7	352,9	239744
3	680,0	491,4	334,0	227223

Tabela 6.11 – Pulsos de corrente contínua - Corpo de prova 03

APLICAÇÃO	VALOR EFICAZ DA CORRENTE (A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	682,7	491,8	335,7	229217
2	681,9	491,9	335,1	228727
3	678,9	491,8	333,9	226673

Tabela 6.12 – Pulsos de corrente contínua - Corpo de prova 04

APLICAÇÃO	VALOR EFICAZ DA CORRENTE (A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	684,4	491,9	336,1	230407
2	683,9	491,7	336,0	229977
3	683,4	492,1	336,0	229828

Tabela 6.13 – Pulsos de corrente contínua - Corpo de prova 05

APLICAÇÃO	VALOR EFICAZ DA CORRENTE(A)	TEMPO DE APLICAÇÃO (ms)	CARGA (A.s)	I²t (A² s)
1	638,5	411,5	262,7	167761
2	679,7	491,2	333,8	226930
3	664,6	491,5	326,6	217092

Os valores de corrente aplicados foram baseados nos descritos na Tabela 5.3, para nível de proteção I e parâmetro de tempo conforme o estabelecido para o raio longo.

6.1.3.6 Medição da resistência elétrica das emendas após a aplicação dos pulsos de corrente contínua nas colunas

Após as aplicações dos pulsos de corrente, foram medidas novamente as resistências elétricas. A temperatura ambiente foi de 20 °C. A Tabela 6.14 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6.14 - Medição da resistência elétrica das emendas após a aplicação dos pulsos de corrente contínua.

CORPO DE PROVA	VALOR MEDIDO (Ω)	VALOR CORRIGIDO (Ω) (Temp. de referência: 20°C)
01	1682 10^{-6}	1682 10^{-6}
02	1990 10^{-6}	1990 10^{-6}
03	1725 10^{-6}	1725 10^{-6}
04	1637 10^{-6}	1637 10^{-6}
05	1720 10^{-6} *	1720 10^{-6} *

* Valor obtido utilizando o micro-ohmímetro. Com o multímetro, o valor da medição ficou abaixo da menor escala, ou seja, menor que 0,2 Ω .

Para o corpo de prova nº 5, aquele sem emendas inicialmente, verificou-se após as aplicações dos pulsos de corrente contínua, uma continuidade elétrica entre as ferragens. Assim, foi possível realizar a medição utilizando o micro-ohmímetro.

Após estas medições, os corpos de prova foram novamente radiografados e analisados.

6.1.4 Análise dos resultados dos ensaios e medições

A Tabela 6.15 apresenta os resultados das medições de resistências elétricas nas várias etapas dos ensaios realizados. Os valores estão corrigidos para uma temperatura de referência de 20° C.

Tabela 6.15 – Comparação entre os valores da resistência elétrica dos corpos de provas nas várias etapas.

CORPO DE PROVA	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CORRIGIDO ANTES DA CONCRETAGEM (Ω)	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CORRIGIDO APÓS A CONCRETAGEM (Ω)	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CORRIGIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS IMPULSOS DE CORRENTE (Ω)	RESISTÊNCIA ELÉTRICA CORRIGIDO APÓS A APLICAÇÃO DOS PULSOS DE CORRENTE CONTÍNUA (Ω)
01 (solda exotérmica)	$1806 \cdot 10^{-6}$	$1666 \cdot 10^{-6}$	$1680 \cdot 10^{-6}$	$1682 \cdot 10^{-6}$
02 (amarração com arame)	$10,88 \cdot 10^{-3}$	$18,61 \cdot 10^{-3}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$1990 \cdot 10^{-6}$
03 (luva especial)	$1739 \cdot 10^{-6}$	$1650 \cdot 10^{-6}$	$1767 \cdot 10^{-6}$	$1725 \cdot 10^{-6}$
04 (solda elétrica)	$1565 \cdot 10^{-6}$	$1509 \cdot 10^{-6}$	$1582 \cdot 10^{-6}$	$1637 \cdot 10^{-6}$
05 (sem emenda)	-	$4,6 \cdot 10^6$	$10,6 \cdot 10^6 *$	$1720 \cdot 10^{-6} *$

Analisando-se a variação das resistências elétricas, os resultados dos ensaios e as radiografias dos diversos corpos de prova, verificamos que para a emenda feita com solda exotérmica, praticamente não houve variação da resistência elétrica após as aplicações dos impulsos de corrente e nem após os pulsos de corrente contínua. Foi verificada somente uma pequena diminuição da resistência medida da emenda exotérmica, antes da concretagem, comparada com o valor medido após a concretagem (variação em torno de 7%). A Figura 103 mostra a radiografia antes das aplicações das correntes. A radiografia após as aplicações é praticamente idêntica à obtida anteriormente.

Figura 103: Radiografia da emenda exotérmica antes das aplicações de corrente

Para a emenda feita através de amarração com arame de aço torcido, verificou-se inicialmente um aumento da resistência entre os valores antes e após a concretagem, aproximadamente um aumento de 70%, que pode ser explicado por eventual penetração de concreto entre as emendas (foram feitos três pontos de emendas). Com a passagem de correntes pelas emendas, verificou-se uma queda acentuada da resistência, sendo que esta caiu a quase um quarto do seu valor, após a aplicação dos impulsos de corrente, e caiu a quase um décimo do valor inicial, após os pulsos de corrente contínua. Pelas chapas de Raios X, não foi possível grande análise, a não ser que, aparentemente, os arames de cada amarração após as aplicações de corrente ficaram mais juntos. As Figuras 104 e 105 apresentam as radiografias antes e após as aplicações de correntes.

Figura 104: Radiografia da emenda por arame antes das aplicações de corrente

Figura 105: Radiografia da emenda por arame após as aplicações de corrente

Para uma melhor análise que justificasse esta diminuição de resistência elétrica, a coluna de concreto foi quebrada para a inspeção visual da emenda após os ensaios (ver Figura 106). Nesta

inspeção, verificou-se que a emenda, após os testes, permaneceu praticamente da mesma forma como foi feita, sem fusão de materiais, ou qualquer outra modificação que pudesse ser verificada de forma visual (ver Figura 107). Com o auxílio de um alicate, retirando-se os arames de amarração, verificaram-se pequenos pontos de soldas nos contatos das ferragens, nos pontos de amarração.

Figura 106: Quebra da coluna de concreto para verificação da emenda após os ensaios

Figura 107: Detalhe das emendas após os ensaios e fora do concreto

Para a emenda feita através de luva especial para conexões de ferragens, praticamente não houve variação da resistência elétrica (ficando esta variação em torno de 5%). Na análise das radiografias, não foi verificada nenhuma diferença entre as imagens feitas antes e depois dos ensaios. A Figura 108 mostra a radiografia da emenda feita com luva especial.

Figura 108: Radiografia da emenda com luva especial

Uma mesma análise pode ser feita para a emenda feita com solda elétrica. A variação da resistência ficou em torno de 5% e as imagens das radiografias não mostraram nenhuma diferença. A Figura 109 mostra a radiografia da emenda com solda elétrica.

Figura 109: Radiográfica da emenda com solda elétrica

Para o corpo de prova sem emenda, com as barras de aço trespassadas em, aproximadamente, 200 mm e espaçadas entre elas em, aproximadamente 5 mm, verificou-se uma grande variação da impedância entre as barras. A radiografia das barras espaçadas dentro da coluna de concreto antes dos ensaios pode ser vista na Figura 110.

Figura 110: Barras no interior do concreto antes dos ensaios

Inicialmente, com um valor aproximado de 4,6 M Ω , medido com um multímetro que trabalha com tensão de 9 V, após as aplicações de impulsos de corrente, este valor variou de 10 M Ω (medido imediatamente após as aplicações de impulsos), caindo para 7,7 M Ω , após 30 minutos, e para 4 k Ω após 24 horas. Após as aplicações dos pulsos de corrente contínua, o valor de resistência caiu para 1,72 m Ω , ou seja, quase 3 trilhões de vezes menor que o valor inicial. Pelas radiografias, foi possível verificar que houve uma fusão do material em uma das pontas das ferragens (ver Figura 111). Não foi constatada nenhuma trinca ou ruptura externa na coluna de concreto (ver Figura 112).

Figura 111: Radiografia após os ensaios – Detalhe da solda em uma das pontas das barras dentro da coluna de concreto

Figura 112: Detalhe externo da coluna com as ferragens sem emenda após os ensaios

A coluna de concreto foi então quebrada para a verificação visual das ferragens (ver Figura 113). Foi constatado que em uma das extremidades da ferragem, houve a fusão do material metálico, ocorrendo a solda das ferragens neste ponto (ver Figura 114).

Figura 113: Quebra da coluna com as ferragens inicialmente sem emenda

Figura 114: Detalhe da solda entre as ferragens após os ensaios

6.2 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE COLUNAS DE EDIFICAÇÕES

A NBR 5419/2001 [23] indica o valor de $1\ \Omega$ como resistência máxima a ser medida entre o topo e a base da edificação. O projeto da IEC (Draft IEC 81/ 240/ CDV) [76] indica o valor de $0,2\ \Omega$ como este valor limite. Baseado nos valores medidos das emendas foi considerada uma estrutura composta por 10 andares de $6\text{m} \times 6\text{m}$ e $3,5\text{m}$ de pé direito em cada andar, cada coluna composta por quatro vergalhões de aço em paralelo, sendo que em cada trecho de condutor existe uma resistência em série que representa a emenda entre dois condutores (ver Figura 115), para exemplo de cálculo.

