



# 13

## Proteção contra descargas atmosféricas

### 13.1 Introdução

As descargas atmosféricas causam sérias perturbações nas redes aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além de provocarem danos materiais nas construções atingidas por elas, sem contar os riscos de morte a que as pessoas e os animais ficam submetidos.

As descargas atmosféricas induzem surtos de tensão que chegam a centenas de kV nas redes aéreas de transmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica, obrigando a utilização de cabos-guarda ao longo das linhas de tensão mais elevada e para-raios a resistor não linear para a proteção de equipamentos elétricos instalados nesses sistemas.

Quando as descargas elétricas entram em contato direto com quaisquer tipos de construção, tais como edificações, tanques metálicos de armazenamento de líquidos não convenientemente aterrados, nas partes estruturais ou não de subestações etc., são registrados grandes danos materiais que poderiam ser evitados caso essas construções estivessem protegidas adequadamente por Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA).

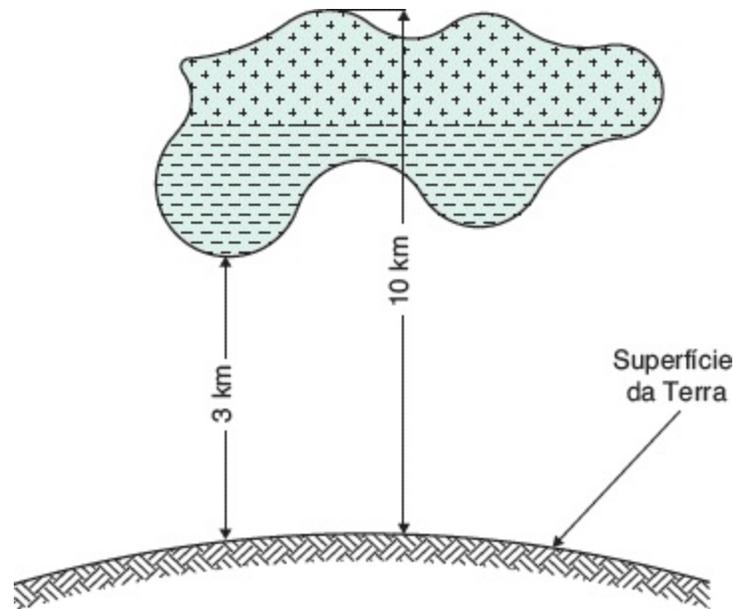
O presente capítulo estudará somente a proteção contra descargas atmosféricas que incidam sobre as construções anteriormente mencionadas,

fugindo ao escopo deste livro a abordagem da proteção contra as sobretensões resultantes nas redes urbanas e rurais, o que pode ser visto no livro do autor *Manual de Equipamentos Elétricos* (LTC, 2013).

## 13.2 Considerações sobre a origem dos raios

ao longo dos anos, várias teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno dos raios. Atualmente, tem-se como certa que a fricção entre as partículas de água que formam as nuvens, provocada pelos ventos ascendentes de forte intensidade, dá origem a uma grande quantidade de cargas elétricas. Verifica-se, experimentalmente, na maioria dos fenômenos atmosféricos, que as cargas elétricas positivas ocupam a parte superior da nuvem, enquanto as cargas elétricas negativas se posicionam na sua parte inferior, acarretando, conseqüentemente, uma intensa migração de cargas positivas na superfície da Terra para a área correspondente à localização da nuvem, conforme se pode observar na [Figura 13.1](#). Dessa forma, as nuvens adquirem uma característica bipolar.

Como se pode deduzir pela [Figura 13.1](#), a concentração de cargas elétricas positivas e negativas em determinada região faz surgir uma diferença de potencial entre a Terra e a nuvem. No entanto, o ar apresenta determinada rigidez dielétrica, normalmente elevada, que depende de certas condições ambientais. O aumento dessa diferença de potencial, que se denomina gradiente de tensão, poderá atingir um valor que supere a rigidez dielétrica do ar interposto entre a nuvem e a Terra, fazendo com que as cargas elétricas migrem na direção da Terra, em um trajeto tortuoso e normalmente cheio de ramificações, cujo fenômeno é conhecido como descargas atmosféricas descendentes, caracterizadas por um líder descendente da nuvem para a Terra. É de aproximadamente 1 kV/mm o valor do gradiente de tensão para o qual a rigidez dielétrica do ar é rompida.



**Figura 13.1** Distribuição das cargas elétricas das nuvens e do solo.

A ionização do caminho seguida pela descarga descendente que mais se aproxima do solo, também conhecida como descarga piloto, propicia condições favoráveis de condutibilidade do ar ambiente. Mantendo-se elevado o gradiente de tensão na região entre a nuvem e a Terra, surge, em função da aproximação do solo, em uma das ramificações da descarga piloto, uma descarga ascendente, constituída de cargas elétricas positivas, denominada descarga ascendente, de retorno da Terra para a nuvem, originando-se em seguida a descarga principal no sentido da nuvem para a Terra, de grande intensidade, responsável pelo fenômeno conhecido como trovão, que é o deslocamento da massa de ar circundante ao caminhar do raio, em função da elevação de temperatura e, conseqüentemente, do aumento repentino de seu volume.

Se as nuvens acumulam uma grande quantidade de cargas elétricas que não foram neutralizadas pela descarga principal, iniciam-se as chamadas descargas reflexas ou múltiplas, cujas características são semelhantes à descarga principal. A [Figura 13.2](#) mostra a fotografia de uma descarga atmosférica. As descargas reflexas podem acontecer por várias vezes, após

cessada a descarga principal.

