

8

Instalações de Para-raios Prediais

8.1 Generalidades sobre os Raios

8.1.1 Formação das nuvens de tempestade

A formação das nuvens de tempestade ocorre usualmente nos finais de tarde (entre as 16 e as 18h), como consequência do aquecimento da Terra pelo Sol, que produz correntes ascendentes de ar úmido, as quais vão ao encontro de camadas mais altas e mais frias da baixa atmosfera. Sobre as montanhas, o horário mais propício para a formação dessas nuvens é entre as 13 e as 14h.

O processo de formação das nuvens de tempestades inicia-se com o aquecimento da mistura de ar e vapor d'água nos dias quentes, que se expande, diminui de densidade e sobe para camadas mais frias da atmosfera. Se nessas camadas a temperatura for igual ou inferior ao ponto de orvalho (ou de condensação), o vapor volta ao estado líquido sob a forma de gotículas, dando origem às nuvens.

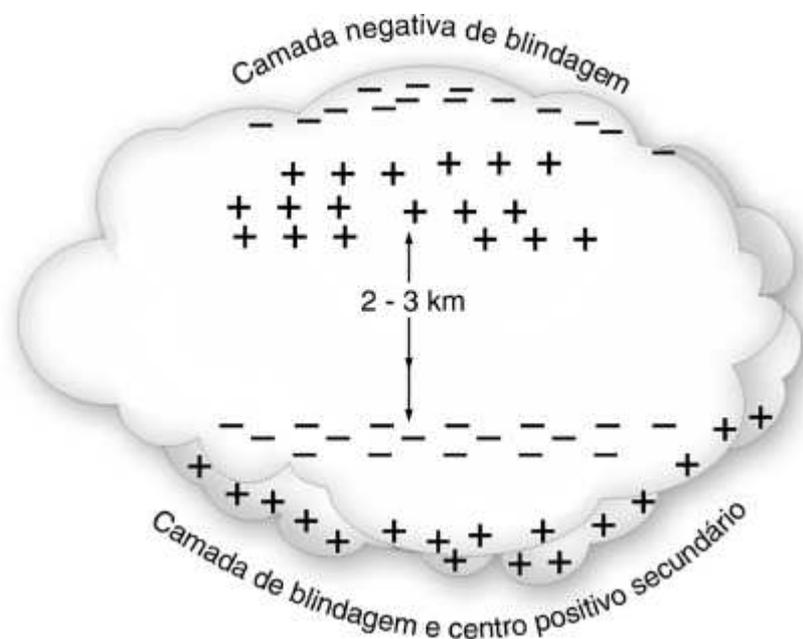
As nuvens comuns – chamadas de *Cumulus* – combinam-se em *Cumulus Congestus*, nuvens que produzem chuvas sem relâmpagos. Instabilidades térmicas na atmosfera promovem a transformação da nuvem *Cumulus Congestus* para *Cumulonimbus* (Cbs), nuvens convectivas eletrificadas, as quais apresentam processos internos de transporte de massa, calor e cargas elétricas, com produção de um a quatro relâmpagos por minuto.

8.1.2 Separação de cargas nas nuvens

A descarga atmosférica é um processo de transformação de energia eletrostática em energia eletromagnética (ondas de luz e de rádio), térmica e acústica. Em estágios mais avançados de carregamento da nuvem, os valores de campo elétrico ao nível do solo abaixo da nuvem atingem 10 kV/m (100 vezes maiores do que em condição de tempo bom) e, no interior da nuvem, os campos atingem centenas de milhares de volts por metro.

Esses processos de separação de cargas, na maioria das vezes (95%), resultam em nuvens com uma estrutura elétrica tripolar, conforme mostra a Figura 8.1, com:

- centro de cargas principal positivo (cerca de 30 coulombs) – espalhado pela parte superior da nuvem, próximo ao topo;



Estrutura elétrica de uma típica nuvem de tempestade.

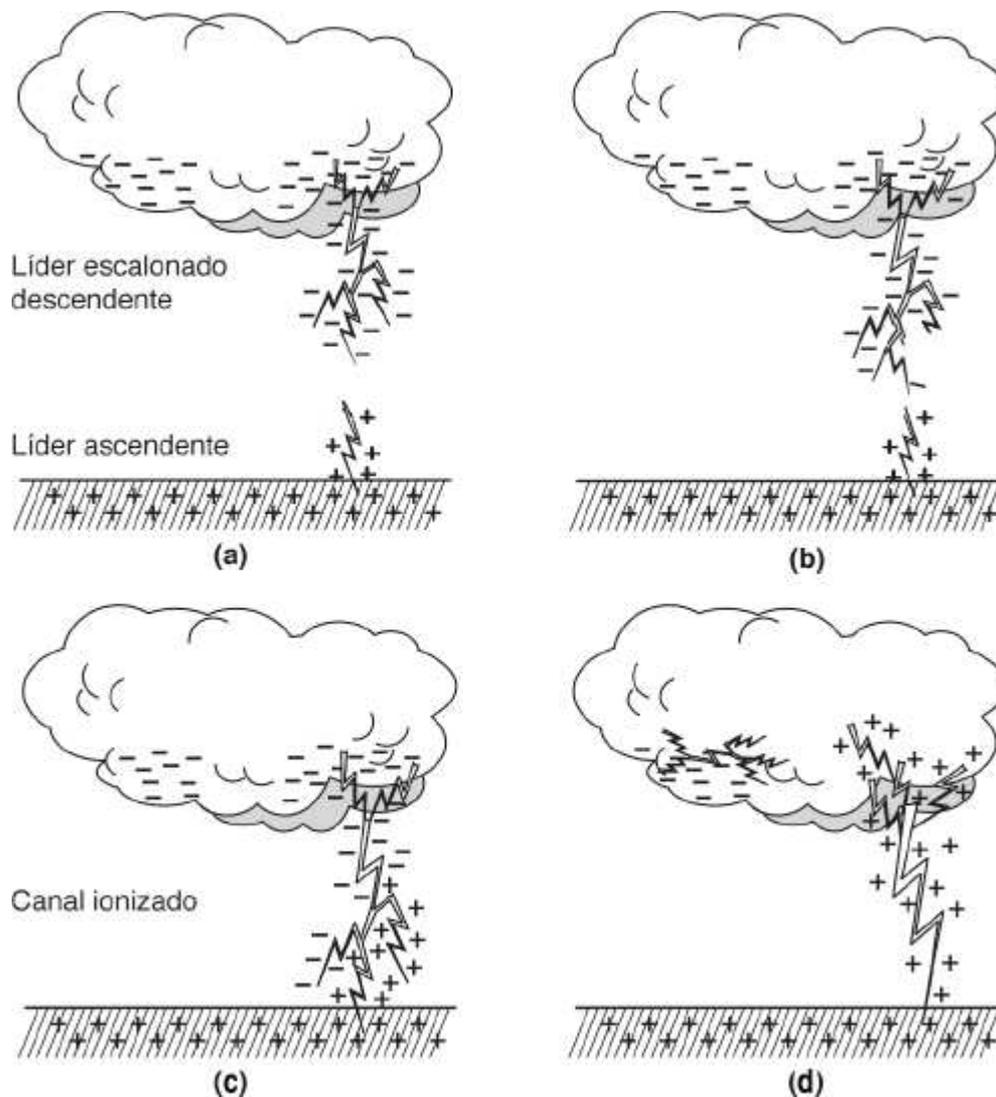
Figura 8.1

- centro de cargas principal negativo (cerca de 30 coulombs) – concentrado em uma camada horizontal em uma região da nuvem em que a temperatura é de, aproximadamente, 210 °C;
- centro de cargas secundário positivo (cerca de 5 coulombs) – próximo à base da nuvem, formado por processo termoelétrico.

8.1.3 Formação do raio

Os raios descendentes de polaridade negativa são os mais frequentes (90% em estruturas com altura inferior a 100 m), de acordo com pesquisas realizadas em todo o mundo, sendo que a sua formação, de maneira geral, passa pelas seguintes etapas (Figura 8.2):

- a concentração de cargas na parte central da nuvem excede a suportabilidade do ar (de 10 a 30 kV/cm) e ocorre uma descarga;
- a descarga se propaga em direção às regiões da nuvem mais eletricamente carregadas, com intensa formação de descargas secundárias em forma de ramificações;
- uma descarga-piloto consegue sair da nuvem (cerca de apenas 15% das que se formam no interior da nuvem), chamada de “líder escalonado” ou “líder descendente”, e inicia uma descida em direção ao solo em saltos de direção aleatória, transportando uma carga negativa de 10 ou mais coulombs;
- cada salto possui a extensão de dezenas de metros e pode ser caracterizado por pulsos de corrente da ordem de 1 kA (valor de pico) com duração de 1 ms, espaçados por intervalos de 20 a 50 ms, resultando em uma corrente média de algumas centenas de ampères a uma velocidade média de descida da ordem de 200 km/s;
- essa descida do raio em saltos discretos é atribuída, entre outros fatores, ao efeito do vento, que dispersa a frente de ar ionizado e impõe um processo intermitente de ionização e ruptura do dielétrico do ar;
- próximo ao solo, o campo elétrico, associado a uma diferença de potencial superior a 1 MV entre o “líder descendente” e a terra, promove o rompimento do dielétrico do ar nas irregularidades do terreno, propiciando a formação de *streamers*;
- quando um “líder descendente” encontra o “líder ascendente”, ou o solo na falta do mesmo, estabelece-se um canal condutor ionizado entre a nuvem e o solo, por onde circula a descarga de retorno;
- a extensão do salto inicial da descarga de retorno é proporcional à intensidade da sua corrente (para uma descarga de 10 kA, o salto é da ordem de 45 metros), com uma velocidade de subida próximo ao solo na faixa de 1/3 da metade da velocidade da luz, diminuindo à medida que se aproxima da nuvem, e um tempo de trajeto da ordem de 100 ms;
- após a descarga de retorno, que se constitui na componente mais intensa do relâmpago e responsável pela sua luminosidade, podem ocorrer outras pelo mesmo canal, de polaridades alternadas e intensidades usualmente menores, sendo o tempo típico de duração de relâmpago da ordem de meio segundo.