Figura 115: Esquema representando as ferragens de uma edificação com 10 andares utilizado para o cálculo da resistência elétrica das colunas

Para se estimar o valor da resistência entre o topo e a base desta edificação foi utilizado um programa computacional, bastante prático para análises simples de circuitos elétricos (Electronic Workbench 5), em que foi possível realizar diversas simulações, considerando emendas com valores de $20\text{ m}\Omega$ e ferragens não emendadas com valores de $10\text{ M}\Omega$. Cinco configurações foram simuladas: a primeira, em que cada trecho de coluna foi considerado contendo quatro emendas, a segunda em que cada trecho contém três ferragens emendadas e uma não emendada, a terceira com duas emendadas e duas não emendadas, a quarta com uma emendada e três não emendadas e a quinta com as quatro ferragens não emendadas. Os resultados obtidos estão na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Resultados obtidos nas simulações realizadas

Configuração	R_{emenda}	R_{vert}	R_{horiz}	$R_{\text{equivalente}}$
1	$R1=R2=R3=R4=20\text{m}\Omega$	$9.3\text{m}\Omega$	$12.3\text{m}\Omega$	$27.94\text{m}\Omega$
2	$R1=R2=R3=20\text{m}\Omega$ $R4=10\text{M}\Omega$	$12.3\text{m}\Omega$	$16.3\text{m}\Omega$	$37.1\text{m}\Omega$
3	$R1=R2=20\text{m}\Omega$ $R3=R4=10\text{M}\Omega$	$18.5\text{m}\Omega$	$24.5\text{m}\Omega$	$55.6\text{m}\Omega$
4	$R1=20\text{m}\Omega$ $R2=R3=R4=10\text{M}\Omega$	$37.0\text{m}\Omega$	$49.0\text{m}\Omega$	$111.2\text{m}\Omega$
5	$R1=R2=R3=R4=10\text{M}\Omega$	$2.5\text{M}\Omega$	$2.5\text{M}\Omega$	$7.32\text{M}\Omega$

Assim, em uma edificação de 10 andares nas condições descritas, somente se nenhuma ferragem for emendada, o valor será superior aos $0,2\Omega$ do projeto da IEC. Se houver um caminho para a corrente percorrer, do topo a base, através de emendas, para a condição simulada, o valor da resistência a ser medida deve ter um valor inferior aos normalizados.

6.3 PRINCIPAIS VERIFICAÇÕES CONSTATADAS NESTE CAPÍTULO

Assim, as emendas ensaiadas, sob o ponto de vista da condução das correntes das descargas, mostraram-se capazes de conduzir os valores aplicados sem se danificarem e nem danificarem o concreto que as envolvem. A coluna de concreto, contendo as ferragens sem emendas, submetida às correntes de descargas, mostrou uma fusão do material condutor em uma das pontas da ferragem, sendo que a coluna não sofreu nenhum dano aparente. A medição da resistência de contato das emendas entre os ensaios e a verificação das radiografias podem ajudar na análise do comportamento dos corpos de prova submetidos às correntes de descargas. Os valores limites, para verificação da continuidade elétrica das ferragens definidas pelas normas, são aceitáveis, levando-se em conta as simulações realizadas e que basta apenas um caminho com emendas bem feitas entre o topo e a base da edificação para que se possa aceitar o uso da ferragem como parte integrante do sistema de descidas.

7 O SUBSISTEMA DE ATERRAMENTO

7.1. UTILIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO DA EDIFICAÇÃO COMO SUBSISTEMA DE ATERRAMENTO

As normas de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, a brasileira NBR 5419/2001 [23] e as internacionais IEC 61024-1/1990 [1] e IEC 61024-1-2/1998 [50], permitem a utilização das ferragens das fundações das edificações como parte integrante do sistema de aterramento dos SPDA. A IEC 61024-1/1990 [1], no item 2.3.6, “natural earth electrodes”, descreve que as armaduras de aço interconectadas e embutidas em concreto, desde que cumpram determinados requisitos, podem ser utilizadas como eletrodos de terra. Neste caso, a norma indica que cuidados especiais devem ser tomados nas conexões no sentido de prevenir danos mecânicos no concreto. A IEC 61024-1-2/1998 [50] possui o item 3.3.2, “foundation earth electrodes”, que fornece detalhes do uso das fundações como eletrodo de aterramento. Além disto, esta norma possui o anexo A, “Reinforced concrete structures”, que estabelece, de forma bastante detalhada, as regras a serem seguidas quando se utilizam as estruturas de concreto armado nos SPDAs. A norma brasileira [23] descreve as condições em que estas ferragens podem, ou melhor, devem preferencialmente ser utilizadas. Estas condições referem-se às emendas das ferragens, das dimensões e formas do material utilizado, das interligações com as colunas das estruturas, das interligações com as barras e/ou terminais de ligações equipotenciais e das avaliações e testes no sistema de aterramento.

Este capítulo tem como objetivo verificar a capacidade de drenagem de correntes impulsivas pelas ferragens embutidas em dois tipos de concreto diferentes, um tradicional utilizado na maioria das fundações de edificações e um concreto com um traço mais rico, tornando-o mais

impermeabilizante, utilizado em fundações onde a umidade pode comprometer suas características mecânicas. Neste sentido, ensaios em laboratório, utilizando impulsos de corrente em ferragens embutidas em concreto (dois tipos de concreto) e em hastes de aço revestidas por uma camada de cobre, geralmente utilizadas em sistemas de aterramento, foram realizados e os resultados das curvas de impedância para impulso, em cada configuração, foram analisados e comparados.

Nestes ensaios, um tanque metálico preenchido com terra compactada foi utilizado para a instalação dos diversos tipos de eletrodos, nos quais foram aplicados os impulsos de corrente. A Figura 116 mostra detalhes da montagem e do gerador de impulsos utilizado.

Figura 116: Gerador utilizado e detalhes da montagem para os ensaios

Foram medidas a corrente e a queda de tensão entre os eletrodos e o tanque, para obtenção dos valores de impedância. A comparação dos resultados com as hastes de aço revestidas por cobre tem por objetivo indicar, de uma forma preliminar e aproximada, a equivalência entre os sistemas tradicionais e os que utilizam a fundação como eletrodos naturais. Além disto, verificar a

influência do tipo de concreto na capacidade de drenagem de corrente quando este for utilizado em fundações pertencentes ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

7.1.1 Desenvolvimento experimental

Foram feitas 8 pequenas colunas de concreto, sendo 4 com o traço 1:4 e 4 com o traço 1:7. O traço 1:4 significa uma composição mais rica, uma vez que para uma parte de cimento são utilizadas duas de areia e duas de pedra. O traço 1:7 significa que, para uma parte de cimento, são utilizadas três partes de areia e quatro de pedra, esta composição é a mais utilizada nos concretos tradicionais. O traço 1:4 é mais utilizado em concretos onde a impermeabilidade é importante, por exemplo, em colunas de concreto de pontes, portos, píer, etc. Cada coluna foi montada com as seguintes dimensões: 40 centímetros de comprimento e seção de 10 x 10 centímetros, e as ferragens com 50 cm de comprimento, sendo que 28 cm foram embutidos no concreto (ver Figuras 117 e 118). Estas colunas ficaram em câmara úmida, com umidade controlada maior que 95% e temperatura controlada de 24°C por 30 dias (período de cura).

Figura 117: Preparação das amostras – Detalhe do posicionamento da ferragem na coluna

Figura 118 - Preparação das amostras – Preenchimento do concreto

A Figura 119 apresenta as amostras após o tempo de cura e antes dos ensaios.

Figura 119: Amostras após o tempo de cura e antes dos ensaios.

Um tanque de aço de forma cilíndrica (ver Figura 120), de diâmetro 130 centímetros e altura 127 centímetros, foi preenchido com terra compactada até a altura de 100 centímetros. Neste tanque,

foram instaladas as pequenas colunas de concreto e a haste cobreada (um corpo de prova de cada vez), onde foram aplicados os impulsos. O tanque foi isolado do piso do laboratório, através de dois caibros de madeira de espessura 12 centímetros, utilizados em cruzetas de linhas de distribuição. O tanque foi conectado ao terra do gerador de impulsos através de um derivador “shunt” específico para medição de correntes impulsivas. A tensão entre o corpo de prova e o tanque foi medida através de um divisor resistivo para 500kV de impulso. O esquema utilizado nos ensaios pode ser visto na Figura 121. Após a instalação de cada corpo de prova na terra, utilizando-se um medidor de resistência de aterramento tradicional (no caso, um Terrômetro eletrônico da Megabrás, modelo MT5000W), foram feitas medições da “resistência de aterramento com terrômetro - R_{TT} ”, sendo o ponto medido, a ferragem de aço da coluna; o ponto de corrente sendo o tanque metálico, e os pontos de tensão, alguns pontos intermediários na terra e o próprio tanque (ver esquema na Figura 122).

Figura 120: Detalhe do tanque com terra utilizado para os ensaios

Figura 121 – Montagem dos Corpos de Provas no tanque e circuito utilizado

Figura 122 – Esquema de medição de R_{TT}

Os valores de R_{TT} são valores estimados e servem apenas como referência para diferenciação entre as amostras, uma vez que foram obtidos de forma não normalizada.

Após esta medição, cada amostra foi submetida a três impulsos de polaridade positiva e três impulsos de polaridade negativa, com um nível de tensão de crista (N_{V1}) da ordem de 22kV, e forma de onda, da ordem de 2,4/42 μ s, o que geraram correntes da ordem de 55 A, e forma de onda da ordem de 2/40 μ s, e em seguida outros três impulsos de cada polaridade com um nível maior de tensão (N_{V2}) da ordem de 42kV, mantendo-se a forma de onda, o que geraram correntes da ordem de 110 A de pico, e formas de onda da ordem de 2,5/42 μ s. Em cada aplicação, foram registrados os oscilogramas de tensão e corrente (ver exemplos de oscilogramas nas Figuras 123 e 124).

Figura 123 – Oscilograma de tensão típico

Figura 124 – Oscilograma de corrente típico

Para as duas amostras com traço 1:4 e uma com traço 1:7, os ensaios foram repetidos após alguns dias, com o objetivo de se verificar a influência de eventual penetração da umidade no concreto.

Um procedimento similar foi adotado para os ensaios em uma haste de aço cobreada de bitola 1/2" sendo que nesta os ensaios foram feitos para três profundidades diferentes (20; 30 e 60 centímetros). A Figura 125 apresenta a haste utilizada e uma das colunas ensaiadas.

Figura 125: Detalhe da haste ensaiada e de uma das amostras com traço 1:7

A terra utilizada também foi analisada em função da quantidade de água existente. Uma amostra de terra com 1000 gramas foi colocada em uma câmara térmica por um período de 4 horas e temperatura 125°C. Após este período, a amostra foi pesada novamente obtendo-se 748,66 gramas. Assim, estima-se que para um quilo de terra utilizada, aproximadamente, 250 gramas é água.