Já a [Figura 13.3](#) ilustra graficamente a formação das descargas atmosféricas, conforme o fenômeno foi descrito anteriormente.

O leitor poderá complementar a descrição sumária da formação das descargas atmosféricas consultando o *site* do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), ligado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Ministério da Ciência e Tecnologia.

As probabilidades de ocorrência de valores de pico das descargas atmosféricas, segundo a NBR 5419:2015, são:

- 95 %  $\leq$  5 kA;
- 80 %  $\leq$  20 kA;
- 60 %  $\leq$  30 kA;
- 20 %  $\leq$  60 kA;
- 10 %  $\leq$  80 kA.

Também ficou comprovado que a corrente de descarga tem uma única polaridade, isto é, uma só direção. Uma onda típica de descarga atmosférica foi determinada para efeito de estudos específicos. A [Figura 13.4](#) mostra a conformação dessa onda em função do tempo.



**Figura 13.2** Descargas atmosféricas múltiplas.

A onda atinge seu valor máximo de tensão  $V_2$  em um tempo  $T_2$ , compreendido entre 1 e 10  $\mu\text{s}$ . Já o valor médio  $V_1$ , correspondente ao valor médio da cauda da onda, é atingido em um intervalo de tempo  $T_1$  de 20 a 50  $\mu\text{s}$  caindo para  $V \approx 0$ , ao final de  $T_0$ , no intervalo de 100 a 200  $\mu\text{s}$ . A onda de tensão característica foi normalizada para valores de  $T_1 = 50 \mu\text{s}$  e  $T_2 = 1,5 \mu\text{s}$ , normalmente conhecida como onda de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ . Já a onda característica da corrente de descarga foi normalizada para  $T_1 = 20 \mu\text{s}$  e  $T_2 = 8 \mu\text{s}$  também conhecida como onda de  $8 \times 20 \mu\text{s}$ .

O conhecimento da forma da onda e de seus valores típicos de tensão e tempo, além dos percentuais de sua ocorrência, possibilita a realização de estudos destinados ao dimensionamento dos para-raios de proteção contra sobretensões nas linhas e redes elétricas e dos para-raios de haste, destinados à proteção de construções prediais e instalações em geral.

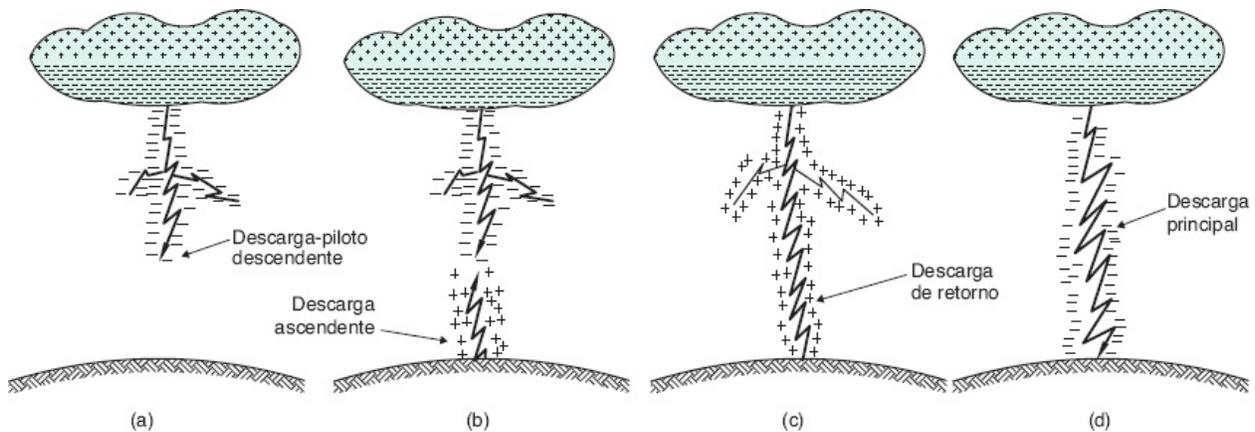
### 13.3 Orientações para proteção do indivíduo

Durante as tempestades, na maioria das vezes, as pessoas se tomam de pavor na presença das descargas atmosféricas, procurando proteção em locais muitas vezes impróprios sob o ponto de vista da segurança. A seguir, será resumidamente analisada a segurança das pessoas em diferentes situações em que podem encontrar-se durante as tempestades.