Etapas de formação do raio.

Figura 8.2

A Figura 8.3 apresenta as quatro alternativas possíveis para descargas para o solo, que se distinguem pela origem e polaridade da descarga inicial, a saber:

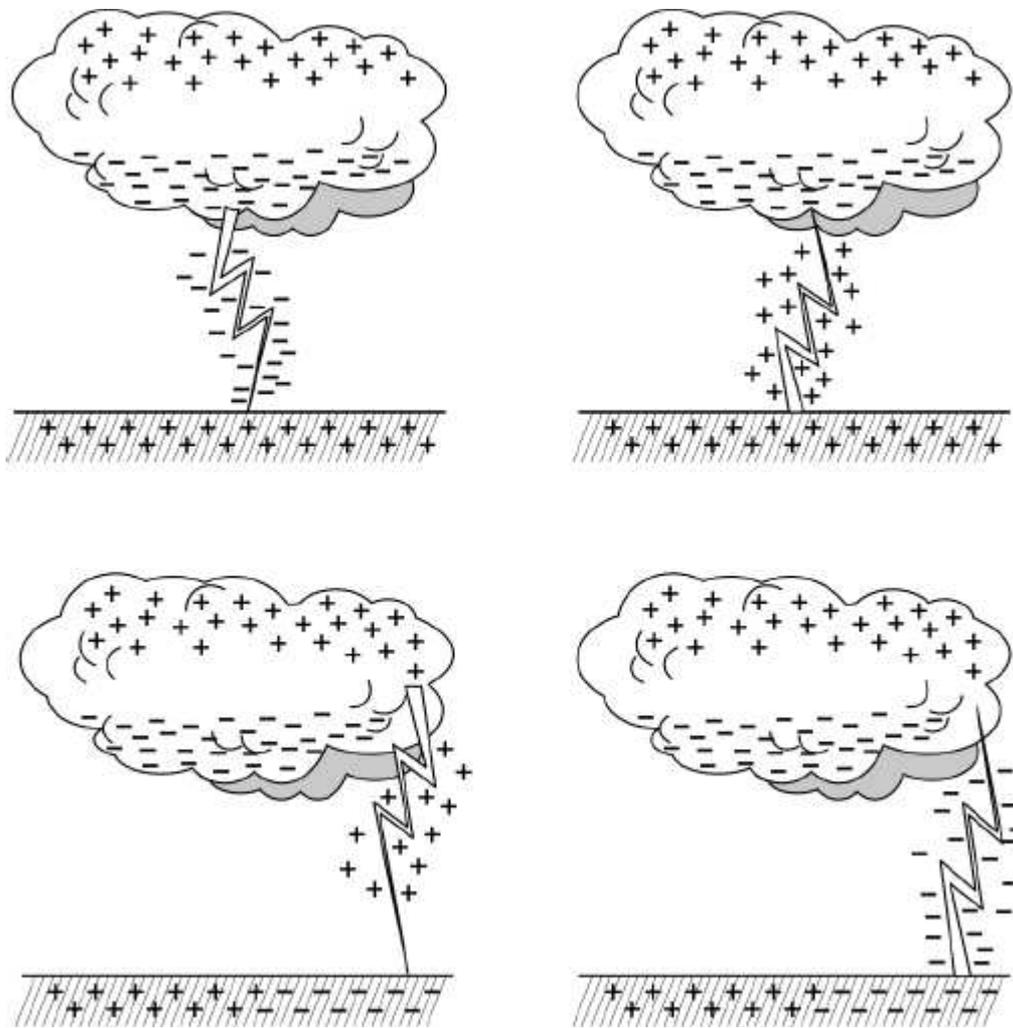
- raio nuvem-solo de polaridade negativa;
- raio solo-nuvem de polaridade positiva;
- raio nuvem-solo de polaridade positiva;
- raio solo-nuvem de polaridade negativa.

Dependendo do percurso do raio, as descargas atmosféricas podem ser classificadas de acordo com as seguintes categorias: intranuvens (mais de 50% dos raios), internuvens, para a terra, para o ar e para a ionosfera.

8.1.4 Parâmetros dos raios

As variáveis mais importantes associadas às descargas atmosféricas são:

- frequência de ocorrência;
- intensidade e polaridade da corrente;
- ângulo de incidência.



Quatro alternativas possíveis para descargas nuvem-solo.

Figura 8.3

O índice mais tradicional para a identificação dos níveis de incidência de raios em determinado local é índice cerâmico, que indica o número de dias do ano em que foi ouvida uma trovoadas.

A norma NBR 5419:2005 apresenta os mapas do Brasil e da região sudeste, com as curvas isocerâmicas, as quais identificam as regiões com mesmo índice cerâmico. Tal índice, porém, é bastante limitado, pois não permite a contagem da quantidade de raios nuvem-terra na região, parâmetro mais adequado para o dimensionamento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. A Figura 8.4 apresenta o mapa das curvas isocerâmicas do Brasil.

É possível estabelecer um índice mais preciso – a densidade de descargas atmosféricas para a terra (N_g) – que caracteriza o número de descargas anual para o solo em determinada região (em raios/ano/km²). A probabilidade de uma estrutura ser atingida por um raio em um ano é dada pelo produto da densidade de descargas atmosféricas para a terra pela área de exposição equivalente da estrutura.

O índice cerâmico (Td) pode ser correlacionado com a densidade de descargas (N_g) por meio de fórmulas empíricas, válidas para determinada região e determinadas com base em levantamentos estatísticos. Para o Brasil, a NBR 5419:2005 estabelece a seguinte relação:

$$N_g = 0,04Td^{1,25} \text{ [por km}^2\text{/ano]}$$

O valor da corrente de crista de certa descarga é uma variável que apresenta uma distribuição estatística, na qual se tem uma relação inversa entre a intensidade da corrente e a sua probabilidade de ocorrência.

Por fim, tem-se o ângulo de incidência da descarga, que também obedece a uma distribuição estatística, em que a incidência vertical apresenta a maior probabilidade de ocorrência, que diminui à medida que o ângulo de incidência aumenta.



Mapa de curvas isocerânicas – Brasil.

Figura 8.4

8.2 Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas podem ser diretas ou indiretas. Edificações em geral e linhas de transmissão de energia são estruturas que devem ser protegidas contra a incidência direta de raios. É também adequado que instalações de eletroeletrônicos sejam protegidas contra os efeitos indiretos dos raios, que se traduzem em surtos induzidos (por acoplamento indutivo ou capacitivo) ou injetados (por acoplamento resistivo, via aterramento), os quais podem danificar as linhas de energia e de sinal, bem como os equipamentos terminais.

O SPDA não protege equipamentos eletrônicos sensíveis contra tensões induzidas; esse é um assunto afeto à compatibilidade eletromagnética.

Descargas atmosféricas diretas são aquelas que incidem diretamente sobre edificações, linhas de transmissão de energia ou qualquer outra instalação exposta ao tempo. Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) diretas podem ser divididos, classicamente, em três partes, a saber:

- rede captora de descargas;
- descidas;

- aterramentos.

A rede de interligação dos aterramentos e das massas metálicas da instalação, em uma concepção mais atual, pode ser considerada a quarta parte dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas diretas têm por objetivo básico interceptar raios e conduzi-los à terra. Considerando a complexidade do fenômeno e as simplificações contidas nos modelos, não se pode obter uma proteção com 100% de garantia, o que significa dizer que, por melhor que seja dimensionado o sistema de proteção de uma estrutura, ela poderá, eventualmente, ser atingida por um raio, especialmente pelos de menor intensidade.

Os danos causados por um raio são proporcionais à energia contida nele, que, por sua vez, é função do quadrado da sua intensidade de corrente.

Portanto, tem-se que, para uma edificação provida de sistema de proteção contra raios adequadamente dimensionado, pode-se esperar as seguintes reduções na sua vulnerabilidade às descargas diretas:

- drástica redução da ocorrência de danos por quedas diretas (falhas de blindagem);
- danos de menor magnitude – quando ocorrerem –, em razão de as falhas de blindagem estarem associadas a raios de baixa intensidade de corrente.

O dimensionamento da rede captora de um sistema de proteção contra descargas diretas de uma edificação é um problema essencialmente geométrico, uma vez definido o nível de proteção mais adequado. A solução desse problema consiste em se identificar a melhor distribuição de elementos captoras pela instalação, usualmente constituídos por mastros para-raios com captoras Franklin, terminais aéreos e cabos nus. O bom projeto de uma rede captora de descargas diretas não deverá, porém, atender apenas à solução geométrica, uma vez que os aspectos de estética (impacto visual) e de custo (executabilidade do projeto) são também variáveis importantes a serem consideradas.

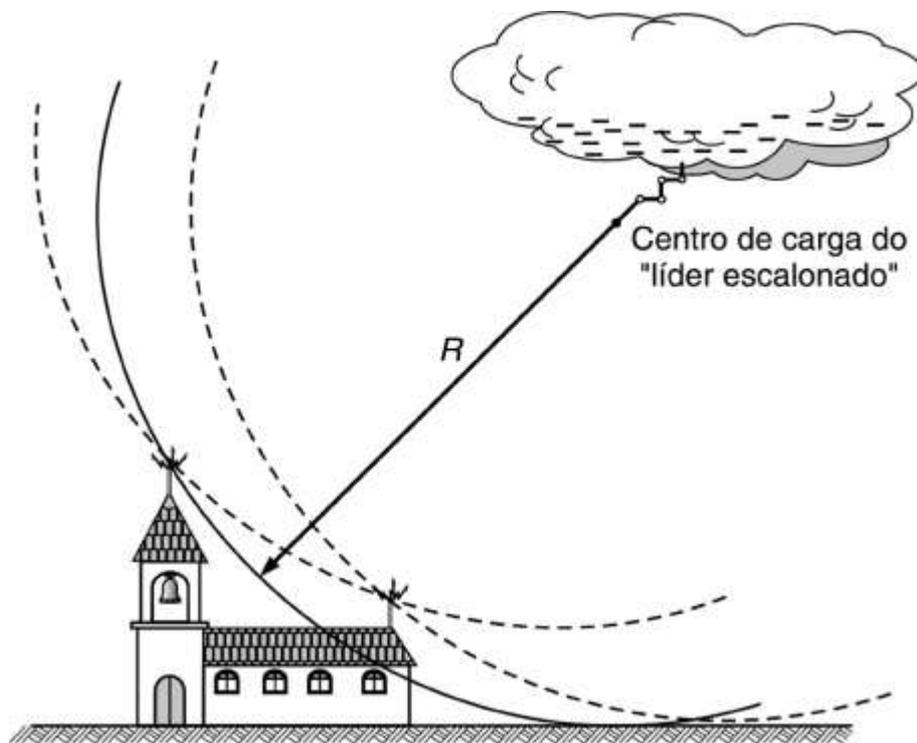
São três os modelos de proteção admitidos pela normalização brasileira, a saber: Modelo Eletrogeométrico, Método de Franklin e Método de Faraday.