7.1.2 Impulsos nas colunas de concreto

As colunas de concreto foram instaladas no tanque de forma que, aproximadamente, 10 centímetros do concreto e 22 centímetros da ferragem de aço estivessem expostos para fora da terra (ver Figura 126). Nesta ponta da ferragem, foram aplicados os impulsos e feitas as medições. Para cada nível de tensão e polaridade, foram calculadas as “impedâncias de impulso” (Z). Entende-se por “impedância de impulso”, o quociente do valor de crista de tensão pelo valor de pico da corrente, sendo, portanto, uma grandeza em que não é levado em conta, o atraso entre as formas de onda de corrente e de tensão. Esta “impedância”, conhecida também por “resistência dinâmica”, é, no entanto, útil para descrever o comportamento impulsivo dos aterramentos [77]. O valor de Z , apresentado na Tabela 7.1, corresponde à média dos três valores obtidos nas aplicações de impulso. Em termos de formas de onda, para a tensão de impulso, a forma de onda ficou na faixa de $2,5 \pm 0,1\mu s$, para a frente de onda, e $42 \pm 1\mu s$, para a cauda, e para a corrente na faixa de $2,3 \pm 0,3\mu s$, para a frente de onda, e $43 \pm 3\mu s$ para a cauda.

Tabela 7.1: Resultados obtidos nos ensaios de impulsos nas colunas de concreto.

AMOSTRA	TRAÇO	R_{TT} (Ω)	Z (N_{V1}) Pol. + (Ω)	Z (N_{V2}) Pol. + (Ω)	Z (N_{V1}) Pol. – (Ω)	Z (N_{V2}) Pol. – (Ω)
01	1:7	750	432,1	415,9	430,6	400,3
02	1:4	450	389,2	378,6	408,5	371,8
03	1:7	500	438,0	425,3	438,9	420,1
05	1:4	850	420,8	403,8	422,9	392,1
06	1:4	410	401,4	385,8	403,5	374,8
07	1:7	380	372,1	351,9	371,9	344,9

Fig. 126 – Instalação das colunas de concreto no tanque

7.1.3 Repetição dos impulsos nas colunas após penetração da umidade

Algumas amostras tiveram algumas aplicações repetidas após alguns dias, ou horas, com o objetivo de se verificar alguma influência da penetração da umidade da terra na amostra. A

amostra 04, com traço 1:4, foi utilizada como amostra de calibração para ajuste do gerador de impulsos. Nesta amostra, foram feitas algumas aplicações de polaridades positiva e negativa com um nível de tensão de, aproximadamente, 40kV. Após 11 dias enterrada no tanque, um ensaio completo com os dois níveis de tensão foi realizado e os resultados estão na Tabela 7.2. Uma outra amostra, a de número 02, também com o traço 1:4 também teve algumas aplicações repetidas após 13 horas do primeiro ensaio. Para amostra 07, com traço 1:7 foram feitos ensaios completos após 4 dias e novamente repetidos depois de 2 dias do segundo ensaio.

Tabela 7.2.: Resultados dos ensaios para verificação da influência da umidade no concreto

AMOSTRA	TRAÇO	R_{TT} (Ω)	Z (N_{V1}) Pol. + (Ω)	Z (N_{V2}) Pol. + (Ω)	Z (N_{V1}) Pol. – (Ω)	Z (N_{V2}) Pol. – (Ω)
04 (antes)	1:4	-	-	378,2	-	375,1
04 (após 11 dias)	1:4	600	357,7	346,0	361,1	345,4
02 (antes)	1:4	450	389,2	378,6	408,5	371,8
02 (após 13 horas)	1:4	-	-	-	-	374,6
07 (antes)	1:7	380	372,1	351,9	371,9	344,9
07 (após 4 dias)	1:7	370	348,1	335,6	347,8	334,2
07 (após 6 dias)	1:7	350	339,7	326,8	340,0	324,9

7.1.4 Impulsos nas hastes cobreadas

Utilizando o mesmo tanque e a mesma terra, uma haste de aço cobreada, com diâmetro 1/2", foi instalada com três profundidades diferentes, sendo feitas três aplicações de impulsos, de cada polaridade, em cada profundidade. Foi utilizado um nível de tensão de 19kV +/- 1kV. A forma de onda ajustada para a tensão foi de 8,5 +/- 1,5 μ s para a frente de onda, e 44 +/-1 μ s para a cauda e para corrente foi de 8,0 +/- 1,5 μ s, para a frente de onda, e 44 +/-1 μ s para a cauda. A Tabela 7.3 mostra os resultados obtidos.

Tabela 7.3.: Resultados dos ensaios na haste de aço cobreada

PROFUNDIDADE (Centímetros)	R_{TT} (Ω)	Z (Pol. +) (Ω)	Z (Pol. -) (Ω)
20	100	114,8	114,9
30	95	90,4	90,4
60	60	60,4	60,0

7.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.2.1 Colunas de concreto

Nas aplicações com um nível maior de tensão, foi possível observar, a olho nu, pequenas descargas fluindo pelo concreto, na lateral, fora da terra, das amostras (ver Figura 127).

Fig. 127 – Detalhes das descargas no concreto

Em relação ao aumento dos níveis de tensão de impulso aplicados, verificou-se que, para a polaridade positiva, houve uma diminuição de, aproximadamente, 4% no valor da impedância de impulso. Para a polaridade negativa, esta diminuição foi um pouco maior, da ordem de 7%. Esta diminuição pode ser explicada pelo aumento da ionização devido ao aumento da corrente.

Em relação à influência da polaridade, verificamos que, para os níveis mais baixos de tensão, praticamente não há variação entre os valores de polaridade positiva e negativa. Para o nível maior de tensão, verificou-se uma pequena diminuição da impedância de impulso da polaridade negativa em relação à positiva, da ordem de 2%.

Em relação à composição do concreto fica difícil uma análise, uma vez que os valores obtidos para as várias amostras foram bastante dispersos. Na média, os valores de impedância de impulso nas amostras com o traço 1:4 foram menores, porém em ensaios individuais, foram obtidos valores maiores que o traço 1:7, o que não torna possível confirmar o valor médio.

7.2.2 Influência da penetração da umidade

Ao contrário da maioria das amostras, que foram trocadas após a realização de cada conjunto de ensaios, três amostras foram deixadas instaladas no tanque com terra, por um tempo maior, com o objetivo de se verificar a influência da penetração de umidade no concreto.

Para a amostra 02, com traço 1:4, a repetição de algumas aplicações se deu após 13 horas o que, provavelmente, não é um tempo suficiente para modificar a umidade do concreto. Estes ensaios mostraram resultados muito similares.

Para a amostra 04, com traço 1:4, a repetição se deu 11 dias após a aplicação anterior, e os resultados mostraram uma diminuição da impedância de impulso, da ordem de 8%.

Para a amostra 07, com traço 1:7, a repetição se deu 4 dias após a aplicação anterior, e os resultados mostraram uma diminuição da impedância de impulso, da ordem de 5%. Após 6 dias do primeiro ensaio a diminuição ficou na ordem de 7,5%.

7.2.3 Impulsos nas hastes cobreadas

Nas aplicações para a profundidade 20 cm, na polaridade positiva, foram observadas pequenas descargas incompletas, nas proximidades da haste, na superfície do solo. Nas outras aplicações e profundidades, estas descargas não foram constatadas.

Os resultados obtidos mostraram valores da impedância de impulso, na tensão utilizada, bastante próximos aos valores medidos com o terrômetro eletrônico.

Para estes ensaios na haste, verificou-se que os valores obtidos para a polaridade positiva e negativa foram praticamente os mesmos, para o nível de tensão utilizado.

Como era de se esperar, a impedância diminui com o aumento da profundidade, uma vez que quanto mais profunda a haste, maior é a área de contato com o solo.

7.2.4 Comparação entre os resultados obtidos nas colunas de concreto com as hastes cobreadas

Considerando que a ferragem dentro da coluna de concreto ficou aproximadamente 20 centímetros sob o solo, a coluna aproximadamente 30 centímetros sob o solo, e que a impedância de impulso para a haste com esta profundidade ficou em torno de $100\ \Omega$, para um nível de tensão da ordem de 20kV, a impedância de impulso para a coluna ficou em torno de $400\ \Omega$, ou seja, quatro vezes maior.

7.3 PRINCIPAIS VERIFICAÇÕES NOS ENSAIOS

Nos ensaios realizados, verificamos que as colunas de concreto possuem uma boa capacidade de drenagem de corrente impulsiva, principalmente se for levado em conta que, no geral, as fundações são compostas por uma grande quantidade de pilares enterrados, profundos e interligados através das vigas baldrame.

Nestes ensaios, foram verificados também que, com níveis de tensões maiores e, portanto, maiores correntes, a impedância de impulso diminui. Esta diminuição mostra a não-linearidade desta impedância para impulsos devido ao aumento da ionização do solo, com o aumento da corrente. A Figura 128 mostra uma curva $V \times I$ que demonstra esta não-linearidade.

Figura 128: Curva V x I de uma das aplicações – Verificação da não-linearidade.

Em relação à composição do concreto, não foi possível constatar diferenças notáveis entre os ensaios com uma composição mais “rica” (1:4) e uma composição com traço 1:7. De qualquer forma, uma suspeita de que um concreto mais impermeável (1:4) poderia drenar menos corrente, não se confirmou. Um parâmetro, que não foi bem controlado nos ensaios, foi a resistência de contato entre as amostras e o solo. Nas trocas das amostras no tanque, procurou-se compactar a terra da mesma maneira, porém não podemos afirmar que a resistência de contato permaneceu a mesma para cada amostra. Em um trabalho futuro, este parâmetro poderá ser controlado, realizando os ensaios com as amostras em um tanque com água ao invés de terra.

A penetração de umidade na amostra mostrou ser um parâmetro importante na diminuição da impedância de impulso, uma vez que amostras que ficaram instaladas mais tempo no tanque mostraram esta diminuição.