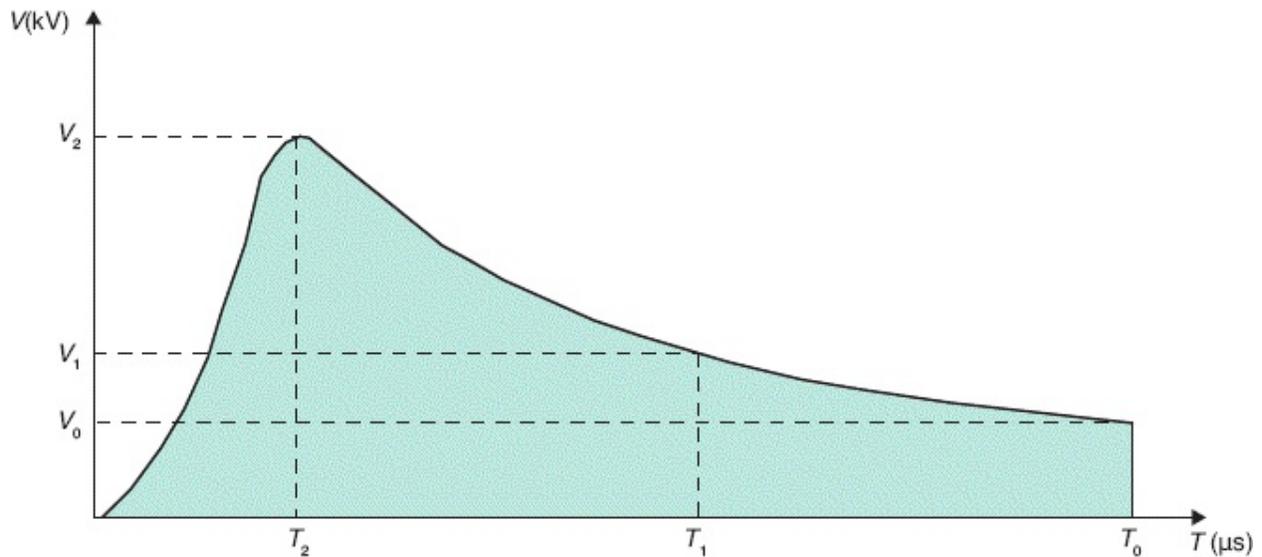
- As pessoas devem retirar-se da água, seja praia, seja barragens, pois as descargas atmosféricas podem provocar no espelho d'água quedas de tensão acentuadas capazes de acidentar o indivíduo, notadamente se este estiver em posição de nado.
- Ao sair da água, não se deve ficar andando ou deitado na praia; procurar sempre um abrigo que possa oferecer a melhor segurança.
- Se o indivíduo estiver no interior de um pequeno barco ou jangada, por exemplo, praticando pescaria, deve recolher a vara de pesca,

colocando-a no interior do barco, e procurar deitar-se ou abaixar-se; se for possível, desembarcar com segurança, identificando logo um local mais seguro.

- Durante as partidas de futebol de várzea, o chamado futebol de poeira, é conveniente interromper o espetáculo e procurar abrigo.
- Nas quadras de esporte abertas, ou campos de futebol, em que não há nenhuma forma de proteção contra descargas atmosféricas, as pessoas devem se proteger sob as arquibancadas, inclusive os atletas; de quando em vez a imprensa televisiva registra e relata ocorrências de raios atingindo atletas em pleno jogo.
- Evitar permanecer em lugares altos dos morros.



**Figura 13.3** Formação de uma descarga atmosférica.



**Figura 13.4** Formato característico de uma onda de descarga atmosférica.

- Evitar locais abertos, como estacionamento e área rural.
- Os operários devem abandonar o topo das construções durante as tempestades.
- Evitar permanecer debaixo de árvores isoladas; é preferível procurar locais com maior número de árvores quando não se encontrar abrigo mais seguro.
- Nunca se deitar debaixo de uma árvore, principalmente com o corpo na posição radial; no caso de uma descarga atingir a árvore, a corrente é injetada no solo no sentido radial, podendo o indivíduo ficar submetido à elevada queda de tensão entre as pontas dos pés e os braços.
- Os melhores abrigos que as pessoas normalmente podem encontrar em situações de tempestades são:
  - Qualquer estrutura que possua uma proteção contra descargas atmosféricas.
  - Grandes estruturas de concreto, mesmo que não possuam proteção contra descargas atmosféricas.
  - Túneis, estações de metrô, passarelas subterrâneas ou quaisquer

estruturas subterrâneas.

- Automóveis, caminhões, carrocerias e congêneres, desde que devidamente fechados e dotados de superfícies metálicas.
- Vias públicas, nas quais haja edificações elevadas.
- Interior de lanchas ou de navios metálicos.

## 13.4 Análise de componentes de risco

O risco é um valor a partir do qual se estabelece uma provável perda anual média de vidas, bens etc., quando se projeta um sistema de descarga atmosférica para proteção de determinada estrutura.

Quando falamos em risco, nesse contexto, referimo-nos aos danos e perdas resultados de uma descarga atmosférica que atinge uma estrutura (edificação, torre, tanques etc.) ou uma linha de energia ou de sinal, ou ainda áreas próximas à estrutura. A NBR 5419-2:2015 codifica as fontes, os tipos de danos e perdas, facilitando sua identificação ao longo do processo de cálculo para a definição da necessidade ou não de implementação de medidas de proteção da estrutura.

### a) Fontes de danos

A principal fonte de danos tem origem na corrente gerada por uma descarga atmosférica, e a severidade do dano está associada ao ponto de impacto da descarga.

- S1: descarga atmosférica que atinge a estrutura.
- S2: descarga atmosférica que atinge áreas próximas à estrutura.
- S3: descarga atmosférica que atinge a linha de energia elétrica, linha telefônica e cabo de internet.
- S4: descarga atmosférica que atinge as proximidades da linha de energia elétrica, linha telefônica e cabo de internet.

## b) Tipos de danos

Os danos causados por uma descarga atmosférica estão associados notadamente ao tipo de construção (edificação em concreto armado, edificação em estrutura de aço etc.), ao tipo de serviço executado no seu interior e às medidas de proteção existentes (DPS coordenados). Os riscos a serem considerados são:

- D1: ferimentos a seres vivos por choque elétrico.
- D2: danos físicos.
- D3: falhas de sistemas eletroeletrônicos.