8.2.1 Modelo eletrogeométrico

O modelo eletrogeométrico (MEG) resgatou, com um atraso de quase 100 anos, porém embasado em extensivo trabalho de pesquisa, o modelo sugerido por Preece em 1881, que previa que o volume de proteção de um elemento captor seria definido por um cone com vértice na extremidade do captor, delimitado pela rotação de um segmento de círculo tangente ao solo. O raio desse segmento de círculo é função do nível de proteção desejado para a instalação.

O MEG para aplicação na proteção das estruturas admite as seguintes hipóteses simplificadoras:

- só são consideradas as descargas negativas iniciadas nas nuvens;
- o líder descendente é único (não tem ramificações);
- a descarga final se dá para o objeto aterrado mais próximo, independentemente de sua massa ou condições de aterramento;
- as hastes verticais e os condutores horizontais têm o mesmo poder de atração;
- a probabilidade de ser atingida uma estrutura aterrada ou o plano de terra é a mesma se o líder estiver à mesma distância de ambos.



Princípio da proteção pelo modelo eletrogeométrico.

Figura 8.5

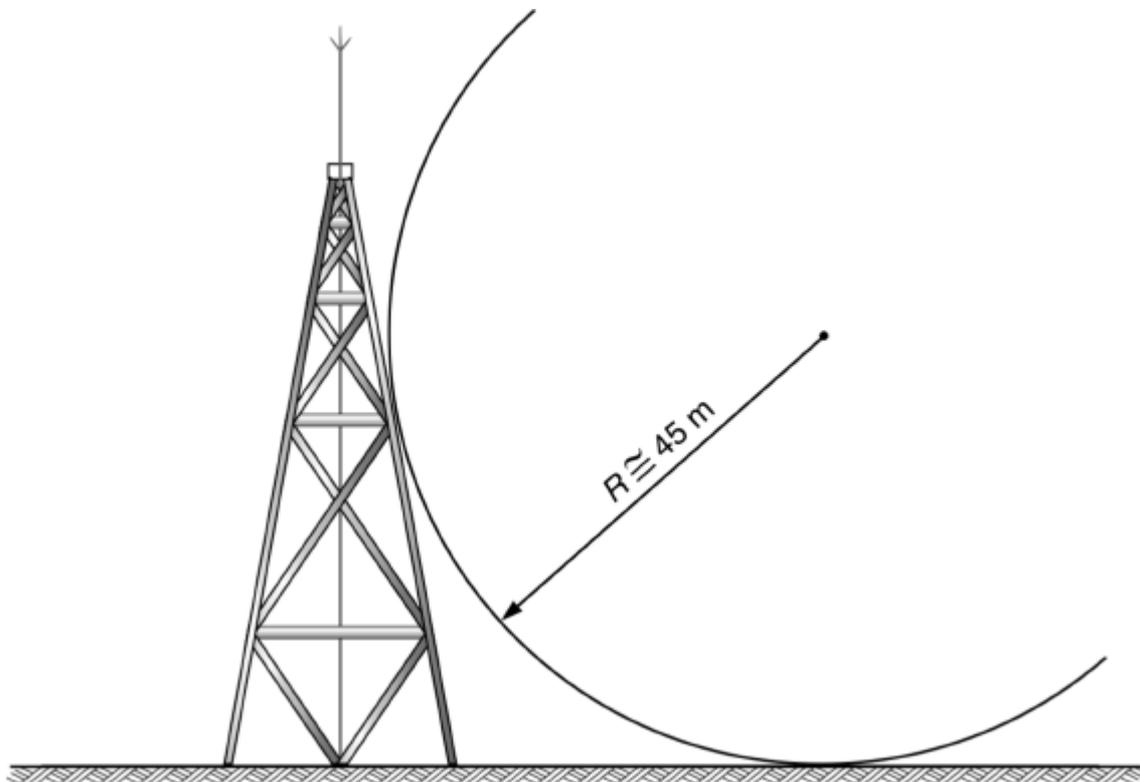
A Figura 8.5 ilustra a aplicação do modelo eletrogeométrico a uma igreja, onde se verifica que o para-raios existente no topo do campanário protege apenas uma parte da igreja (deixando desprotegida a quina acima da curva cheia), fazendo-se necessário mais um para-raios na ponta da nave da igreja para complementar a proteção. De acordo com esse modelo, os pontos do segmento de círculo determinam o lugar geométrico dos possíveis locais de onde pode partir o “líder ascendente”, que vai ao encontro ao “líder descendente” localizado no centro do círculo, de modo a completar o canal ionizado, por onde se fará a descarga de retorno.

No MEG, a distância de atração, ou raio de atração R_a , é calculada por $R_a = a \cdot I_{\text{máx}}^b$, em que $I_{\text{máx}}$ é o valor de pico da corrente de retorno do raio, e as constantes a e b variam conforme diferentes propostas de vários pesquisadores. Quando aplicado às estruturas, a norma NBR 5419:2005 adota $a = 10$ e $b = 0,65$:

$$R_a = 10 \cdot I_{\text{máx}}^{0,65}$$

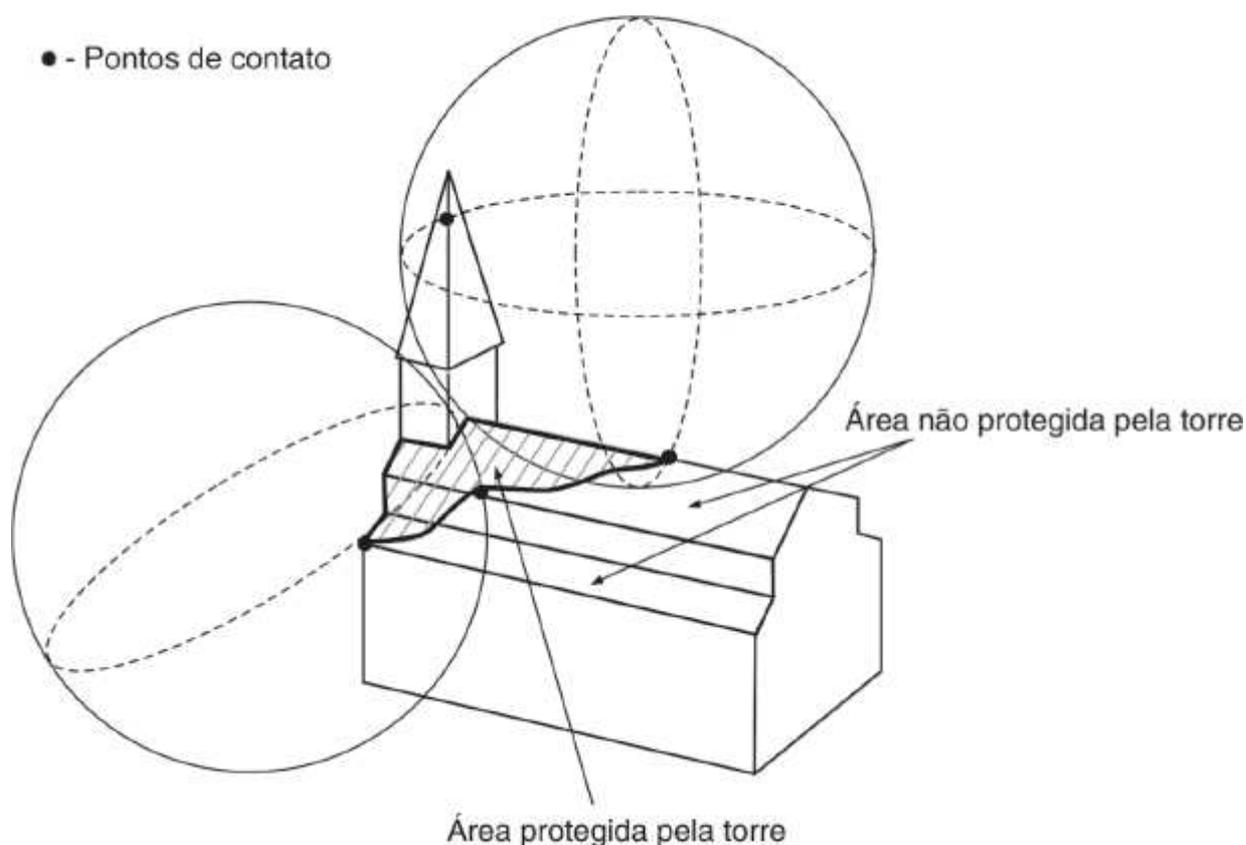
O modelo eletrogeométrico é compatível com a constatação prática de que estruturas muito altas são suscetíveis de serem atingidas por descargas laterais. Efetivamente, se a estrutura tiver uma altura superior à distância R , um elemento captor no seu topo não garantirá uma proteção adequada, pois o segmento de círculo tangente ao solo tocará lateralmente na estrutura, conforme mostra a Figura 8.6.

A análise até aqui apresentada foi conduzida considerando-se apenas duas dimensões. A extensão desse modelo para três dimensões resulta no conceito da “esfera rolante”, graficamente apresentado na Figura 8.7. A esfera vem a ser o lugar geométrico de todos os pontos de onde poderá partir um “líder ascendente” em direção ao “líder descendente” localizado no seu centro.