Em relação à comparação entre o uso de colunas de concreto das fundações e hastes cobreadas para fins de aterramento, considerando as condições de ensaios utilizadas e para estes tipos de amostras utilizadas, verificamos que, para uma mesma profundidade e mesmo nível de tensão, a

impedância de impulso para a coluna, se mostrou aproximadamente quatro vezes maior que a da haste cobreada. Considerando que, geralmente as colunas das fundações são compostas por muitas ferragens interligadas em paralelo e são de grande profundidade, geralmente superior a 10 metros, e na maioria das vezes, são interligadas entre si através das vigas baldrames que também, a título de aterramento, funcionariam como anel de interligação e aterramento, o uso das fundações como subsistema de aterramento é recomendável para fins de proteção contra descargas atmosféricas.

8 CONCLUSÕES

O assunto “Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas” é bastante extenso e ainda provoca muita polêmica na comunidade científica que estuda o tema. Os métodos utilizados para os subsistemas de captação ainda são discutidos e questionados. De tempos em tempos, novos tipos de captadores são desenvolvidos, assim como, novas técnicas são lançadas com promessas de métodos mais eficientes para a proteção das estruturas contra os danos nocivos das descargas atmosféricas. Este trabalho não tem a pretensão de encerrar este assunto no que tange ao uso dos componentes naturais das estruturas como parte integrante dos sistemas de proteção. Apesar das normas nacionais e internacionais permitirem muitas das recomendações descritas neste trabalho, ainda há alguma restrição no uso desta técnica por muitos instaladores, projetistas e pesquisadores.

Assim, em relação ao diversos tipos de captadores citados no capítulo 3, que supostamente criam um líder ascendente mais rápido que os criados por um terminal aéreo tradicional, os chamados captadores ESE (“Early Streamer Emitters”, ou seja, emissores de descargas antecipados), baseado nos estudos realizados, nos princípios de funcionamento de cada tipo, nas teorias utilizadas para as justificativas destes funcionamentos, e nos trabalhos já publicados sobre estes dispositivos, concluímos que, a área de proteção destes, não pode ser muito maior que as definidas pelas normas para os captadores tradicionais.

Apesar de não acreditar na base teórica utilizada para as justificativas do CVM (Método do volume acumulado), uma vez que os fatores de intensificação de campos utilizados são exagerados, a ênfase dada ao estudo da intensidade do campo eletromagnético em pontos críticos da estrutura é interessante, e deve ser levada em conta, independente do tipo de captador recomendado. Isto porque, há muitos casos relatados de sistemas instalados conforme a norma,

onde a descarga atingiu pontos fora do SPDA. Os componentes do SPDA devem ser posicionados de forma que sejam os pontos de maior probabilidade a serem atingidos pelas descargas, e isto pode ser verificado pelos estudos dos campos eletromagnéticos nas superfícies das edificações. Os sistemas de proteção devem sempre ser verificados pela esfera rolante, de forma a obedecerem ao método eletrogeométrico, a não ser na proteção baseada no método de Faraday, sendo que neste é muito importante o uso dos terminais aéreos como pontos preferenciais para as descargas, devendo estes serem instalados nos pontos de maiores probabilidades de ocorrência de descarga, ou seja, nos pontos onde a sua instalação provocará maiores gradientes de tensão, quando submetidos aos campos eletromagnéticos, oriundos do líder descendente.

É muito importante na concepção do projeto de um SPDA, o conhecimento de detalhes construtivos e arquitetônicos para o posicionamento dos elementos que compõe o sistema de proteção. Na execução do projeto, é essencial a inspeção no local por um profissional com experiência, uma vez que detalhes construtivos podem modificar partes importantes do projeto tornando o sistema mais confiável e/ou mais econômico.

O sistema dissipativo não apresenta explicações técnicas convincentes, não tem embasamento científico e as explicações estatísticas não acrescentam vantagens aos sistemas tradicionais. Assim, a luta existente em outros países para a não normalização desta técnica, deve ser travada também no Brasil, para evitar que o interesse financeiro vença o conhecimento tecnológico.

Quando se trata de simulações laboratoriais neste assunto, as dificuldades operacionais e em relação às fontes para uma boa simulação, são grandes e, na maioria das vezes, representam somente partes do fenômeno, uma vez que as descargas atmosféricas possuem parâmetros muito

complexos e de grandes proporções. As grandes contribuições deste trabalho estão nestas simulações experimentais e nos aspectos específicos aqui verificados, uma vez que as normas sobre o assunto não conseguem cobrir todos os detalhes e casos.

No caso das telhas metálicas, as normas (a nacional e mesmo as internacionais) apenas citam a possibilidade de utilizá-las no subsistema de captação. Este trabalho acrescenta alguns aspectos nesta utilização, chamando a atenção ao caso específico das telhas com material isolante acústico ou térmico, muito utilizadas em coberturas. Estas telhas, que podem ser do tipo sanduíche (duas chapas metálicas preenchidas com uma camada de um material isolante entre elas) ou apenas uma chapa metálica com uma outra camada isolante colada nesta chapa, são utilizadas na cobertura e em laterais de edificações com a função de isolamento térmico ou acústico. Dependendo da porosidade do material isolante, com a perfuração das chapas metálicas, devido às descargas atmosféricas, pode haver a penetração de água no interior da telha devido às chuvas, e esta água pode aumentar o peso do telhado, a ponto da estrutura não agüentar o excesso de peso e entrar em colapso, expondo ao perigo as pessoas que estiverem na sua proximidade.

Assim, este trabalho chama a atenção, no detalhe de se especificar bem a telha a ser utilizada e também o material isolante da mesma, no tocante à porosidade deste material (é melhor que tenha baixa porosidade), ou que, ao se calcular o dimensionamento da estrutura de sustentação do telhado, o projetista leve em consideração, eventuais aumentos de peso do telhado metálico.

Um outro problema aqui estudado, e que não é previsto nas normas, é o perigo de incêndio devido à chama que pode acontecer no material isolante, quando a telha for perfurada pelas descargas atmosféricas. O canal do raio possui temperaturas altíssimas e quando este atinge as chapas metálicas das coberturas, principalmente quando estas possuem uma camada de material

isolante, a temperatura no ponto de impacto é muito alta, e dá início à chama que pode dar início a um incêndio, provocando perdas materiais e até mesmo de vidas humanas.

Este trabalho apresenta exemplos de danos e perfurações para alguns tipos de telhas metálicas em diversos experimentos realizados, utilizando correntes simulando as do raio longo e do curto.

Um outro ponto em que este trabalho avança em relação às normas existentes, é referente ao uso dos terminais aéreos como pontos preferenciais para as descargas atmosféricas. Os terminais aéreos, ao serem atingidos pelas descargas atmosféricas, podem sofrer algum desgaste no ponto onde forem atingidos, porém não dão início a chamas e nem provocam perfurações nas telhas metálicas, percorridas pelas correntes de continuidade com as cargas normalizadas. Este trabalho apresenta alguns tipos de terminais aéreos, e chama a atenção para os tipos de fixação destes com as chapas metálicas, que devem ter uma boa área de contato, para que danos não aconteçam no local quando conduzirem as descargas atmosféricas. São apresentadas neste trabalho, duas tabelas que auxiliam na especificação e localização dos terminais aéreos em telhados metálicos, calculados pelo método eletrogeométrico.

Um outro ponto verificado nas experiências apresentadas é a simulação da corrente do raio longo em laboratório. As simulações mostraram que pulsos de corrente contínua representam melhor estas correntes, e um modelo dos danos em chapas metálicas é apresentado e comparado com os danos verificados nos ensaios realizados. Foram comparados também, alguns ensaios realizados com pulsos de corrente alternada, na tentativa de simulação das correntes dos raios longos, em que podemos concluir que os fenômenos envolvidos são diferentes e os danos são, portanto, diferentes também, inviabilizando este tipo de simulação experimental.

Nos ensaios onde o arco foi realizado no interior de uma camada de água, não foi verificado o efeito explosivo, nos níveis de corrente e formas de ondas utilizadas. Para uma conclusão sobre este assunto, novos testes devem ser realizados, com variações dos diversos parâmetros, como

níveis de corrente, formas de onda, composições de parâmetros (ondas conjugadas), dimensão e materiais da telha e eletrodo, entre outros. De qualquer forma, os seguintes comentários podem ser tecidos com referência aos ensaios realizados com água: os arcos com corrente impulsiva provocaram uma agitação maior na água; com correntes contínuas foi verificado um maior confinamento do arco elétrico com um dano mais uniforme sob o eletrodo, já no arco com corrente alternada foram verificados diversos furos menores na região do arco; não foi constatada a ocorrência de chama, uma vez que a água colabora para a extinção do arco nos níveis ensaiados.

As telhas de concreto protendido são utilizadas para cobrir longos vãos, da ordem de 40 a 100 metros de comprimento. A maioria das normas não permite o uso dos cabos de aço utilizados na sua sustentação, como parte do SPDA. Estas não prevêm também, os problemas advindos das perfurações no concreto oriundas das descargas atmosféricas diretas ou das descargas disruptivas devido às sobretensões no SPDA, quando atingido pelos raios, que podem oxidar os cabos de aço de sustentação pela penetração de umidade, podendo rompê-los e comprometendo a segurança. Este trabalho apresenta uma série de ensaios realizados neste tipo de cobertura, sendo que as principais conclusões são: a perfuração da camada de concreto das telhas de concreto protendido nos ensaios de impulso atmosférico depende do projeto da telha; na telha ensaiada verificou-se que o nível de tensão de impulso necessário para esta perfuração é bastante baixo, inferior a 50 kV. A comparação da tensão disruptiva de impulso de um isolador sobre a telha de concreto protendido e sobre uma placa metálica mostrou muito pouca diferença, mostrando que este tipo de telha comporta-se praticamente como um plano condutor, sob o aspecto de ensaios dielétricos. Os ensaios de impulso de corrente, com forma de onda $9,5 \times 20 \mu s$, mostraram que

correntes com valores de crista relativamente baixos (p.e. 5kA), já produzem estragos consideráveis na camada de concreto das telhas. Estes estragos dependem do projeto da telha e do caminho que a descarga percorre no concreto para atingir a ferragem aterrada.