## c) Tipos de perdas

Os tipos de perdas a serem considerados são:

- L1: ferimentos a seres vivos por choque elétrico.
- L2: perda de serviço público.
- L3: perda de patrimônio cultural.
- L4: perdas de valores econômicos (estrutura, os bens nela contidos e perda de atividade desenvolvida na edificação).

Para avaliação dos riscos a que ficam submetidas as estruturas diante de eventos decorrentes de descargas atmosféricas, temos as seguintes questões a considerar:

- R1: risco de perda de vida humana, incluindo ferimentos.
- R2: risco de perda de serviço público.
- R3: risco de perda de patrimônio cultural (museus, monumentos históricos etc.).
- R4: risco de perda de valores econômicos.

A expressão básica que avalia o nível de risco pode ser dada pela Equação (13.1).

$$R_x = N_x \times P_x \times L_x \quad (13.1)$$

$R_x$  - componente de risco devido a um evento perigoso causado por uma descarga atmosférica;

$N_x$  - número de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas ocorridas no intervalo de um ano; o valor de  $N_x$  será determinado na Seção 13.4.1;

$P_x$  - probabilidade de ocorrência de dano à estrutura; o valor de  $P_x$  será determinado na Seção 13.4.2;

$L_x$  - perda consequente de um evento perigoso causado por uma descarga atmosférica; o valor de  $L_x$  será determinado na Seção 13.4.3.

Em consonância com o objetivo deste livro, trataremos com maior atenção apenas o componente de risco  $R_1$ , envolvendo: (i) as fontes de danos D1, D2 e D3; e (ii) o tipo de perda L1.

Se o valor de  $R_1$  encontrado no final do cálculo de avaliação do risco for superior a  $R_t = 10^{-5}$  deve ser considerada a proteção contra descargas atmosféricas, por meio de um projeto de SPDA, definindo sua classe, que vai de I a IV, conforme o nível de proteção requerido, assunto este que estudaremos na Seção 13.5, sendo que a proteção de nível I pode ser aplicada para todos os casos. Se o conteúdo no interior da edificação ou na área do entorno da mesma tratar-se de materiais sensíveis aos efeitos das descargas atmosféricas (por exemplo, materiais explosivos ou de fácil combustão), deve-se adotar um nível de proteção I (SPDA classe I), podendo-se até decidir-se por um nível de proteção II, conforme a análise do projetista ou as posturas legais da região. Se a região em que está localizada a estrutura tem baixo índice cerâmico associado a um conteúdo de baixa sensibilidade às descargas atmosféricas (por exemplo, depósitos de materiais cerâmicos, peças metálicas e afins), pode-se adotar um nível de proteção III. O nível de proteção IV somente deve ser aplicado em situações de muito baixo risco de perda de vida humana ou ferimentos com sequelas.

A identificação das classes dos SPDA corresponde ao mesmo número

do nível de proteção. Assim, um SPDA classe I atende ao nível de proteção I. Da mesma forma, um SPDA classe III atende ao nível de proteção III.

### 13.4.1 Avaliação do número anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas ( $N_x$ )

As descargas atmosféricas podem causar muitos danos às estruturas e risco de morte às pessoas e animais, sendo considerados perigosos os seguintes eventos:

- Descargas atmosféricas atingindo a estrutura.
- Descargas atmosféricas atingindo um ponto próximo à estrutura.
- Descargas atmosféricas atingindo a linha de energia ou de sinal conectada à estrutura.
- Descargas atmosféricas atingindo um ponto próximo à linha de energia ou de sinal que está conectada à estrutura.

O número de descargas atmosféricas pode ser avaliado a partir de sua densidade, que é uma característica da região onde está localizada a edificação ou estrutura, bem como de suas características físicas, ou seja, edifício, torres, tanques de aço etc. Para se obter seu valor, pode-se consultar o *site* do INPE. Na ausência dessa informação, utilizar a Equação (13.2) simplificada.

$$D_{dat} = 0,10 \times N_{dat} \text{ 1/(km}^2 \times \text{ano)} \quad (13.2)$$

$D_{dat}$  - densidade das descargas atmosféricas para a Terra por km<sup>2</sup> por ano;

$N_{dat}$  - número de dias de tempestades anuais, cujo valor pode ser obtido no mapa isoceráunico nacional mostrado na [Figura 13.5](#).

#### 13.4.1.1 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas

Serão consideradas as descargas atmosféricas que atingem tanto a estrutura como a estrutura adjacente.

#### 13.4.1.1.1 Determinação da área de exposição equivalente da estrutura ( $S_{eqr}$ e $S_{eqc}$ )

Devem ser considerados dois tipos de edificações:

##### a) Estruturas retangulares

O valor da área de exposição equivalente para áreas retangulares pode ser determinado pela Equação (13.3). Para melhor esclarecimento, considerar a ilustração da [Figura 13.6](#).

$$S_{eqr} = L_e \times W_e + 2 \times (3 \times H_e) \times (L_e + W_e) + \pi \times (3 \times H_e)^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (13.3)$$

$S_{eqr}$  - área da estrutura equivalente para áreas planas e retangulares, em m<sup>2</sup>;

$L_e$  - comprimento da estrutura a ser protegida, em m;

$W_e$  - largura da estrutura a ser protegida, em m;

$H_e$  - altura da estrutura a ser protegida, em m.