Aplicação do modelo eletrogeométrico a uma estrutura muito alta.

Figura 8.6



Exemplo de volume de proteção definido por uma “esfera rolante”.

Figura 8.7

Pode-se visualizar que, se essa esfera for rolada por toda a área de uma instalação protegida por determinada geometria de elementos captadores, ela não poderá nunca tocar em qualquer parte que não seja elemento captador. As partes da edificação eventualmente tocadas pela esfera poderão ser consideradas falhas de blindagem e serão pontos suscetíveis de serem atingidos por uma descarga atmosférica direta.

É importante observar que essa esfera, ao ser rolada por uma área com muitas edificações, tocará apenas nas partes mais altas das mesmas. Tem-se, portanto, que o correto dimensionamento de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma instalação complexa, ou localizada próximo a outras estruturas de dimensões semelhantes ou maiores, deve considerar o conjunto de estruturas e de edificações, e não cada uma em separado. Esse tipo de consideração permite a execução de projetos mais econômicos e de menor impacto visual, que se beneficiam do efeito de proximidade entre elementos captadores de estruturas próximas.

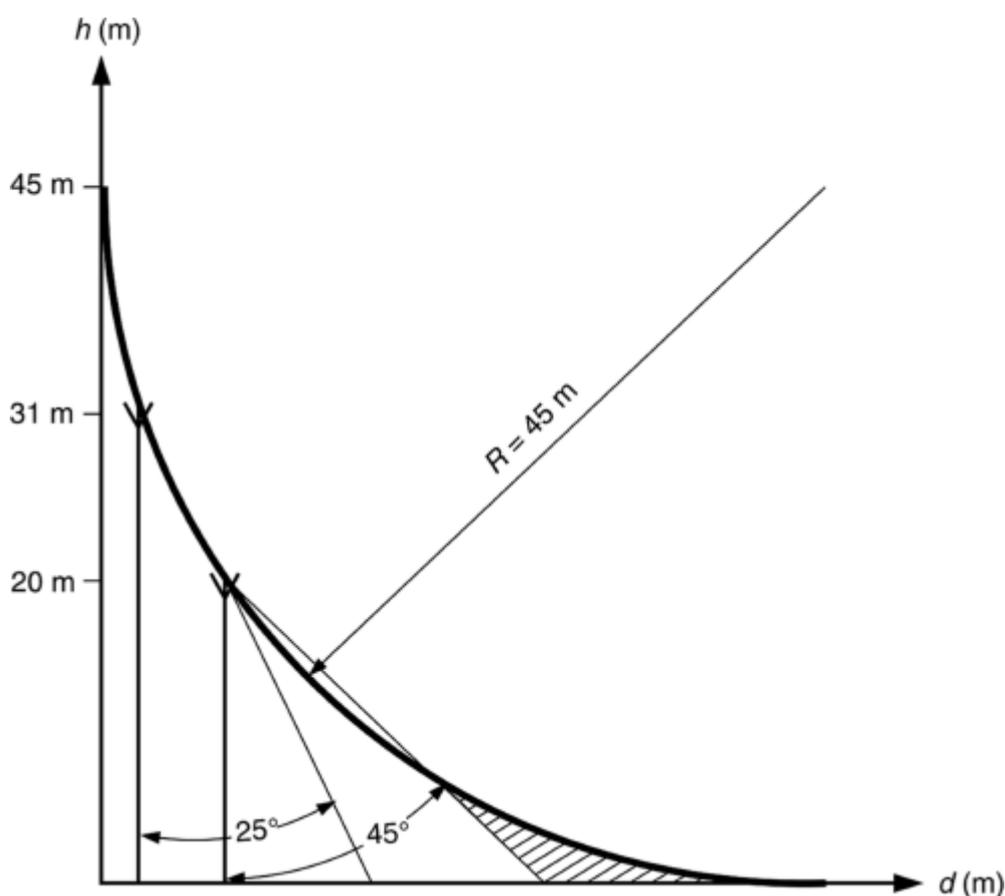
8.2.2 Método de Franklin

O Método de Franklin nada mais é do que um caso particular do MEG, em que o segmento de círculo é aproximado por um segmento de reta, tangente ao círculo na altura do captor. A Figura 8.8 apresenta duas situações em que o volume de proteção de um mastro é aproximado por um segmento de reta tangente ao círculo do MEG. Em termos geométricos, é de mais fácil aplicação do que o MEG, porém pode resultar em um sistema superdimensionado, uma vez que o volume de proteção proporcionado pelo segmento de círculo sempre será superior ao proporcionado pelo segmento de reta.

Esse método pode ser empregado para edificações de pequenas dimensões.

8.2.3 Método de Faraday

Nesse sistema de proteção, uma rede de condutores, lançada na cobertura e nas laterais da instalação a ser protegida, forma uma blindagem eletrostática, destinada a interceptar as descargas atmosféricas incidentes. Elementos metálicos estruturais, de fachada e cobertura podem integrar essa rede de condutores desde que atendam a requisitos específicos.



Variação do ângulo de proteção de um captor em função da altura.

Figura 8.8

Edificações com estrutura metálica na cobertura e continuidade elétrica nas ferragens estruturais e aterramento em fundação (ou anel) têm bom desempenho como Gaiolas de Faraday. Galpões em estrutura metálica (colunas e cobertura) constituem-se em Gaiolas de Faraday naturais, que devem ser complementados com um aterramento adequado, preferencialmente integrado às armaduras das fundações. Mesmo quando recoberta por telhas de fibrocimento, a estrutura exercerá a sua função de proteção, cabendo aos ganchos metálicos de fixação das telhas na estrutura a função de captação das descargas. Nesse caso, quando da incidência de uma descarga, o súbito deslocamento de ar poderá quebrar uma telha.

O Método de Faraday é também aplicável a edificações de grande área de cobertura (usualmente prédios industriais), onde a adoção de outras técnicas de dimensionamento da rede captora implica a utilização de grande número de mastros captadores, os quais demandam uma ampla rede de condutores de interligação que, por si só, já é uma aproximação de uma Gaiola de Faraday. Frequentemente esse tipo de prédio é construído com telhas de concreto protendido, com grande vão livre. Nesse caso, é importante evitar a incidência de descargas diretas nessas telhas, pois a corrente procurará a ferragem da estrutura, dando origem ao risco de rachadura do concreto e de danos na ferragem estrutural ou de exposição desta última ao tempo.

As estruturas altas podem estar sujeitas a descargas laterais, como se tem observado. Edifícios excedendo 20 a 30 metros de altura devem, portanto, ser providos de elementos captadores nas fachadas. Revestimentos, caixilhos de janelas, trilhos, condutores de descida e outros elementos metálicos presentes nas fachadas da estrutura podem ser usados com essa finalidade.

8.3 Descidas

Tais condutores, que podem ser considerados como parte da malha de aterramento, devem ser múltiplos, de modo a reduzir a impedância entre os elementos captadores e a malha de aterramento, para distribuir a corrente de descarga por diversos condutores e por segurança, no caso de alguma descida se romper ou apresentar problema em uma conexão.

Do ponto de vista da compatibilidade eletromagnética, esses múltiplos condutores contribuem para limitar os efeitos indutivos no interior da edificação, desde que não estejam muito próximos a aparelhos eletrônicos ou sistemas sensíveis.

Em edificações de pequeno porte, as descidas podem constituir a única conexão entre os elementos captadores e a malha de aterramento. É possível que esse arranjo seja pouco eficiente nas edificações de maior porte, com estruturas metálicas ou com maior número de pavimentos. Nesses casos, a melhor solução, do ponto de vista da compatibilidade eletromagnética, é ter os elementos de captação e descida não isolados das estruturas, e sim conectados a sistemas de aterramento em cada pavimento ou a cada conjunto de pavimentos.

Neste último caso, considerando-se que a corrente de raios é de natureza impulsiva, a maior parte da corrente do raio permanecerá nos condutores externos, devido à interação de campos eletromagnéticos (efeito pelicular). Somente uma pequena fração fluirá para o interior da edificação, evitando, portanto, o perigo de uma descarga lateral entre os condutores de descida e os elementos aterrados no interior da edificação. A última preocupação representa mais uma saída de segurança do que um recurso de compatibilidade eletromagnética, uma vez que são usualmente inúteis os cuidados para manter correntes de raios **completamente** fora da edificação.

Deve-se ter em mente ainda que, na maioria das edificações comerciais e industriais, existem muitos equipamentos aterrados no topo dos prédios (iluminação, ar condicionado, ventilação, aparelhos de telecomunicação etc.), os quais podem atuar como captadores não intencionais de raios. A interação eletromagnética entre os campos estabelecidos pelas correntes de raios fluindo em vários condutores de descida distribuídos ao redor da edificação assegura que a maior parte da corrente de descarga descerá pelos condutores externos (condutores de descida) e pelas armaduras de aço da edificação, cabendo aos condutores internos apenas uma pequena parcela da corrente de descarga.

Se o condutor de descida tiver de passar por um duto metálico, deverá ser interligado ao mesmo em ambas as extremidades. Se tiver de passar por uma superfície metálica, não deverá atravessar a mesma, e sim ser interligada a ela em ambos os lados.

O número de descidas deve ser função do tipo de rede captora utilizada, da geometria da instalação a ser protegida (área de cobertura e altura), bem como dos seus aspectos arquitetônicos.

Deve-se evitar o lançamento de descidas paralelas a dutos que abrigam cabos de sinal, de modo a se evitar induções nos mesmos. Descidas de para-raios paralelas a tubulações de gás deverão manter entre si uma distância mínima de 2 metros. A equalização entre as mesmas deverá ser feita por meio de um dispositivo provido de gap.

A colocação dos condutores de descida em *shafts*, em geral interiores ao edifício, além de não respeitar as normas, resulta em que 100% da energia radiada pela descida no *shaft* penetre em zonas ocupadas. Como o *shaft* está, habitualmente, próximo de ambientes de pequenas dimensões – como banheiros –, é maior a probabilidade de acidentes fatais por parada cardíaca em virtude de circularem pelo corpo humano correntes resultantes de indução pela corrente do raio.