Assim, para as telhas de concreto protendido, concluímos que dependendo do projeto da telha, uma descarga direta ou advindo de uma descarga disruptiva pode perfurá-la e com isso comprometer a sua sustentação mecânica. Para a verificação das tensões que aparecem em um SPDA, quando atingido por uma descarga atmosférica, foram realizadas simulações computacionais, onde foram calculadas as distribuições de correntes e os níveis de tensões onde foram observados que, para cálculos aproximados de distribuição de correntes em estruturas e determinação de tensão em pontos do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, o MATLAB e PSPICE se mostraram boas ferramentas. Na distribuição da corrente, a maior parcela desta flui nos condutores de descida mais próximos do ponto onde a descarga atinge o SPDA. Obviamente neste ponto, se verificarão os maiores valores de tensão nos condutores do sistema devido à circulação das correntes. As simulações mostraram que, nas edificações mais altas, os efeitos das reflexões das ondas são maiores, sendo que edificações pequenas, da ordem de dois andares, por exemplo, as correntes se distribuem de forma praticamente igual pelos condutores de descidas. Foram observados também nas simulações que, em uma mesma edificação, com o SPDA tradicional, ou seja, com descidas externas (condutores no ar) comparado com um SPDA onde se utiliza a ferragem das colunas como subsistema de descidas, os valores de tensão em pontos específicos do SPDA, são maiores no sistema dito tradicional comparado com o outro. Estas simulações mostraram também que é essencial a consideração das reflexões nos cálculos, principalmente em relação aos níveis de tensão que podem aparecer em pontos do SPDA, que são, neste caso, mais próximos da realidade.

Apesar de que, o uso das ferragens como parte integrante do SPDA já é consagrado e previsto pela maioria das normas nacionais e internacionais, alguns detalhes e algumas dúvidas ainda pairam nesta utilização, principalmente se a técnica for utilizada em edificações já construídas. Uma grande dúvida ainda seria o que acontece se a ferragem não estiver emendada e uma descarga tentar por ela passar. Há trabalhos que mostraram quebras nas colunas. Neste trabalho, há uma verificação experimental que mostrou ferragens não emendadas em uma coluna de concreto que, ao serem percorridas por impulsos de corrente (simulação do raio curto) e pulsos de corrente contínua (simulação do raio longo), não ocorreram danos no concreto e sim uma fusão do material perto da ponta da ferragem, dentro do concreto, formando uma espécie de fulgurito, tornando a ferragem com continuidade elétrica, favorecendo a condução das correntes do raio. Além disto, vários tipos de emendas foram ensaiados utilizando uma tecnologia que envolveu radiografias de raios X e medições de resistências elétricas para verificação do comportamento das emendas ao serem percorridas pelas correntes dos raios. As verificações mostraram que, todas as emendas ensaiadas, conduziram as correntes utilizadas, e não apresentaram danos, nem nas emendas, nem no concreto que as envolveram. Estas verificações certamente irão dar mais segurança na utilização das ferragens como parte integrante dos subsistemas de descidas e de aterramento dos SPDAs. Um outro ponto, ainda em discussão na sociedade científica que estuda o assunto, refere-se às medições de continuidade das ferragens em edificações existentes. A simulação realizada mostrou que os valores indicados no projeto de norma da IEC (série IEC 62305) e na norma brasileira estão razoáveis, e podem ser utilizados sem grandes preocupações.

Em relação ao uso das fundações como subsistema de aterramento de um SPDA, verificamos nos ensaios realizados, que colunas de concreto com ferragens no seu interior drenam correntes

impulsivas quando enterradas diretamente na terra. As experiências mostraram que tanto para uma composição mais rica do concreto, ou seja, um concreto mais impermeável, ou para os concretos com uma composição mais tradicional, as correntes impulsivas são drenadas para a terra, de forma que, é possível utilizar as fundações de concreto armado como subsistema de aterramento para fins de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Verificamos que, quanto mais tempo a coluna de concreto estiver em contato com a terra, mais haverá a penetração de umidade no concreto e melhor será a qualidade do aterramento. Verificamos também que, a grosso modo, há uma relação de aproximadamente 1:4 no valor da impedância de impulso ao se comparar uma ferragem embutida em concreto com uma haste cobreada enterrada na terra, ou seja, a impedância de impulso para a coluna de concreto é quatro vezes maior que a impedância de impulso de uma haste cobreada enterrada à mesma profundidade.

De uma forma geral, este trabalho acrescenta ao conhecimento atual sobre o assunto, descrito nas normas e nos trabalhos publicados em revistas científicas e anais de congressos, diversas contribuições e, principalmente, uma maior segurança no uso de componentes naturais das estruturas como parte integrante nos sistemas de proteção contra as descargas atmosféricas.

Ao se projetar um SPDA, não se deve apenas observar os requisitos das normas e segui-los fielmente como uma receita de culinária, mas sim, ter um bom conhecimento das diversas técnicas a serem utilizadas e, principalmente, ter um bom conhecimento do comportamento das descargas atmosféricas, seus parâmetros, sua formação e de que forma ela procura encontrar o seu caminho para a terra. Apesar de não se ter, na prática, um sistema 100% seguro, com estes conhecimentos se pode minimizar os efeitos danosos das descargas ao atingirem as edificações. Este trabalho procura dar um passo a mais nesta busca incessante de uma proteção perfeita.

Apêndice A

Determinação da distribuição de correntes e cálculo da tensão nos condutores de descida – Estudos iniciais, sem considerar os efeitos das reflexões.

Antes de calcularmos as tensões ao longo dos cabos de descida, é preciso calcular a distribuição de correntes sobre os mesmos. Para isso, iremos utilizar o conceito de matriz de indutâncias mútuas, que determina a interação entre os vários elementos do sistema de proteção onde fluem as correntes da descarga.

No modelamento do sistema para o cálculo da distribuição de correntes, separamos o sistema em diversos circuitos independentes (laços), nos quais circulam correntes geradas devido ao fluxo magnético que as atravessam.

Fig. A1 – Estrutura em forma de cubo

A) Sistema de proteção de uma construção.

JP é a corrente da descarga atmosférica e J1 a J4 são as correntes em cada condutor vertical aterrado, ou seja, as correntes em cada descida.

B) Modelamento para cálculo de distribuições de corrente.

JA a JD é a corrente que circula em cada um dos laços devido ao fluxo que nele atravessa, por causa da corrente principal (JP) e das correntes de outros laços.

Nesta simulação foi considerada a corrente da descarga, como sendo perpendicular à edificação, não havendo, portanto, nenhuma contribuição no fluxo magnético nos laços, da parte da descarga antes que a corrente atinja a edificação.

Podemos definir a corrente JA que circula no laço A como sendo:

$$J_A = \left(\frac{1}{R + sL} \right) \bullet \phi(s) \quad (A1)$$

Onde: ϕ -fluxo magnético total que atravessa o laço A

R, L - Resistência e indutância do circuito A

As correntes em outros laços podem ser calculadas de forma análoga. Em uma primeira aproximação, iremos calcular a distribuição de correntes, assumindo a ocorrência de um aterramento com condutividade ideal e desprezando também, a resistência R dos elementos condutivos.

A.1 CÁLCULO DE INDUTÂNCIAS MÚTUAS

Consideremos como par, o circuito A e B e vamos supor que os dois circuitos estão imersos em um meio homogêneo e linear de permeabilidade μ .

A corrente I_A (suposta única), circulando na bobina do circuito A, cria um campo magnético que causa um fluxo Ψ_{BA} , concatenado com o circuito B. Consideramos a indutância mútua entre os circuitos A e B pela relação:

$$M_{AB} = \frac{\Psi_{B,A}}{I_A} \quad (\text{Henrys}) \quad (\text{A2})$$

No cálculo de indutâncias mútuas, serão analisados dois tipos de interações:

- indutância mútua entre o condutor principal e um laço, e
- indutância mútua entre dois laços.

O fluxo em um elemento é calculado pela seguinte equação:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{A3})$$

O vetor $\vec{B}$, densidade de fluxo magnético ou vetor de indução magnética, é por sua vez calculado pelas seguintes relações:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{A4})$$

$$\oint_{\Sigma} \vec{H} x d\vec{l} = \int_S \vec{J} x d\vec{S} \quad (\text{A5})$$

Assim, podemos desenvolver alguns cálculos:

O vetor indução magnética gerado por um fio linear é dado por:

$$\vec{B} = \frac{\mu \cdot \vec{I}}{2 \cdot \pi \cdot r} (Wb/m^2) \quad (A6)$$

Então, substituindo (A6) em (A3), temos:

$$\phi_{AP} = \int_S \frac{\mu \cdot \vec{I}}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot d\vec{S} \quad (\text{A7})$$

Resolvendo a equação integral (A7) vem:

$$\phi_{AP} = \frac{\mu \cdot I_P}{2 \cdot \pi} \cdot h \cdot [\ln(r_2) - \ln(r_1)] \quad (\text{A8})$$

Onde h = altura do sistema de proteção

$r2$ e $r1$ = extremos de integração

Caso 1: condutor principal e laço adjacente:

Para o caso específico do condutor principal adjacente ao laço substitui-se em (A8):

$r2$ =aresta e $r1$ =raio do condutor.

Caso 2: condutor principal e laço não adjacente:

Neste caso, temos em (A8):

$$r_2 = \text{aresta} \cdot \sqrt{2} \quad \text{e} \quad r_1 = \text{aresta}$$

Caso 3 - Laços adjacentes:

Este caso é equivalente ao cálculo do fluxo concatenado entre duas espiras adjacentes ortogonais, onde somente os condutores verticais produzem fluxo concatenado:

$$\phi_{AB} = \frac{\mu \cdot I \cdot h}{2 \cdot \pi} \cdot \left[2 \cdot \ln(\text{aresta}) - \ln(\text{raio}) - \ln(\text{aresta} \cdot \sqrt{2}) \right] \quad (\text{A9})$$

raio = raio do condutor.

Caso 4 - Laços paralelos:

No caso de duas espiras paralelas, os condutores verticais e horizontais produzem fluxo concatenado. A equação, então, fica:

$$\phi_{AC} = 4 \cdot \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \text{aresta} \cdot \left[\ln(\text{aresta} \cdot \sqrt{2}) - \ln(\text{aresta}) \right] \quad (\text{A10})$$

Tendo-se calculado os fluxos concatenados, podemos então montar a equação, com a matriz de indutâncias mútuas:

$$\begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} & M_{AD} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} & M_{BD} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C & M_{CD} \\ M_{DA} & M_{DB} & M_{DC} & L_D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} JA \\ JB \\ JC \\ JD \end{bmatrix} = J_P * \begin{bmatrix} M_{AP} \\ M_{BP} \\ M_{CP} \\ M_{DP} \end{bmatrix} \quad (A11)$$

Onde:

M_{XY} = indutância mútua entre o circuito X e Y.