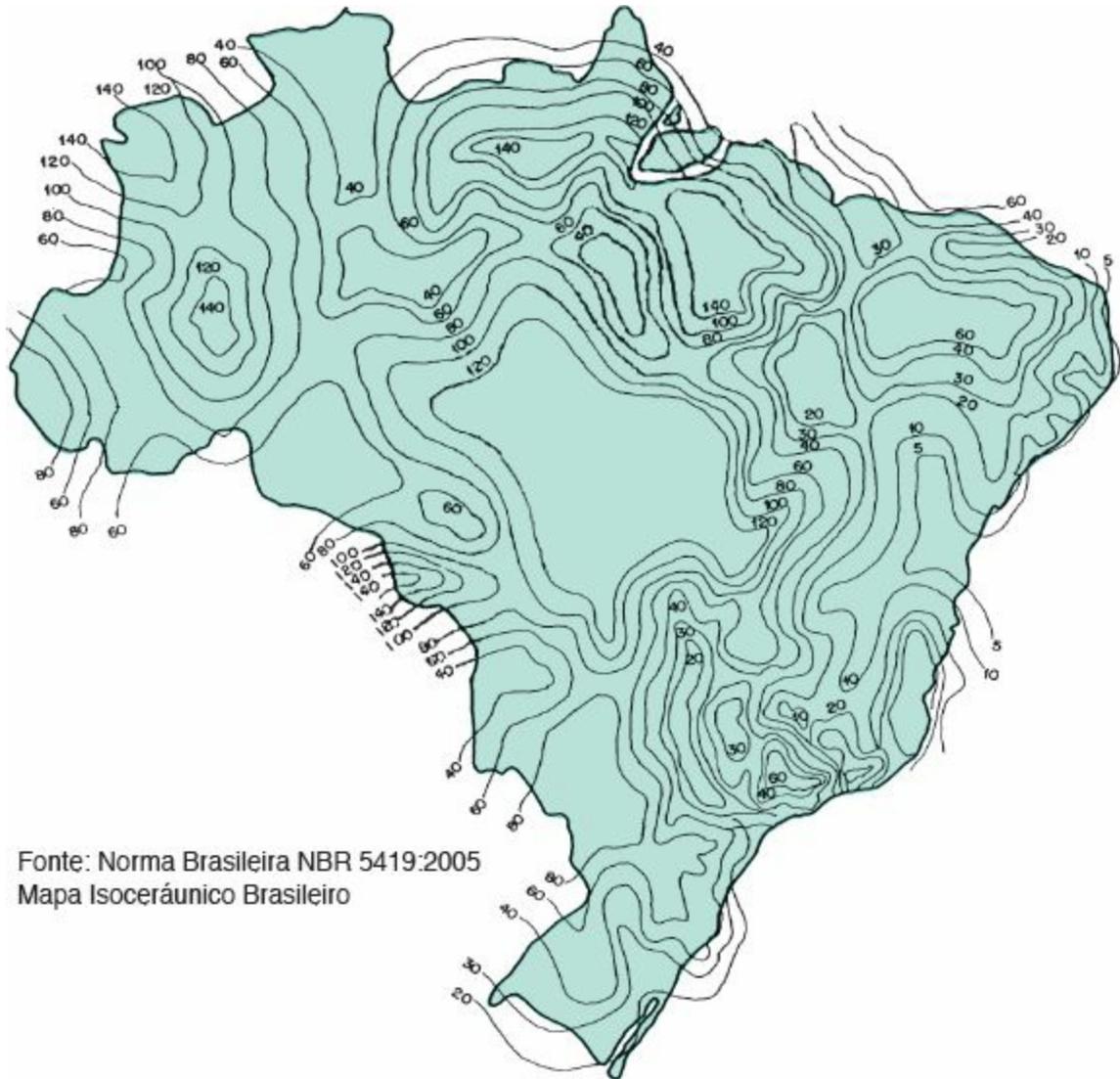
##### b) Estruturas de formas complexas

O valor da área de exposição equivalente pode ser determinado pela Equação (3.4) para as estruturas com saliências no plano de cobertura, tais como chaminés, caixa-d'água etc. Para melhor esclarecimento, considerar a ilustração da [Figura 13.7](#). Outras características de estruturas podem ser avaliadas na NBR 5419-2.