A instalação de condutores de descida distribuídos ao redor das fachadas resulta em que apenas 25% a 50% da energia radiada penetre em zonas ocupadas, e, em função do afastamento entre condutores de descida, em nenhum local ocupado a densidade de energia radiada é mais elevada que na proximidade imediata de cada condutor.

A utilização das ferragens estruturais e das fundações da edificação como elementos de interligação e de aterramento é incentivada, desde que sejam atendidos os requisitos de continuidade elétrica. Com a utilização das armaduras da construção como condutores de descida, a distribuição da corrente do raio por um expressivo número de condutores diminui a níveis muito baixos a energia radiada na proximidade dos elementos de descida.

8.4 Critérios da Norma Brasileira – NBR 5419:2005

8.4.1 Aterramento

A norma NBR 5419 recomenda a integração dos aterramentos da instalação, o que deve ser feito com as devidas precauções, a fim de que se evitem interferências indesejadas entre subsistemas distintos. De acordo com essa norma, é recomendável que a resistência de aterramento seja inferior a 10 V, sendo previstas duas alternativas básicas de aterramento:

- anel de cabo de cobre nu de bitola mínima de 50 mm², diretamente enterrado no solo, no perímetro externo da edificação; ou
- ferragem da armadura da fundação, embutida no radier da construção.

O concreto completamente seco tem resistividade (elétrica) muito elevada, mas, quando está embutido no solo, permanece úmido, e a sua resistividade torna-se semelhante à do solo circundante. Por essa razão, as armaduras do concreto das fundações, quando bem interligadas, constituem um bom eletrodo de terra.

A adoção das armaduras do concreto como elementos integrantes dos sistemas de descida e aterramento de redes captoras de raios vem a ser quase uma unanimidade internacional, em virtude do extenso histórico de utilização e por tornar mais simples e econômico o sistema de proteção contra raios.

O uso das armaduras das construções como elementos de descida e aterramento para sistemas de proteção contra raios constituiu um grande avanço na técnica da proteção contra descargas atmosféricas, porque permitiu que se tratassem as estruturas em concreto armado com um caso particular das estruturas metálicas, simplificando o SPDA sem o comprometimento da estética das edificações.

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, os quais devem resultar em resistências medidas inferiores a 1,0 V. As medições terão de ser realizadas entre o topo e a base de alguns pilares e também entre as armaduras de pilares diferentes, para averiguar a continuidade por meio de vigas e lajes. As medições poderão ser realizadas de acordo com o Anexo E da NBR 5419, conforme a seguir:

- a continuidade elétrica das armaduras de um edifício deve ser determinada medindo-se com o instrumento adequado a resistência ôhmica entre as partes superior e inferior da estrutura, procedendo a diversas medições entre pontos diferentes;
- valores medidos da mesma ordem de grandeza e inferiores a 1,0 V são indicativos de que a continuidade das armaduras é aceitável;
- o instrumento adequado para medir a resistência deve injetar uma corrente de 1 A, ou superior, entre os pontos extremos da armadura sob ensaio, sendo capaz de, ao mesmo tempo que injeta essa corrente, medir a queda de tensão entre esses pontos (a resistência é calculada dividindo-se a tensão medida pela corrente injetada);
- considerando que o afastamento dos pontos onde se faz a injeção de corrente pode ser de várias dezenas de metros, o sistema de medida deve utilizar a configuração de quatro fios, sendo dois para corrente e dois para potencial (conforme ilustrado na Figura 8.9), evitando assim o erro provocado pela resistência própria dos cabos de teste e de seus respectivos contatos (podem ser utilizados miliohmímetros ou microhmímetros de quatro terminais em escalas cuja corrente seja igual ou superior a 1 A);
- não é admissível a utilização de um multímetro convencional na função de ohmímetro, pois a corrente que esse instrumento injeta no circuito é insuficiente para que se obtenham resultados representativos.

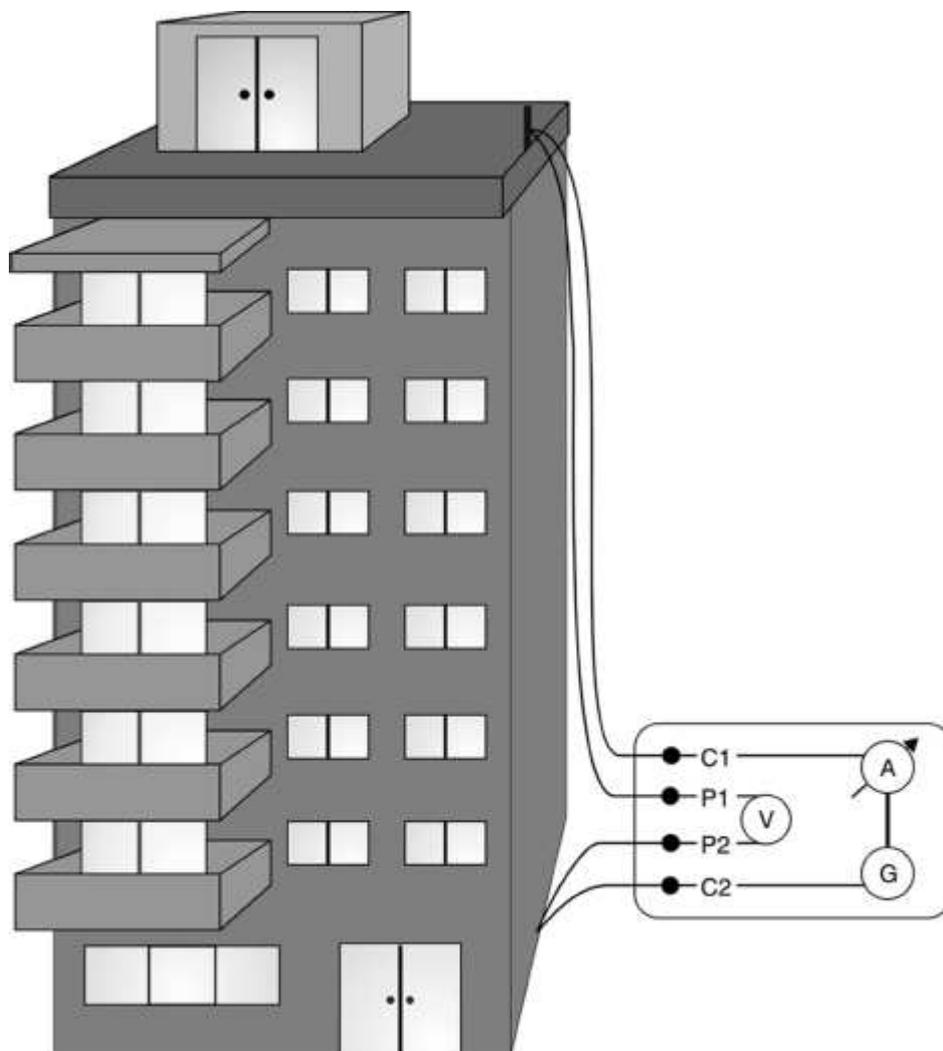
8.4.2 Testes de continuidade

Testes de continuidade deverão ser realizados por ocasião do comissionamento das instalações elétricas das edificações novas ou quando da implantação/reformulação de sistemas de aterramento e de proteção contra descargas atmosféricas de edificações já existentes.

Nos prédios novos, deverão ser verificadas as continuidades entre os diversos pontos de aterramento na estrutura metálica da edificação, previstos no projeto e implantados durante a construção. Os testes deverão ser realizados entre aterramentos localizados no mesmo pavimento e também em pavimentos contíguos.

Nos prédios existentes, deverá ser testada a continuidade entre os pontos de aterramento na ferragem da edificação, conforme as exigências da obra em execução, tais como:

- entre topo de base das colunas, e entre topos e entre bases de colunas contíguas, no caso de implantação de sistema de proteção contra descargas atmosféricas diretas;
- entre barras de terra das entradas de energia e de telefonia;



Teste de continuidade das ferragens. (Cortesia da Termotécnica.)

Figura 8.9

- entre entrada de energia e pontos de terra nos *shafts* de energia e em salas técnicas;
- entre entrada de telefonia e pontos de terra nos *shafts* de comunicações.

Sempre que possível, deve-se prever a avaliação do aterramento proporcionado pelas armaduras estruturais do edifício, por meio de injeção de corrente entre estas e um aterramento externo ao edifício (com as ligações externas ao edifício abertas).

Uma indicação de boa continuidade elétrica entre as ferragens de uma instalação vem a ser uma resistência entre dois pontos inferior a 1 (idealmente $< 0,1$). Essa continuidade deve ser testada por meio de equipamentos que injetem entre os dois pontos de medição uma corrente mínima de 1 A, sendo desejável a utilização de correntes superiores a 10 A. Testes de continuidade podem ser feitos com equipamentos de medição (mili ou microhmímetro) ou com máquina de solda.

Nos prédios existentes, o recobrimento das aberturas feitas no concreto para o acesso às ferragens da edificação deverá ser feito com argamassa aditivada, com um produto que proporcione uma melhor aderência do cimento sobre o concreto antigo. Cabe lembrar que a exposição de ferros de quinas de pilares para executar testes de continuidade elétrica poderá acelerar o processo de corrosão das ferragens dos pilares, comum em edificações com 10 a 12 anos de vida.

8.4.3 Classificação das instalações

Os critérios de proteção a serem adotados a cada instalação deverão ser selecionados de acordo com o nível de proteção aplicável à estrutura. A Tabela 8.1 apresenta exemplos de classificação de nível de proteção para diferentes tipos de instalações.

O Anexo B (normativo) da NBR 5419:2005 – Método de Seleção do Nível de Proteção – apresenta uma metodologia para se avaliar a necessidade de instalação de um SPDA em uma estrutura ou edificação.