L_X = indutância própria do circuito X.

J_X = corrente que circula pelo laço X.

M_{XP} = indutância mútua entre o condutor principal e o laço X.

O cálculo da indutância própria dos laços foi feito, utilizando a seguinte fórmula:

$$L = 4 * \mu * I * h / 2 * \pi (\ln(\text{aresta}) - \ln(\text{raio})) \quad (A12)$$

A.2 MODELO DA CORRENTE DA DESCARGA ATMOSFÉRICA UTILIZADO

No cálculo das distribuições de corrente nos condutores de descida, utilizamos o modelo matemático que descreve, satisfatoriamente para o uso proposto, a corrente da descarga atmosférica:

$$i(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot t^{\beta_i} \cdot e^{(-\alpha_i \cdot t)} \quad (A13)$$

Os valores dos coeficientes da equação acima devem ser escolhidos de acordo com o tipo de descarga ("primeiro raio curto" ou "raio curto subsequente") que estaremos analisando.

Utilizamos o modelo da primeira descarga (ver Figura A2), para isto, utilizamos os seguintes valores dos coeficientes para a equação (A13), descritos na Tabela A.1:

Tabela A.1 – Coeficientes utilizados para a simulação da descarga atmosférica

Corrente	Coeficiente			
	n	β	A_i [A/ μs^2]	α_i [1/ μs]
Primeiro raio curto	4	2	100500	0.99
			390	0.063
			2100	0.18
			14500	0.4
Raio curto subsequente	4	2	270000	3.3
			40000	1.26
			4800	0.44
			360	0.125

Estes coeficientes foram também utilizados pelo pesquisador Andrzej Sowa, da Technical University of Bialystok, Polônia, no seu trabalho “Calculation of lightning current distribution in buildings” [66].

Figura A2 - Gráfico do modelo da corrente de descarga atmosférica utilizado.

A.3 CÁLCULOS NO MATLAB

Todos os cálculos e gráficos para a determinação das correntes nos laços da estrutura foram feitos no MATLAB. Os cálculos das correntes foram realizados no domínio da frequência, através da transformada de Laplace, como forma de simplificar os cálculos.

O programa calcula todos os elementos da matriz de indutâncias mútuas, forma a matriz, e a seguir, resolve a equação matricial no domínio de Laplace, considerando que toda a corrente da descarga é injetada no condutor principal. Depois de ter obtido as expressões da transformada das correntes nos laços, o programa antitransforma essas expressões, obtendo valores no domínio do tempo, que são necessários no cálculo da corrente que flui em cada um dos condutores de descida. Os cálculos das correntes nos condutores de descida são descritos abaixo:

$$\vec{J}_1 = \vec{J}_P - \vec{J}_A - \vec{J}_B \quad (\text{A14})$$

$$\vec{J}_2 = \vec{J}_B - \vec{J}_C \quad (\text{A15})$$

$$\vec{J}_3 = \vec{J}_C + \vec{J}_D \quad (\text{A16})$$

$$\vec{J}_4 = \vec{J}_A - \vec{J}_D \quad (\text{A17})$$

Para uma estrutura cúbica de aresta igual a 24m, obteve-se a seguinte equação de indutâncias:

$$\begin{bmatrix} 0.171e-3 & 0.41e-4 & 0.66e-5 & -0.41e-4 \\ 0.41e-4 & 0.171e-3 & -0.41e-4 & 0.66e-5 \\ 0.66e-5 & -0.41e-4 & 0.171e-3 & 0.41e-4 \\ -0.41e-4 & 0.66e-5 & 0.41e-4 & 0.171e-3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} JA \\ JB \\ JC \\ JD \end{bmatrix} = JP * \begin{bmatrix} 0.426e-4 \\ 0.426e-4 \\ 0.166e-5 \\ 0.166e-5 \end{bmatrix} \quad (A18)$$

Calculou-se também a porcentagem do valor de pico da descarga em cada condutor de descida:

$$\begin{bmatrix} \bar{J}1\% \\ \bar{J}2\% \\ \bar{J}3\% \\ \bar{J}4\% \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 58.3 \\ 16.7 \\ 8.3 \\ 16.7 \end{bmatrix} \quad (A19)$$

Estes valores são importantes para o cálculo das tensões nos condutores do sistema de proteção descrito a seguir.

A.4 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES NOS CONDUTORES DE DESCIDA.

Neste cálculo, levaremos em conta a porcentagem do pico de corrente em cada condutor de descida e, desta forma, obteremos o valor máximo da tensão nos condutores.

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (A20)$$

Consideramos que a porcentagem de variação de corrente, em cada condutor, coincide com a porcentagem do valor de crista da corrente de descarga.

O cálculo da indutância própria, por metro de fio, obtido na referência [20], é feito pela seguinte equação:

$$L = 0.2 \cdot [2.303 \cdot \log(4000/d) - 0.75] (\mu \text{H/m}) \quad (\text{A21})$$

onde:

d = diâmetro do fio (mm)

Poderíamos pegar a variação da corrente pela equação da descarga modelada acima, mas decidi-se considerar o valor indicado pela norma IEC 1024-1-1 [49] de $100\text{kA}/\mu\text{s}$, para os níveis III e IV.

Utilizando-se fio condutor com seção de 35mm^2 , obtivemos os seguintes resultados nos pontos indicados na Figura A3:

$$\begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \end{bmatrix} = 1 \cdot 10^6 \begin{bmatrix} 3.5 \\ 1.0 \\ 0.5 \\ 1.0 \end{bmatrix} \text{ (Volts)} \quad (\text{A22})$$

Figura A3 – Pontos onde foram calculadas as tensões

Utilizaremos agora o método acima descrito para o cálculo de tensões ao longo de condutores de descida de uma estrutura um pouco mais complexa (ver Figura A4), simulando uma edificação com comprimento e largura superiores à altura e cuja representação está demonstrada abaixo.

Figura A4 – Estrutura mais complexa – descarga atingindo o centro da edificação

Figura A5 – Estrutura mais complexa – definição dos laços

Como na estrutura anterior, dividimos a estrutura em vários laços, gerando assim uma matriz de indutâncias mútuas de ordem 12x12 (ver Figura A5). As direções em que circulam as correntes nos laços são determinadas pelo fluxo gerado pela corrente principal JP. Os valores em

porcentagem das correntes que circulam nos laços e as correntes que descem por cada condutor são descritos a seguir:

$$\begin{bmatrix} J1\% \\ J2\% \\ J3\% \\ J4\% \\ J5\% \\ J6\% \\ J7\% \\ J8\% \\ J9\% \\ J10\% \\ J11\% \\ J12\% \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.45 \\ 1.45 \\ 1.45 \\ 1.45 \\ 1.45 \\ 1.45 \\ 1.45 \\ 1.45 \\ 14.79 \\ 14.79 \\ 14.79 \\ 14.79 \end{bmatrix} \quad (A23)$$

$$I_{descida}(\%) = \begin{bmatrix} 2.9 & 11.8 & 2.9 \\ 11.8 & 40.9 & 11.8 \\ 2.9 & 11.8 & 2.9 \end{bmatrix} \quad (A24)$$

Sendo:

(A23)- porcentagem da corrente de descarga que circula pelos laços.

(A24)- porcentagem da corrente da descarga que desce por cada condutor de descida.

Assim, para uma estrutura com esta configuração, quando a descarga atinge o centro da edificação, quase a metade da corrente (aproximadamente 41%) flui pela descida interna central (a mais perto do ponto onde a descarga atingiu o SPDA). Aproximadamente, 12% da corrente fluem em cada descida externa, localizada nos pontos centrais das paredes e, aproximadamente, 3% da corrente flui em cada descida instalada nos cantos da edificação.

Obtivemos também os seguintes resultados de picos de tensão nos condutores de descida:

$$V_{\max} = \begin{bmatrix} 74.8 & 296.4 & 74.8 \\ 296.4 & 1026.6 & 296.4 \\ 74.8 & 296.4 & 74.8 \end{bmatrix} \text{ (kV)} \quad (\text{A25})$$

A representação em 3D da tensão máxima nos condutores pode ser vista na Figura A6:

Figura A6 – Representação da tensão nos condutores em 3D.

Observa-se, claramente neste gráfico, que os valores máximos de tensões nos condutores situam-se próximos ao ponto de impacto da descarga, imediatamente abaixo da haste central do pára-raio.

Consideramos, para os cálculos das tensões, os seguintes parâmetros:

Aresta: 10m altura: 10m condutor: 35mm²

Assim, considerando-se outras variações de corrente (kA/μs), podemos estimar os maiores valores de tensão que irão surgir, neste caso, no ponto mais próximo do ponto de impacto no SPDA. A Tabela A.2 mostra estes valores, em função da variação da corrente.

**Tabela A.2: Valor máximo de tensão no SPDA em função da variação da corrente –
Descarga atingindo o ponto central**

Variação da corrente (kA/ μ s)	Valor máximo de tensão no SPDA (Ponto central) – (kV)
100	1027
50	513
30	308
10	103

Caso 2: raio atingindo outra parte do sistema de proteção

Uma outra simulação foi feita considerando que a descarga atingiu a quina da edificação, caso bastante freqüente, principalmente, quando se utiliza o Método das Gaiolas de Faraday. A configuração dos laços é mostrada na Figura A7.