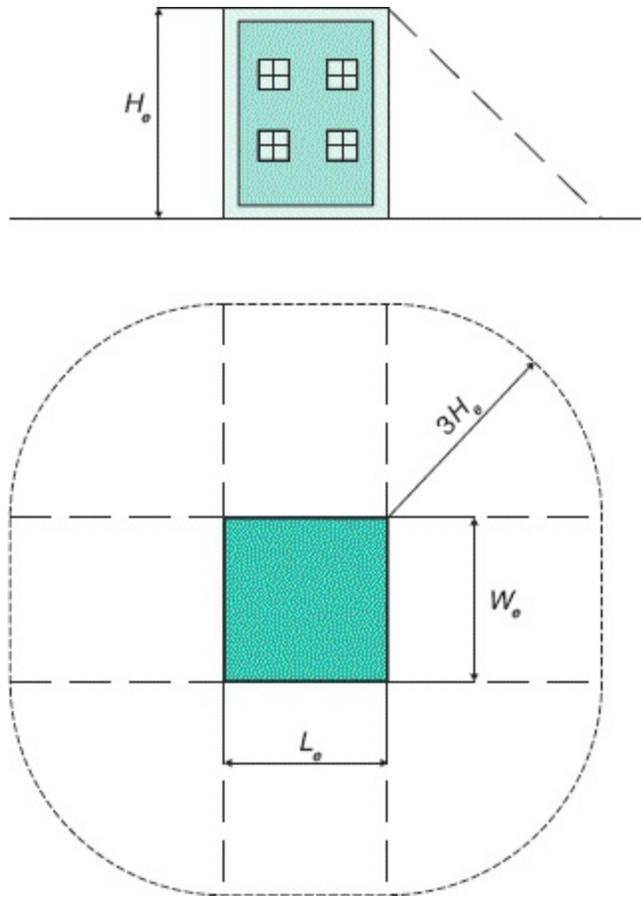
$$S_{eqc} = \pi \times (3 \times H_{ep})^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (13.4)$$

$S_{eqc}$  - área da estrutura equivalente para estruturas complexas atribuída à saliência construída sobre a estrutura;

$H_{ep}$  - altura da saliência construída sobre a estrutura.



**Figura 13.5** Curvas isocerânicas do território brasileiro.



**Figura 13.6** Ilustração de uma estrutura isolada localizada em solo plano.

O valor da área de exposição equivalente deve ser atribuído ao maior valor calculado de  $S_{eqr}$ , considerando  $H_{ep}$  e  $H_{min}$  (altura mínima da estrutura) e a área de exposição equivalente obtida,  $S_{eqc}$ .

#### 13.4.1.1.2 Localização relativa da estrutura

Determinada estrutura pode ser avaliada nas situações em que sua localização fica exposta isoladamente ou compensada por estruturas circunvizinhas, tais como edificações, morros etc. Para cada condição de sua posição em relação aos obstáculos nas proximidades, deve-se considerar o fator de localização dado pela [Tabela 13.1](#).

#### 13.4.1.1.3 Determinação do número de eventos perigosos para a

## estrutura decorrentes de uma descarga atmosférica

Pode ser obtida pela Equação (13.5).

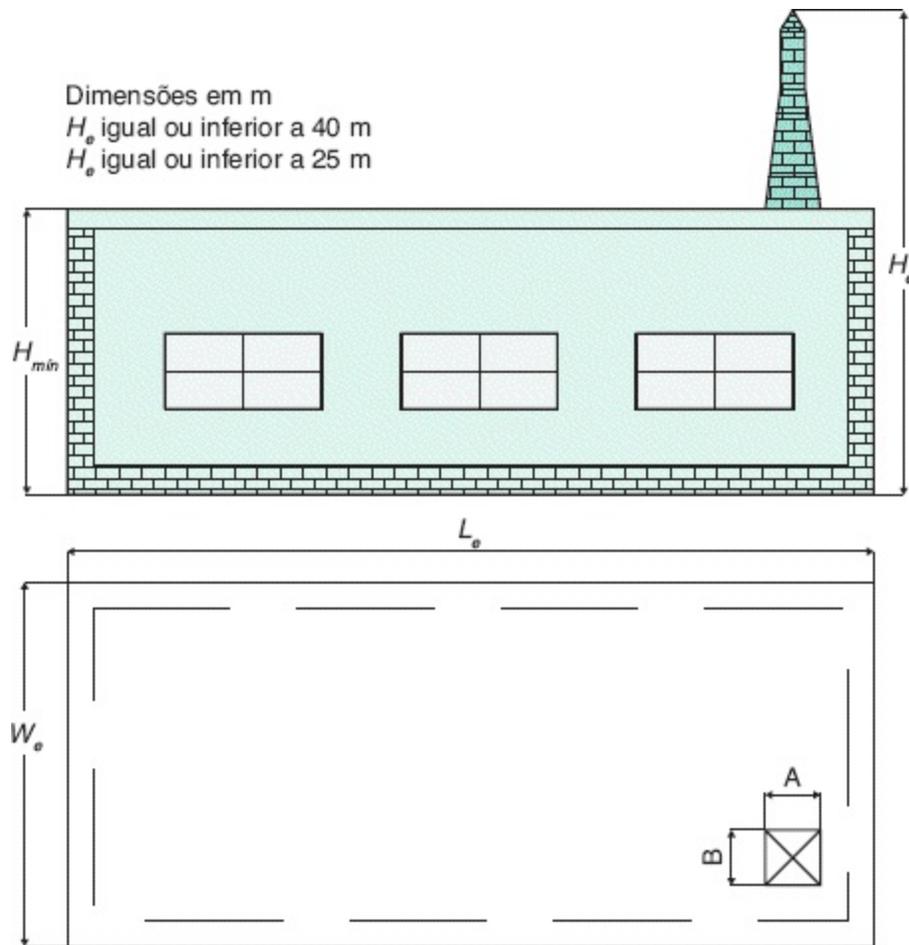
$$N_{ate} = D_{dat} \times S_{eqr} \times F_{le} \times 10^{-6} / \text{ano} \quad (13.5)$$

$N_{ate}$  - número de eventos perigosos para a estrutura devido a descargas atmosféricas/ano;

$D_{dat}$  - densidade das descargas atmosféricas para a Terra, em  $1/(\text{km}^2 \times \text{ano})$ . Pode ser obtido no *site* do INPE ou, simplificada, utilizando a Equação (13.2).