8.4.4 Rede captora de raios

A Tabela 8.2 apresenta os quatro pares de valores de R e de I_r , considerados pela norma NBR 5419, cada um associado a um nível de proteção. O valor de crista da corrente do raio é associado à sua capacidade de destruição, admitindo-se que correntes de descarga superiores a 10 kA são capazes de transferir energia para a umidade contida no concreto, em quantidade suficiente para vaporizá-la. O súbito aumento do volume do vapor d'água nos poros do concreto (até 1800 vezes o seu volume original) provoca a sua rachadura. Tem-se ainda que de 20% a 30% dos raios possuem a corrente de descarga de retorno com intensidade superior a 10 kA.

O que acontece com um prédio de concreto armado não protegido quando ele é atingido por um raio? O raio descasca o concreto até encontrar um ferro estrutural; a partir daí, ele desce até as ferragens das fundações e, dessa, flui para o solo, sem nenhum comprometimento da estrutura (não há registro na literatura técnica de desabamento de um prédio em concreto armado provocado por queda de raio). O que ocorre é a queda de pedaços de reboco, revestimento ou mesmo concreto no ponto de injeção da corrente do raio, especialmente quando a incidência ocorre na borda da cobertura do prédio.

O nível de proteção III, associado à corrente de descarga de 10 kA, pode ser considerado, então, um critério de aplicação geral para o dimensionamento do sistema de proteção de instalações. Para instalações que possam ser associadas a um risco mais elevado no caso de incidência de raios, a norma prevê os níveis de proteção I e II, existindo também um nível IV para as instalações com uma expectativa de risco menor. A Tabela 8.3 correlaciona os critérios de proteção dos três métodos reconhecidos pela norma NBR 5419. A Figura 8.10 apresenta os raios de proteção associados aos níveis de proteção II e III.

Tabela 8.1 (Tabela B.6 da NBR 5419:2005) Exemplos de classificação de estruturas quanto ao nível de proteção

Classificação da estrutura	Tipo da estrutura	Efeitos das descargas atmosféricas	Nível de proteção
Estruturas comuns ⁽¹⁾	Residências	Perfuração da isolamento de instalações elétricas, incêndio e danos materiais Danos normalmente limitados a objetos no ponto de impacto ou no caminho do raio	III
	Fazendas, estabelecimentos agropecuários	Risco direto de incêndio e tensões de passo perigosas Risco indireto devido à interrupção de energia e risco de morte para animais devido à perda de controles eletrônicos, ventilação, suprimento de alimentação e outros	III ou IV ⁽²⁾
	Teatros, escolas, lojas de departamentos, áreas esportivas e igrejas	Danos às instalações elétricas (p. ex., iluminação) e possibilidade de pânico Falha do sistema de alarme contra incêndio, causando atraso no socorro	II
	Bancos, companhias de seguro, companhias comerciais e outros	Como acima, além de efeitos indiretos com a perda de comunicações, falhas dos computadores e perda de dados	II
	Hospitais, casas de repouso e prisões	Como para escolas, além de efeitos indiretos para pessoas em tratamento intensivo, dificuldade de resgate de pessoas imobilizadas	II
	Indústrias	Efeitos indiretos conforme o conteúdo das estruturas, variando de	III

		danos pequenos a prejuízos inaceitáveis e à perda de produção	
	Museus, locais arqueológicos	Perda de patrimônio cultural insubstituível	II
Estruturas com risco confinado	Estações de telecomunicação, usinas elétricas	Interrupção inaceitável de serviços públicos por breve ou longo período de tempo	I
	Indústrias	Risco indireto para as imediações devido a incêndios, e outros com risco de incêndio	
Estruturas com risco para os arredores	Refinarias, postos de combustível, fábricas de fogos, fábricas de munição	Risco de incêndio e explosão para a instalação e seus arredores	I
Estruturas com risco para o meio ambiente	Indústrias químicas, usinas nucleares, laboratórios bioquímicos	Risco de incêndio e falhas de operação, com consequências perigosas para o local e para o meio ambiente	I

⁽¹⁾ETIs (Equipamentos de Tecnologia da Informação) podem ser instalados em todos os tipos de estruturas, inclusive nas comuns. É impraticável a proteção total contra danos causados pelos raios dentro dessas estruturas; não obstante, devem ser tomadas medidas (conforme NBR 5410) de modo a limitar os prejuízos a níveis aceitáveis.

⁽²⁾Estruturas de madeira: nível III; estruturas nível IV: Estruturas contendo produtos agrícolas potencialmente combustíveis (pós de grãos) sujeitos à explosão são considerados com risco para os arredores.

O Método de Franklin leva em consideração a variação do ângulo de proteção com a altura do captor, bem como o nível de proteção desejado em função do tipo de instalação a ser protegida.

Tabela 8.2 (Tabela C.2 da NBR 5419:2005) Raio de atração (R) em função da corrente $I_{m\acute{a}x}$

Nível de proteção	Distância R (m)	Valor de crista de $I_{m\acute{a}x}$ (kA)
I	20	3
II	30	5
III	45	10
IV	60	15

Tabela 8.3 (Tabela 1 da NBR 5419:2005) Posicionamento de captores conforme o nível de proteção

Nível de proteção	Raio da esfera R (m)	Ângulo de proteção (método de Franklin) em função da altura do captor ^b e do nível de proteção (α)					Largura do módulo da malha ^a (m)
		0-20 m	21-30 m	31-45 m	46-60 m	> 60 m (m)	
I	20	25°	(A)	(A)	(A)	(B)	5
II	30	35°	25°	(A)	(A)	(B)	10
III	45	45°	35°	25°	(A)	(B)	10
IV	60	55°	45°	35°	25°	(B)	20

R = raio da esfera rolante

(A) Aplicam-se somente os métodos eletrogeométrico, malha ou da gaiola de Faraday.

(B) Aplica-se somente o método da gaiola de Faraday.

Notas: ^(a) O módulo da malha deverá constituir um anel fechado, com o comprimento não superior ao dobro da sua largura.

^(b) Para a escolha do nível de proteção, a altura é em relação ao solo, e, para a verificação da área protegida, é em relação ao plano horizontal a ser protegido.

8.4.5 Proximidade do SPDA com outras instalações

Devem ser previstos espaçamentos adequados entre os elementos aterrados externa e internamente, de modo a se evitar a ocorrência de centelhamentos entre os mesmos. A distância mínima de segurança entre elementos dos sistemas de proteção interno e externo é determinada pela expressão:

$$d \geq K_l \frac{K_c}{K_m} l$$

em que:

l = extensão de paralelismo;

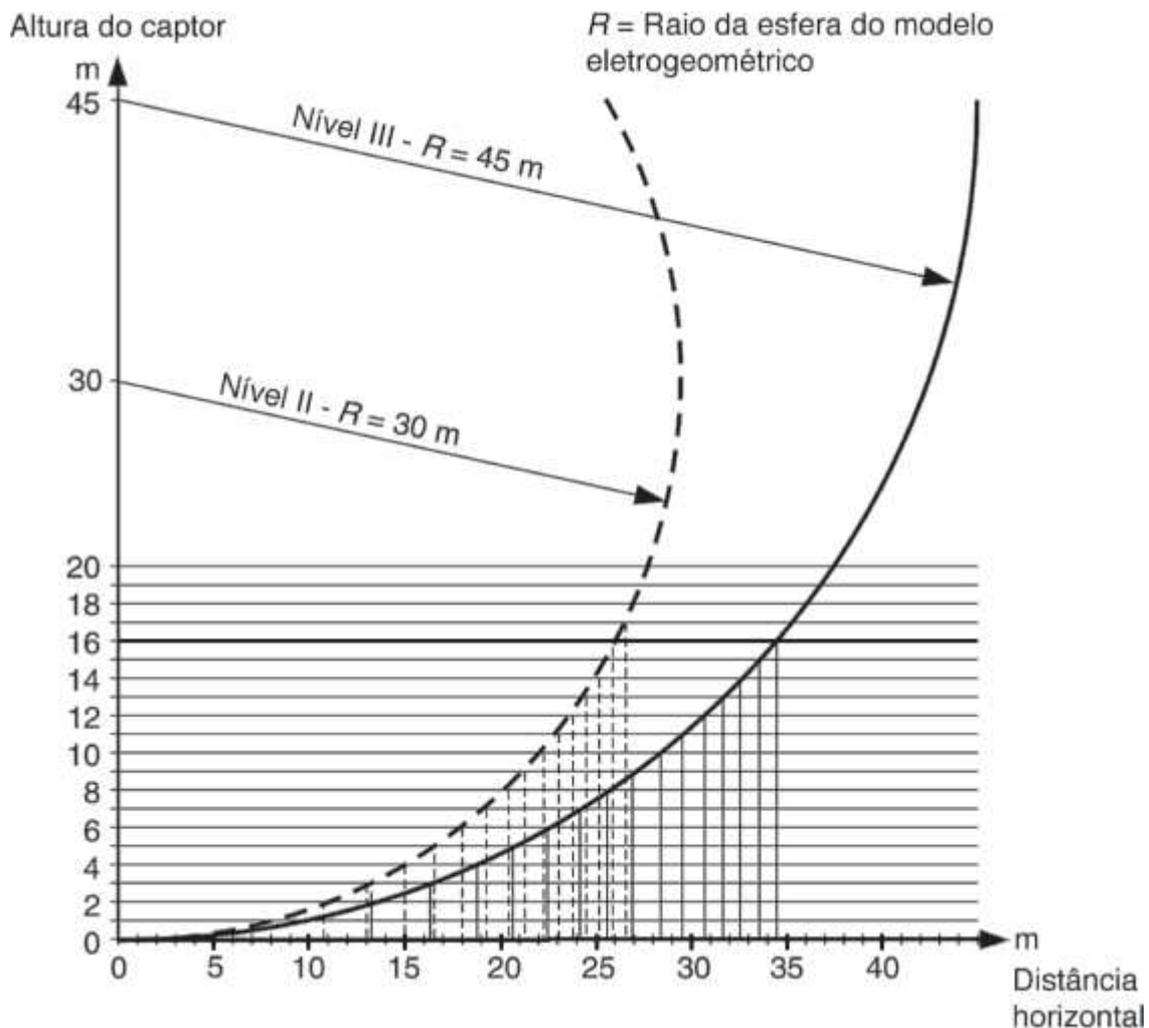
K_l = função do nível de proteção (Tabela 8.4);

K_m = função do material existente entre os dois sistemas (Tabela 8.4);

K_c = função do aspecto geométrico.