Figura A7 – Definição dos laços – Descarga atingindo o canto da edificação

A figura A7 apresenta a definição dos laços, para uma simulação feita para um raio atingindo a edificação em um dos cantos. A mudança feita provocou algumas mudanças em relação ao caso anterior, no qual o raio atingia o condutor central. Alteraram-se os valores e o sentido das correntes induzidas nos laços devido ao condutor principal, agora situado em uma das extremidades da estrutura. Os sinais das indutâncias mútuas, conseqüentemente, também mudaram. Considerando os seguintes parâmetros para cálculo da distribuição de correntes e tensões nos nós:

Aresta:10m altura:10m condutor: 35mm²

Obtivemos para uma variação de corrente, igual a 100 kA/ μ s, as seguintes tensões nos nós:

$$V = \begin{bmatrix} 125.9 & 59.1 & 60.9 \\ 295.4 & 78.3 & 59.1 \\ 1410.9 & 295.4 & 125.9 \end{bmatrix} \text{ kV}$$

Nestas mesmas condições, obtivemos a seguinte distribuição das correntes nos condutores de descida:

$$I = \begin{bmatrix} 5.0 & 2.3 & 2.4 \\ 11.8 & 3.1 & 2.3 \\ 56.2 & 11.8 & 5.0 \end{bmatrix} \%$$

Graficamente, podemos verificar a distribuição das tensões na Figura A8:

Figura A8 – Distribuição da tensão em 3D – Descarga atingindo o canto

Assim podemos verificar que a maior parte da corrente, neste caso, flui pelo condutor do canto onde houve o ponto de impacto (56% da corrente). A corrente vai se distribuindo nos condutores mais próximos, sendo aproximadamente 12% nos imediatamente mais próximos e 5% nos condutores dos demais cantos mais próximos. Cerca de 88% da corrente flui pelas laterais adjacentes, incluindo o canto onde houve o impacto da descarga.

Neste caso, considerando-se outras variações de corrente, podemos estimar os maiores valores de tensão que irão surgir no canto onde houve o impacto da descarga. A Tabela A.3 mostra estes valores em função da variação da corrente.

**Tabela A.3: Valor máximo de tensão no SPDA em função da variação da corrente –
Descarga atingindo o canto**

Variação da corrente (kA/ μ s)	Valor máximo de tensão no SPDA (Canto onde houve o ponto de impacto) – (kV)
100	1410
50	705
30	423
10	141

Assim nestas simulações verificou-se que, quando a descarga atinge a quina de uma edificação com esta configuração, mais de 50% da corrente flui pelo condutor de descida da quina mais próxima do ponto de impacto do raio. A distribuição da corrente vai diminuindo conforme aumenta a distância do condutor de descida do ponto de impacto da descarga. Consequentemente, em todos os casos estudados, os maiores valores de tensão são observados próximos do ponto de impacto, sendo encontrados valores superiores a 1000kV que podem causar descargas disruptivas entre o SPDA e a edificação ocasionando danos.

Considerando ainda não apenas um condutor nas descidas, mas quatro condutores em cada descida como se fossem as ferragens que formam a coluna, novas simulações foram feitas para a situação em que a descarga atingiu o centro da edificação, conforme a Figura A9.

Figura A9: Considerando as descidas formadas por quatro condutores em paralelo para formação da coluna.

Neste caso, os resultados estão apresentados na Tabela A.4, incluindo a distribuição da corrente.

**Tabela A.4: Valor máximo de tensão no SPDA em função da variação da corrente –
Descarga atingindo o centro – colunas com quatro condutores.**

Variação da corrente (kA/ μ s)	Valor máximo de tensão no SPDA - (Centro) (kV)	Distribuição da corrente (% do valor de pico)
100	481	Condutor 1: 77%
		Condutor 2: 4,2%
		Condutor 3: 1,7%
50	240	Condutor 1: 77%
		Condutor 2: 4,2%
		Condutor 3: 1,7%

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “**IEC 61024-1** – Protection of structures against lightning – Part 1: General principles”, 1990
- [2] HASSE, P. “Lightning protection for building structures and for electronic installations – two different protection concepts in the IEC standards”. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., São Paulo, 1999. **Anais SIPDA**. São Paulo, 1999 - p. 81-84.
- [3] RAKOV, V. A. - “Rocket-triggered lightning experiments at Camp Blanding, Florida” – In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., São Paulo, 1999. **Anais SIPDA**. São Paulo, 1999 - p. 373-388.
- [4] PIANTINI, A.; CARVALHO, T.O.; SILVA NETO, A.; JANISZEWSKI, J.M.; ALTAFIM, R.A.C.; NOGUEIRA, A.L.T. – “A system for lightning induced voltages data acquisition – preliminary results”. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 7., Curitiba, 2003. **Anais SIPDA** - São Paulo: Lene Gráfica e Editora, 2003 - p. 156-161.
- [5] CARVALHO, T.O. – “Desenvolvimento de sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de média tensão por descargas atmosféricas”. In: **Dissertação** apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção de título de mestre em engenharia, 2004.
- [6] SCHROEDER, M.A.O.; SOARES JUNIOR, A.; VISACRO FILHO, S, - “The Brazilian experience on measurement of lightning parameters by means of instrument towers”. In:

GROUND'2000 - International Conference on Grounding and Earthing, 3. Rio de Janeiro, 2002 – **Anais GROUND**, 2000 - Belo Horizonte , p. 123-127.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Cabos pára-raios com fibras ópticas para linhas áreas de transmissão (OPGW) – Determinação dos efeitos da descarga atmosférica – Método de ensaio - **NBR 14586/2000**”, 2000.

[8] UMAN, M.A. “The lightning discharge”, **livro**, International Geophysics Series, v. 39, Academic press, inc., 1987.

[9] LEITE, D.M.; LEITE, C.M. “Proteção contra Descargas atmosféricas”. São Paulo: Officina de Mydia, **livro**, 1997.

[10] GRENET, G. – “Essai d’Explication de la Charge Électrique des Nuages d’Orages”. In: **Ann. Geophys.**, 3 - p. 306-307, 1947.

[11] GRENET, G. – “Le Nuages d’Orages: Machine Electrostatique”. In: **Meteorologie**, I-53 - p. 45-47, 1959.

[12] VONNEGUT, B. – “Possible Mechanism for the Formation of Thunderstorm Electricity”. In: Bull. Am. Meteorol. Soc., 34: 378 e **Anais Int. Conf. Atmos. Electr.**, Portsmouth - p. 169-181, 1953.

- [13] WAGNER, P.B.; TELFORD, J.V. – “Charge Dynamics and a Electric Charge Separation Mechanism in Convective Clouds”. In: **J. Rech. Atmos.**, 15 – p. 97-120, 1981.
- [14] MAGONO, C. – “Thunderstorms”. In: Elsevier, Amsterdam, **livro**, 1980.
- [15] WILLIAMS, E.R. – “Large Scale Charge Separation in Thunderclouds”. In: **J. Geophys. Res.**, 90 – p. 6013-6025, 1985.
- [16] HAGENGUTH, J.H.; ANDERSON, J.G. – “Lightning to the Empire State **Building**, Part III”. In: **AIEE**, 71 (Pt. III) - p. 641-649, 1952.
- [17] KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E.J. – “Continuing Currents in Cloud-to-ground Lightning Discharge”. In: **J. Geophys. Res.**, 67 - p. 637-647, 1962.
- [18] KREHBIEL, P.R.; BROOK, M.; McCRORY, R.A. – “An Analysis of the Charge Structure of Lightning Discharges to Ground”. In: **J. Geophys. Res.**, 84 - p. 2432-2456, 1979.
- [19] BROOK, M.; KITAGAWA, N.; WORKMAN, E.J. – “Quantitative Study of Strokes and Continuing Currents in Lightning Discharges to Ground”. In: **J. Geophys. Res.**, 67 - p. 649-659, 1962.
- [20] WILLIAMS, D.P.; BROOK, M. – “Magnetic Measurement of Thunderstorm Currents, 1. Continuing Currents in Lightning”. In: **J. Geophys. Res.**, 68 - p. 3243-3247, 1963.

[21] BERGER, K.; VOGELSANGER, E. – “Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955-1963 auf dem Monte San Salvatore”. In: **Bull Schweiz. Elektrotech. Ver.**, 56 - p. 2-22, 1965.

[22] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “Draft **IEC 81/216/CDV** (Committee Draft for vote), Project number IEC 62305-1, Ed.1, Protection against lightning – Part 1: General principles”, 2003.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT** – “Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas – NBR 5419”, fevereiro de 2001.

[24] ANDERSON, R.B.; ERIKSSON, A.J. – “Lightning parameters for engineering application” – In: **ELECTRA** N° 69, March 1980 - p. 65 - 102.

[25] BERGER, K.; ANDERSON, R.B.; KRONINGER, H. – “Parameters of lightning flashes” – In: **ELECTRA** N° 41, July 1975 - p. 23 - 37.

[26] TESTE, Ph.; LEBLANC, T.; UHLIG, F.; CHABRERIE, J.P. “3D modeling of the heating of a metal sheet by a moving arc: application to aircraft lightning protection”. The European Physical **Journal** applied Physics, V.11 - p.197-204, 2000.

[27] RAKOV, V.A.; UMAN, M.A. – “Lightning – Physics and Effects”, Cambridge University Press, United Kingdom, **livro**, 2004.

[28] CHISHOLM, W.A.; PON, C.; LEVINE, J.P. “Lightning protection aspects for applications of optical fiber ground wire”. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 6., Santos, 2001. **Anais SIPDA**. São Paulo, 2001 - p.451-457.

[29] THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. “**IEEE Standard 1138** – Construction of composite fiber optic overhead ground wire (OPGW) for use on electric utility power lines”, 1994

[30] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “**IEC st 60794-1** – Optical fibre cables – Part 4-1: Aerial optical cables for high-voltage power lines” – January 1999.

[31] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “**IEC 61643-1 / 2002** - Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Part 1: Performance requirements and testing methods”, 2002.

[32] ALVIM, M.G. et al. “Cabo OPGW – Desempenho quanto a descargas atmosféricas – critério de aceitação de Furnas”. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 26., Campinas, 2001. **Anais XVI SNPTEE** – S.P – CD-ROM.

[33] LOEWENTHAL, C.F. “Avaliação dos efeitos de descargas atmosféricas em cabos OPGW – normalização do método de ensaio”. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 26., Campinas, 2001. **Anais XVI SNPTEE** – S.P – CD-ROM.

[34] LEITE, D.M.; SUETA, H.E.; d'ÁVILA, R.S. “Practical problems with metallic and prestressed concrete tiles”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26., Cracow, Poland, 2002. **Anais ICLP**. Cracow, Poland, 2002. v. II, 10a.5 - p.815-820.