$S_{eqr}$  - área de exposição equivalente da estrutura, em  $\text{m}^2$ , ilustrada na [Figura 13.8](#);

$F_{le}$  - fator de localização da estrutura obtido na [Tabela 13.1](#).



**Figura 13.7** Ilustração de uma área de estrutura complexa.

**Tabela 13.1** Fator de localização da estrutura (NBR 5419-2:2015)

Localização relativa	$F_{le}$ ou $F_{lea}$
Estrutura cercada por objetos mais altos	0,25
Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos	0,5
Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte	2

#### 13.4.1.1.4 Determinação do número de eventos perigosos para

## uma estrutura adjacente decorrentes de descargas atmosféricas

Pode ser obtida pela Equação (13.6).

$$N_{atea} = D_{dat} \times S_{eqra} \times F_{lea} \times F_{tl} \times 10^{-6} / \text{ano} \quad (13.6)$$

$N_{atea}$  - número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas diretamente a uma estrutura adjacente conectada na extremidade da linha;

$D_{dat}$  - densidade das descargas atmosféricas para a Terra, em  $1/(\text{km}^2 \times \text{ano})$ ;

$S_{eqra}$  - área de exposição equivalente da estrutura adjacente, em  $\text{m}^2$ , ilustrada na [Figura 13.8](#), na qual estão definidas suas dimensões que permitem a determinação de seu valor numérico;

$F_{lea}$  - fator de localização da estrutura adjacente obtido na [Tabela 13.1](#);

$F_{tl}$  - fator do tipo de linha obtido na [Tabela 13.2](#).

### 13.4.1.2 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas próximas à estrutura

Pode ser determinada pela Equação (13.7).

$$N_{atpe} = D_{dat} \times S_{eqpm500} \times 10^{-6} / \text{ano} \quad (13.7)$$

$N_{atpe}$  - número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas próximas à estrutura por ano;

$D_{dat}$  - densidade das descargas atmosféricas para a Terra, em  $1/(\text{km}^2 \times \text{ano})$ ;

$S_{eqpm}$  - área de exposição equivalente de descarga atmosférica que atinge um local próximo à estrutura, em  $\text{m}^2$ , ilustrada na [Figura 13.8](#).

A área de exposição equivalente,  $S_{eqpm}$ , que se estende a uma distância de 500 m do perímetro da estrutura a ser protegida, cuja notação é  $S_{eqpm500}$ , pode

ser determinada pela Equação (13.8) e ilustrada na [Figura 13.8](#).

$$S_{eqpm500} = 2 \times 500 \times (L_e + W_e) + \pi \times 500^2 (\text{m}^2) \quad (13.8)$$

### 13.4.1.3 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas que atingem a linha de energia elétrica ( $S_{eqle}$ ) ou de sinal ( $S_{eqls}$ ) que alimenta a estrutura

Pode ser determinada pela Equação (13.9).

$$N_{sl} = D_{dat} \times S_{eq} \times F_{il} \times F_{amb} \times F_{ti} \times 10^{-6} / \text{ano} \quad (13.9)$$

$N_{sl}$  - número de sobretensões de amplitude igual ou superior a 1 kV por ano, na seção da linha de energia ( $N_{sle}$ ) ou de sinal ( $N_{sls}$ );

$D_{dat}$  - densidade das descargas atmosféricas para a Terra, em  $1/(\text{km}^2 \times \text{ano})$ ;

$F_{il}$  - fator de instalação da linha de distribuição, dado na [Tabela 13.3](#);

$F_{amb}$  - fator ambiental dado na [Tabela 13.4](#);

$F_{ti}$  - fator do tipo de linha obtido na [Tabela 13.2](#);

$S_{eq}$  - área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha de energia elétrica ( $S_{eqle}$ ) ou sinal ( $S_{eqls}$ ), em  $\text{m}^2$ ; veja os limites da área na [Figura 13.8](#) e que pode ser determinada pela Equação (13.10).

$$S_{eq} = 40 \times L_l (\text{m}^2) \quad (13.10)$$

$L_l$  - comprimento da seção da linha de distribuição  $L_{le}$  ou de sinal ( $L_{ls}$ ), em m. Se não for identificado o comprimento da linha de distribuição, pode-se assumir que  $L_l = 1.000$  m.

**Tabela 13.2** Fator do tipo de linha (NBR 5419-2:2015)

Instalação	$F_{ti}$
------------	----------

Linha de energia ou sinal

1

Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)

0,2

### 13.4.1.4 Avaliação do número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas que atingem áreas próximas à linha de energia elétrica ( $N_{slsp}$ ) ou de sinal ( $N_{slsp}$ ) que alimenta a estrutura

Pode ser determinada pela Equação (13.11):

$$N_{slp} = D_{dat} \times S_{eqlp} \times F_{il} \times F_{amb} \times F_{ii} \times 10^{-6} / \text{ano} \quad (13.11)$$

$N_{slp}$  - número de sobretensões de amplitude igual ou superior a 1 kV por ano, na seção da linha por ano;

$D_{dat}$  - densidade das descargas atmosféricas para a Terra, em  $1/(\text{km}^2 \times \text{ano})$ ;