Esse cálculo é dispensável quando se utilizam as armaduras como condutores de descida, porque a distribuição da corrente do raio por inúmeros condutores torna impossível o centelhamento para condutores no entorno.

A Tabela 8.4 apresenta os valores a serem utilizados para as constantes K_l , K_m e K_c , e a Figura 8.11 ilustra os três aspectos geométricos previstos.



Volumes de proteção proporcionados por mastros para-raios para os níveis de proteção II e III – captor a 16 m de altura.

Figura 8.10

Tabela 8.4 Fatores para o cálculo da distância mínima de segurança entre elementos dos sistemas de proteção interno e externo

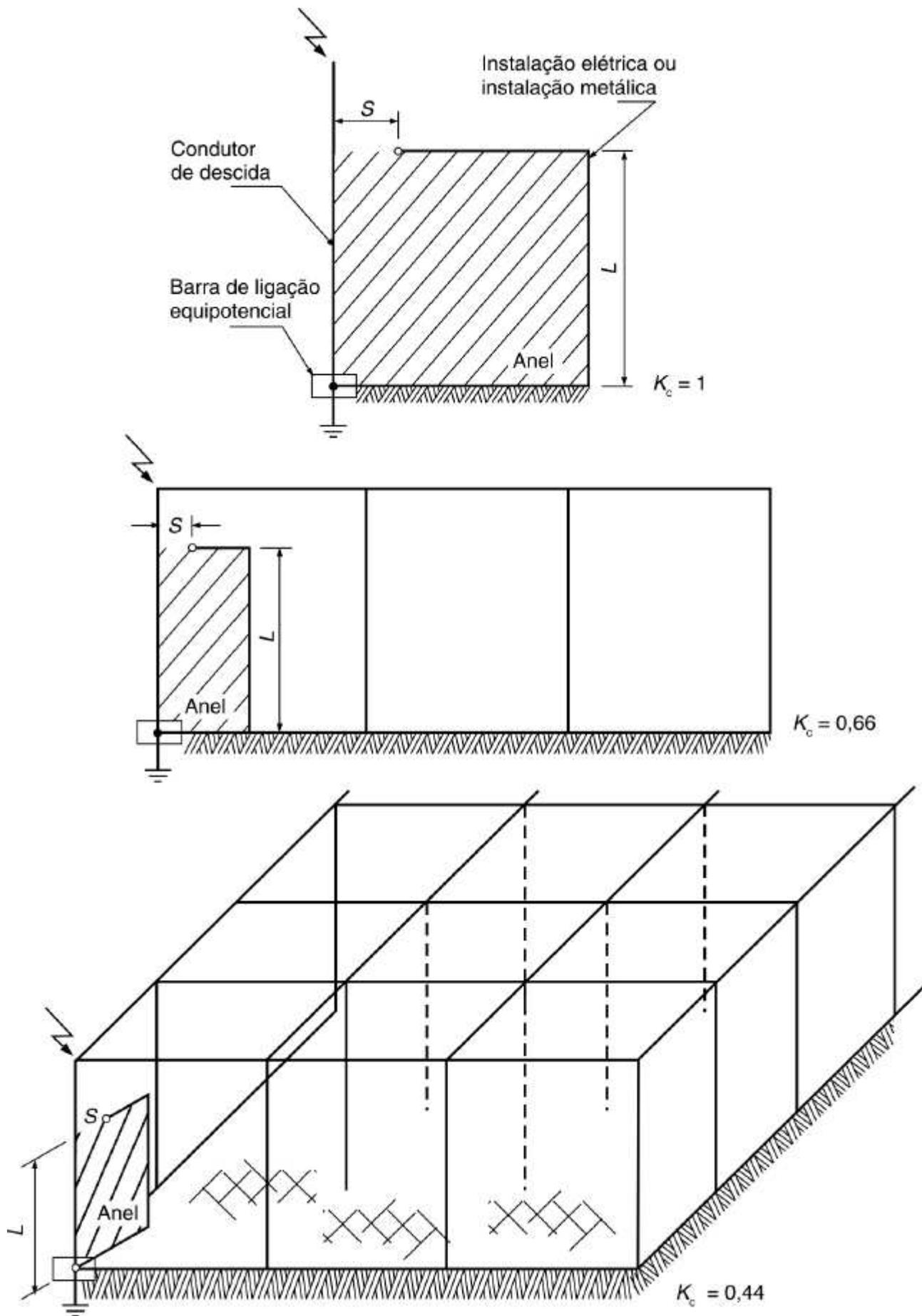
Nível de proteção	K_I	Material de separação	K_m	Aspecto geométrico	K_c
I	0,1	Ar	1	Unidimensional	1
II	0,075	Sólido	0,5	Bidimensional	0,66
III e IV	0,05			Tridimensional	0,44

8.4.6 Equipotencialização e materiais

A Tabela 8.5 apresenta as bitolas mínimas de condutores que podem fazer parte de um SPDA.

Tabela 8.5 (Tabela 3 da NBR 5419:2005) Seções mínimas dos materiais do SPDA

Material	Captor e anéis intermediários (mm ²)	Descidas (para estruturas de altura até 20 m) (mm ²)	Descidas (para estruturas de altura superior a 20 m) (mm ²)	Eletrodo de aterramento (mm ²)
Cobre	35	16	35	50
Alumínio	70	25	70	—
Aço galvanizado a quente ou embutido em concreto	50	50	50	80



Três aspectos geométricos de formação de *loops* entre elementos aterrados e um condutor de descida de um SPDA.

Figura 8.11

Quaisquer elementos condutores expostos – isto é, que possam ser atingidos por descargas diretas – devem ser considerados como parte do SPDA. Estruturas com cobertura metálica de espessura mínima igual a 0,5 mm podem ser consideradas autoprotégidas contra descargas diretas, desde que convenientemente aterradas e que não seja importante a

prevenção contra eventuais perfurações e/ou pontos quentes na face interna da chapa. Caso essa última restrição não possa ser aceita, são aplicáveis as espessuras mínimas constantes da Tabela 8.6, em função do material utilizado na cobertura.

Elementos condutores expostos que não suportem o impacto direto do raio devem ser colocados dentro da zona de proteção de captos específicos, integrados ao SPDA. Em áreas contendo produtos inflamáveis, o uso de captos naturais requer uma análise de risco.

Os elementos condutores expostos – tais como os relacionados a seguir – devem ser analisados para certificar-se de que as suas características são compatíveis com os critérios estabelecidos na norma:

- coberturas metálicas sobre o volume a se proteger;
- mastros ou outros elementos condutores salientes nas coberturas;
- rufos e/ou calhas periféricas de recolhimento de águas pluviais;
- estruturas metálicas de suporte de envidraçados, para fachadas, acima de 60 m do solo ou de uma superfície horizontal circundante;
- guarda-corpos, ou outros elementos condutores expostos, para fachadas, acima de 60 m da superfície horizontal circundante;
- tubos e tanques metálicos construídos em material de espessura igual ou superior à indicada na Tabela 8.6.

Tabela 8.6 (Tabela 4 da NBR 5419:2005) Espessuras mínimas dos materiais do SPDA

Material	Captos (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

Notas:

1) Independentemente das espessuras, deverão ser mantidas as seções transversais mostradas na Tabela 3 da NBR 5419:2005.

2) Os condutores e acessórios de aço (exceto inox) devem ser protegidos com uma camada de zinco aplicado a quente (fogo) ou com uma camada de cobre com espessura mínima de 254 mm.

3) O aço de construção só pode ser utilizado embutido em concreto.