[35] SUETA, H. E.; LEITE, DUÍLIO M. – “Problemas práticos na proteção de edificações com telhados metálicos e de concreto protendido contra descargas atmosféricas”. In: 10º Encontro Nacional de Instalações Elétricas – ENIE 2004. **Anais ENIE**. São Paulo, S.P., 15 a 17 de Junho de 2004.

[36] SUETA, H. E.; BURANI, G.F. – “The use of metallic tiles as part of lightning protection systems of structures”. In: GROUND'2004 and 1st LPE – International Conference on Grounding and Earthing & 1st International Conference on Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Brasil. **Anais GROUND**, p. 129-132, Novembro, 2004.

[37] SUETA, HÉLIO E.; BURANI, GERALDO F. - “Sistemas de proteção contra raios com uso de telhas metálicas” – In: **Revista ELETRICIDADE MODERNA** – Editora Aranda – ANO XXXIII – Nº 373, ABRIL 2005, p. 238 - 247.

[38] MEPPELINK, J. “The impact of a lightning stroke on a flat roof when the building is filled with water”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24., Birmingham, U.K., 1998. **Anais ICLP**, p. 826-831.

[39] SUETA, H.E.; BRAZ, C. P.; d'ÁVILA, R. S.; LEITE, D. M. – “Lightning protection in prestressed concrete tiles covered buildings”. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 7., Curitiba, 2003. **Anais SIPDA**. São Paulo, 2003. - p.185-190.

[40] DARVENIZA,M.; FLISOWSKI, Z.; KERN, A.; LANDERS, E.U.; MAZZETTI, C.; ROUSSEAU, A.; SHERLOCK, J.; LO PIPARO, G.B. – “Application problems of the probabilistic approach to the assessment of risk for structures and services”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26., Cracow, Poland, 2002. **Anais ICLP**. Cracow, Poland, 2002. v. II, 10b.1 - p.821-826.

[41] ZISCHANK, W.J.; HEIDLER, F.; WIESINGER, J.; KERN, A.; SEEVERS, M. – “Shielding effectiveness of reinforced concrete cable ducts carrying partial lightning currents”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24., Birmingham, U.K., 1998 – **Anais ICPL**, p. 735-740.

[42] CELLI, G.; PILO, F. – “EMTP models for current distribution evaluation in LPS for high and low buildings”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25., Rhodes, GREECE, 2000 – **Anais ICLP**, p. 440-445.

- [43] MING, Y.; SCUKA, V. – “A LEMP Interference Model for Concrete Steel-Reinforced Structures”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21., Berlim, GERMANY, 1992 – **Anais ICLP**, p. 171-175.
- [44] KATO, J.; KAWANO, H.; TOMINAGA, T.; KURAMOTO, S. – “Investigation of lightning surge current induced in reinforced concrete buildings by direct strikes”. In: IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2001; Volume 2, aug. 2001 – **Anais**, p. 1009-1014.
- [45] SARTORI, C. A. F.; CARDOSO, J. R.; ORLANDI, A. – “Transient Induced Voltage Computation in a High Building Struck by Lightning”. In: **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 34, Nº 5, September 1998 - p. 2815-2818.
- [46] ZISCHANK, W.J.; METWALLY, I.A.; HEIDLER, F. N – “Campos magnéticos e tensões induzidas: o efeito de blindagem das armaduras do concreto”. In: **Revista ELETRICIDADE MODERNA**, Maio 2004 – p. 168 – 180.
- [47] SOWA, A. – “Surge current distribution in building during a direct lightning stroke” – In.: **IEEE – EMC Society Meeting** – p.103 - 105, 1991.
- [48] SOWA, A. – “Lightning overvoltages in wires within the buildings” – In.: 1991 **IEEE – EMC Society Meeting** –p.99 - 102, 1991.

[49] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “**IEC 1024-1-1**, Protection of structures against lightning – Part 1: General principles – section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems”, 1993.

[50] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “**IEC 61024-1-2**, Protection of structures against lightning – Part 2: General principles – section 1: Guide B – Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection systems”, 1998.

[51] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “Draft **IEC 81/216/CDV** (Committee Draft for vote), Project number IEC 62305-1, Ed.1, Protection against lightning – Part 1: General principles”, 2003.

[52] DARVENIZA, M.– “The placement of air terminals to intercept lightning in accordance with standards – revisited”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26., Cracow, Poland, 2002. Cracow, Poland, 2002. v. II, 10a.3 – **Anais ICLP**, p.803-808.

[53] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. “**NFPA st 780** – The installation of lightning protection systems”, 1997.

[54] LEE, R.H. – “Protection zones for buildings against lightning strokes using transmission line practice”. In: **IEEE Trans. Industry Applications**, Vol. 1A-14, Nov/Dec 1978 - p 465-469.

[55] D’ALESSANDRO, F. – “Scientific validation of a placement method and proposal for inclusion in lightning protection standards”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26., Cracow, Poland, 2002. Cracow, Poland, 2002. v. II, 10a.2 – **Anais ICLP**, p.797-802.

[56] MOUSA, A. M. – “Validity of the collection volume method/field intensification method for the placement of lightning rods on buildings”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26., Cracow, Poland, 2002. Cracow, Poland, 2002. v. II, 10a.4 – **Anais ICLP**, p.809-814.

[57] ANDERSON, R.B.; ERIKSSON, A.J.; KRONINGER, H. – “Lightning and tall structures: Some preliminary observations”. In: 4th International Conference on Gas Discharges, IEE Publication N° 143 – **Anais**, p. 264-267, 1976

[58] ANDERSON, R.B.; ERIKSSON, A.J. – “Lightning Parameters for Engineering Application”. In: **ELECTRA**, N° 69 - p. 65-102, 1980.

[59] D’ALESSANDRO, F.; GUMLEY, J.R. – “Electric Field Modelling of Structures under Thunderstorm Conditions”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION - 1978 – **Anais ICLP**, p. 457-462, Birmingham, Britain, 1978.

[60] D’ALESSANDRO, F.; GUMLEY, J.R. – “The Development of the Three Dimensional Collection Volume Method as an Improved Electrogeometric Model for the Protection of

Structures”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 2000 – **Anais ICLP**, p. 311 – 317, Rhodes, Greece, 2000.

[61] D’ALESSANDRO, F.; GUMLEY, J.R. – “A “Collection Volume Method” for the Placement of Air Terminals for the Protection of Structures against Lightning”. In: **Journal of Electrostatics**, N° 50 - p. 279-302, Elsevier Publishing Company, 2000.

[62] D’ALESSANDRO, F.; DARVENIZA, M. – “Field Validation of an Air Terminal Placement Method”. In: VI International Symposium on Lightning Protection, Santos, Brasil, November, **Anais SIPDA**, 2001.

[63] PINTO JR., O.; SABA, M.M.F.; SOLORZANO, N.N. – “Triggered lightning research at INPE: first results” – In: VI SIPDA - International Symposium on Lightning Protection, **Anais SIPDA**, 2001.

[64] BERGER, G.; HADAJI, R. – “Lightning attachment physics” - In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., São Paulo, 1999. São Paulo, 1999 – **Anais SIPDA**, p. 471-494.

[65] McIVOR, S.D.; CARPENTER, R.B.; DRABKIN, M.M. – “Evaluation of Early Streamer Emission Air Terminals”. In: http://www.ees-group.co.uk/downloads/ESE_paper.PDF.

- [66] MACKERRAS, D.; DARVENIZA, M.; LIEW, A. C. – “Review of claimed enhanced lightning protection of building by early streamer emission air terminal”. In: **IEE Proceedings Sci. Meas. Technol.**, Vol. 144, N° 1, January 1997.
- [67] CARPENTER, R.B. Jr; DRABKIN, M.N. – “Lightning Strike Protection” – **Technical library** of Lightning Eliminators & Consultants, Inc. In: <http://www.lightningeliminators.com>.
- [68] LEITE, D.M.; KAMEYAMA, F.H. – “Use of the concrete reinforcing steel as natural components of external lightning protection system: laboratory investigations” – In: 20th ICLP - INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 20., Interlaken, Switzerland, 1990. Interlaken, Switzerland, 1990, 3.6 – **Anais ICLP**, p. 3.6/1 a 3.6/5.
- [69] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “**IEC 60.1** - High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements”, 1989.
- [70] SOWA, A. – “Calculation of lightning current distribution in buildings” – In.: 21st ICLP – INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, **Anais ICLP**, p.111 - 115, Berlin, Germany, 1992.
- [71] SARTORI, C. A. F.; CARDOSO, J. R. – “EMC aspects in a steel structure struck by lightning”. In.: 1995 International Symposium on EMC, Atlanta – GA, USA, August 1995 – **Anais**, p. 248-252.

[72] BERMUDEZ, J.L.; RUBINSTEIN, M.; RACHIDI, F.; HEIDLER, F.; PAOLONE, M. – “Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning” - September 2002 – In: **Journal of Geophysical Research**, vol 108.

[73] SUETA, HÉLIO E.; BURANI, GERALDO F. - “Experimental comparison of steel rebars junctions in concrete columns used as down conductors in lightning protection systems” – In: GROUND’2004 & 1st LPE – International Conference on Grounding and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects - Belo Horizonte - MG – **Anais GROUND**, novembro de 2004.

[74] SUETA, HÉLIO E.; BURANI, GERALDO F. - “Emendas em ferragens para proteção contra descargas atmosféricas” – In: **Revista ELETRICIDADE MODERNA** – Editora Aranda – ANO XXXIII – Nº 373, ABRIL 2005 - p. 54 - 65.

[75] GRAY, A. – “Principles and Practice of Electrical Engineering”, 5ª Edition, McGraw Hill Book Company, **livro**, 1940.

[76] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. “Draft **IEC 81/240/CDV** (Committee Draft for vote), Project number IEC 62305-3, Ed.1, Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard”, 2004.

[77] PENTEADO JR., ADERBAL DE A., JANISZEWSKI, JORGE M.; KODAIRA, CLOVIS, Y.; ALTAFIM, RUY – “Comportamento de aterramentos (padrão Eletropaulo, CESP, CPFL) sob

impulso” – **Nota Técnica** CED 141/ PROT 002/ NT 003/ OR do projeto Aterramento de sistemas aéreos de distribuição – Dez. 1994 – CESP / CPFL / ELETROPAULO / EPUSP / IEE-USP