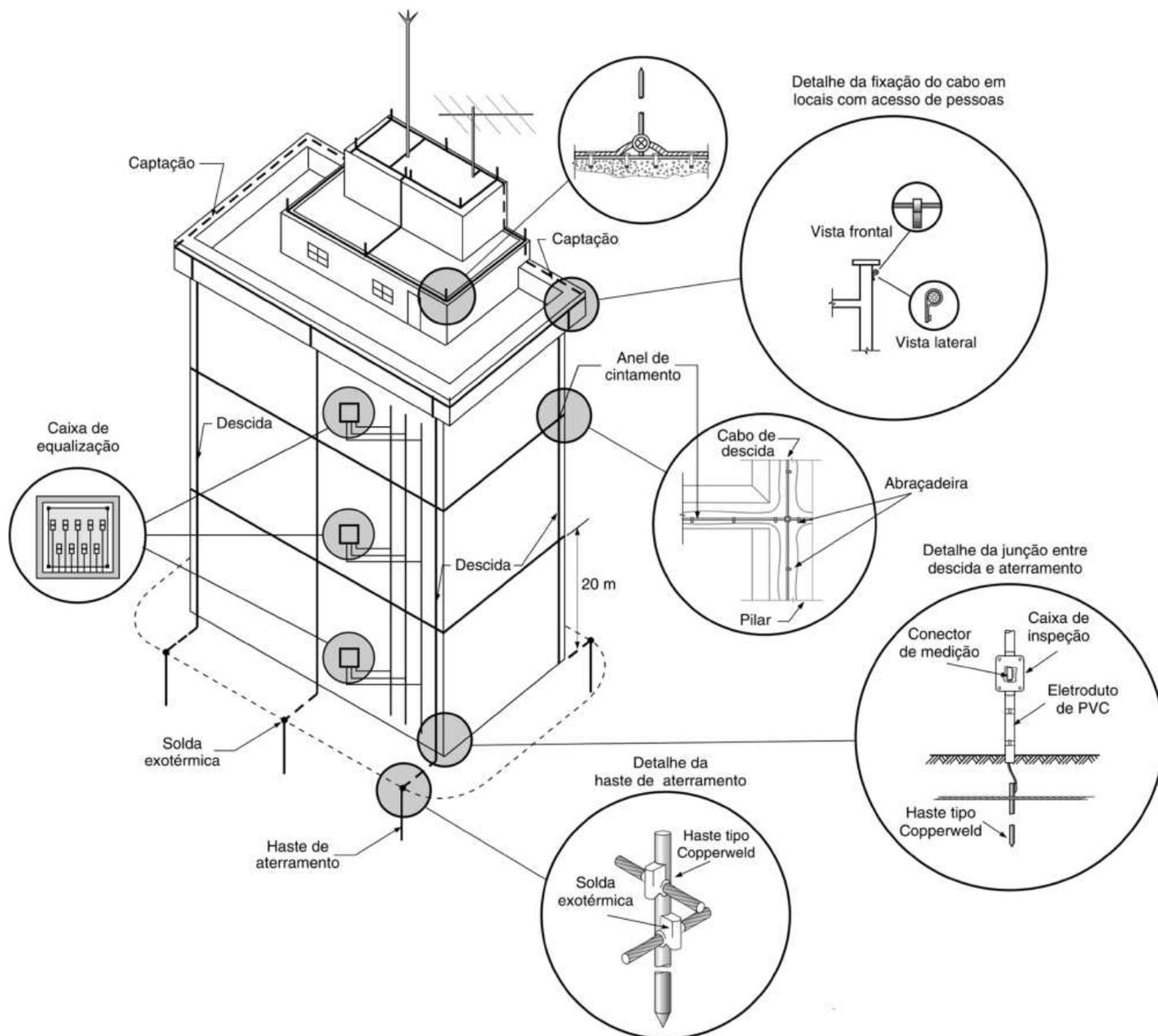
É importante observar que, em qualquer um dos três métodos de proteção, é fundamental a equipotencialização de todas as massas metálicas existentes na instalação. Os elementos metálicos existentes externamente à estrutura – especialmente aqueles localizados na cobertura, mais sujeitos, portanto, à incidência de descargas diretas – deverão ser interligados à rede captora de descargas. Os elementos metálicos existentes no interior da edificação terão de ser aterrados, devendo-se utilizar como elemento de interface com os eletrodos enterrados a barra de ligação equipotencial principal da estrutura (BEP – Barra de Equipotencialização Principal, de acordo com a NBR 5410), que usualmente coincide com a barra de terra da entrada de energia. Os eletrodos enterrados deverão ser comuns a ambos os sistemas (externo e interno).

Todos os condutores dos sistemas elétricos de potência e de sinal devem ser direta ou indiretamente conectados à ligação equipotencial. Condutores vivos devem ser conectados somente por meio de DPS (Dispositivos de Proteção contra Surtos). Em esquemas de aterramento TN (definido na NBR 5410), os condutores de proteção PE ou PEN devem ser conectados diretamente à ligação equipotencial principal. O condutor de proteção pode – e, em geral, deve – ser ligado a outras eventuais ligações equipotenciais, porém o condutor neutro só deve ser ligado à ligação equipotencial principal. Em edifícios comerciais com mais de 20 m de altura, os condutores de proteção devem obedecer às ligações equipotenciais

adicionais, podendo-se prever a ligação dos condutores de proteção às armaduras em todos os andares, por meio de insertos ligados à ferragem na coluna correspondente ao *shaft*. Nesse caso, é recomendável que essa coluna seja interna (não periférica) à edificação, uma vez que as ferragens dessas colunas estão menos expostas à circulação de parcelas de correntes de raios.

8.4.7 Aplicação da norma a uma edificação

A Figura 8.12 apresenta a aplicação dos critérios da norma para a proteção de uma edificação, onde se podem observar:



Sistema de proteção aplicado a um prédio. (Cortesia da Termotécnica.)

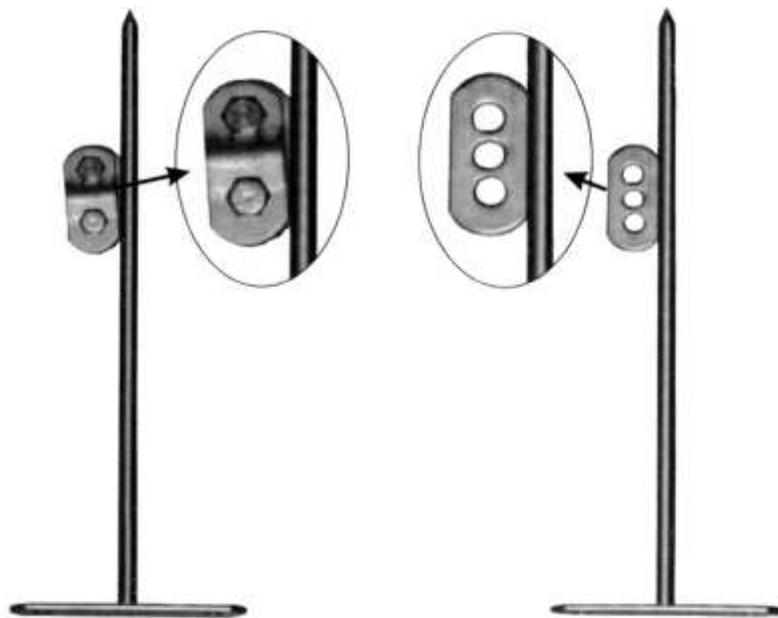
Figura 8.12

- a rede captora de descargas;
- as descidas;
- o aterramento;
- as equipotencializações, em cada pavimento, com a rede elétrica e com as ferragens estruturais.

8.5 Materiais Utilizados em Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas – SPDA



(a) Captor tipo Franklin



(b) Terminais aéreos



(c) Mastro H



(d) Conjunto de contravoltagem



(e) Sinalizadores



(f) Conectores de uso geral



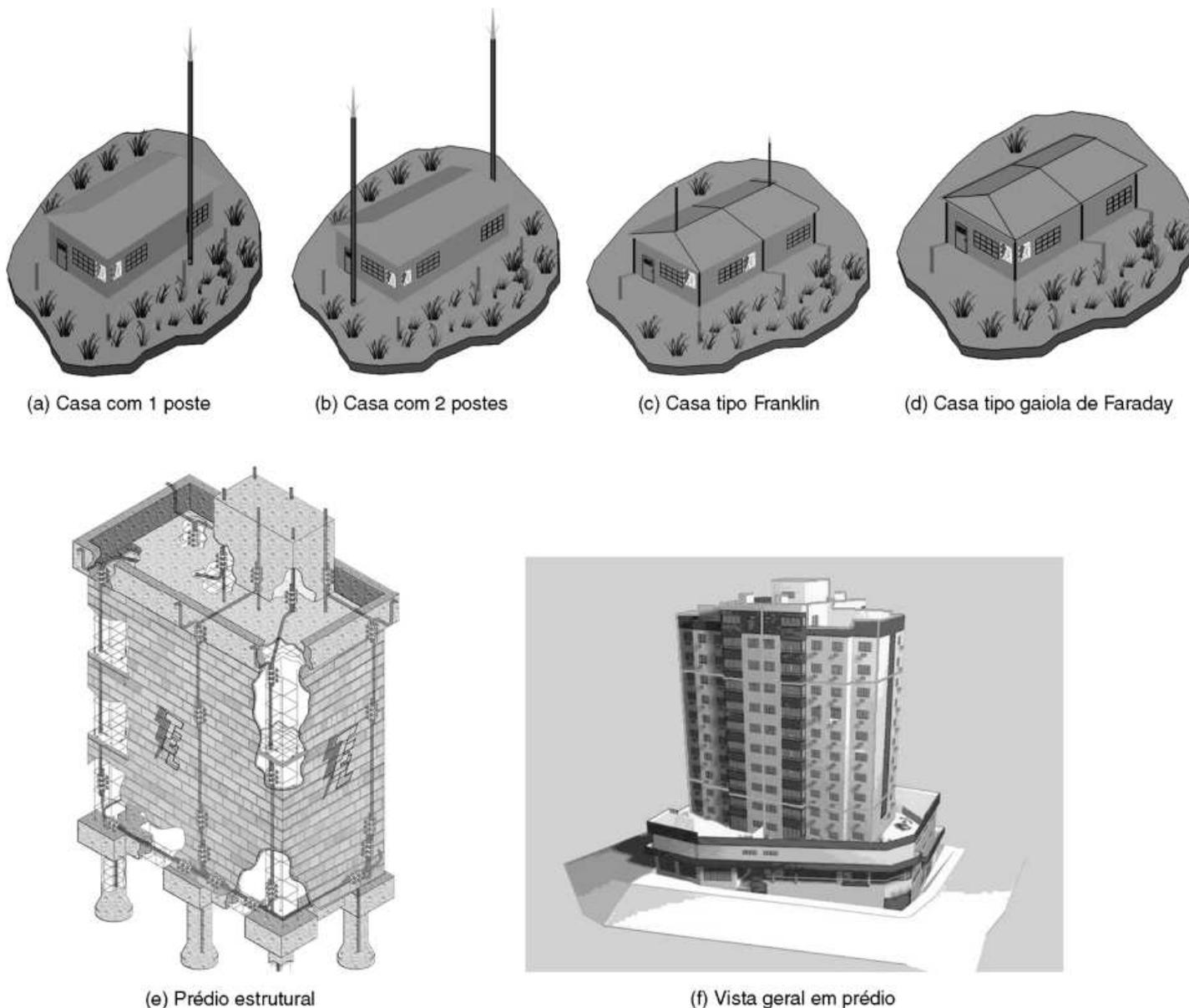
(g) Barra de alumínio

Materials para instalações de para-raios. (Cortesia da Paratec-Linha de produtos.)

Figura 8.13

8.6 Exemplos de Instalações de Para-raios

A Figura 8.14 ilustra diversos exemplos de instalações de para-raios em residências e prédios.



Instalação de para-raios. (Cortesia da Termotécnica.)

Figura 8.14

Resumo

- Generalidades sobre raios; formação de cargas e formação de raios.
- Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).
- Critérios da NBR 5419:2005.
- Proximidade do SPDA com outras instalações.
- Aplicação da norma a uma edificação.
- Materiais utilizados em SPDA.
- Exemplos de instalações de para-raios.