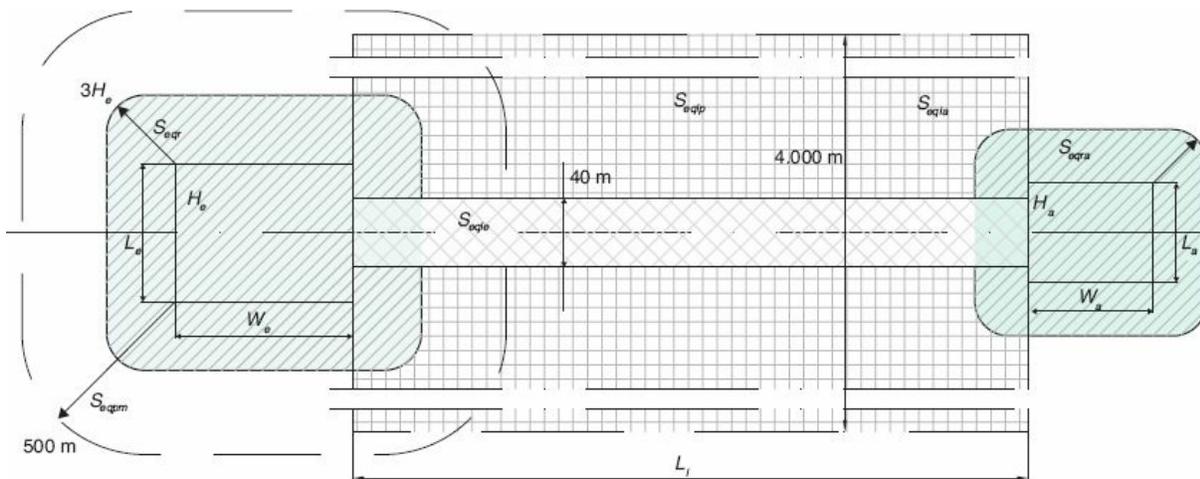


Figura 13.8 Ilustração de áreas de exposição equivalente.

Tabela 13.3 Fator de instalação de linha (NBR 5419-2:2015)

Roteamento

$F_{ii}$

Aéreo	1
Enterrado	0,5
Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento (ABNT NBR 5419-4:2015, 5.2)	0,01

$S_{eqip}$  - área de exposição equivalente de descargas atmosféricas para a Terra que atingem área próxima à linha de distribuição de energia ( $S_{eqlep}$ ) ou de energia ( $S_{eqisp}$ ), em  $m^2$ , ilustrada na [Figura 13.8](#); seu valor é dado pela Equação (13.12).

$$S_{eqip} = 4.000 \times L_l (m^2) \quad (13.12)$$

$L_l$  - comprimento da seção da linha de distribuição de energia ( $L_{lep}$ ) ou de sinal ( $L_{isp}$ ), em m, identificado na [Figura 13.8](#). Se não for possível conhecer o comprimento da linha de distribuição, pode-se assumir  $L_l = 1.000$  m.

$F_{il}$  - fator de instalação da linha de distribuição, dado na [Tabela 13.3](#);

$F_{tl}$  - fator do tipo de linha obtido na Tabela (13.2);

$F_{amb}$  - fator ambiental dado na Tabela (13.4).

**Tabela 13.4** Fator ambiental de linha (NBR 5419-2:2015)

Ambiente	$F_{amb}$
Rural	1
Suburbano	0,5
Urbano	0,1
Urbano com edifícios mais altos que 20 m	0,01

## 13.4.2 Avaliação da probabilidade de danos ( $P_x$ )

### 13.4.2.1 Probabilidade $P_a$ de uma descarga atmosférica atingir uma estrutura e causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico

As tensões de toque e de passo provocadas nos seres vivos devido a descargas atmosféricas ocorridas em uma estrutura é função das medidas de proteção adotadas e do nível de proteção determinado no projeto de SPDA. A probabilidade que essas tensões possam causar choques elétricos pode ser obtida a partir da Equação (13.13).

$$P_a = P_{ta} \times P_b \quad (13.13)$$

$P_{ta}$  - a probabilidade de uma pessoa ficar submetida a tensões de passo e de toque provocadas por descargas atmosféricas em uma estrutura é função das medidas de proteção adicionais adotadas, cujos valores podem ser conhecidos na [Tabela 13.5](#);

$P_b$  - seu valor depende da classe do SPDA projetado para determinado nível de proteção, cujos valores podem ser conhecidos na [Tabela 13.6](#).

**Tabela 13.5** Valores de probabilidade  $P_{ta}$  de uma descarga atmosférica atingir uma estrutura e causar choque a seres vivos devidos a tensões de passo e de toque (NBR 5419-2:2015)

Valores de probabilidade $P_{ta}$	
Medida de proteção adicional	$P_{ta}$
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos de alerta	$10^{-1}$
Isolação elétrica, por exemplo, de pelo menos 3 mm de polietileno reticulado das partes expostas (por exemplo, condutores de descidas)	$10^{-2}$

Equipotencialização efetiva do solo	10 <sup>-2</sup>
Restrições físicas ou estrutura do edifício utilizada como subsistema de descida	0

---

### **13.4.2.2 Probabilidade $P_b$ de uma descarga atmosférica atingir uma estrutura e causar danos físicos**

Como medida adequada para reduzir a probabilidade de ocorrência de danos físicos, devido a descargas atmosféricas, deve-se aplicar um nível de proteção cujos valores são dados na [Tabela 3.6](#).

### **13.4.2.3 Probabilidade $P_c$ de uma descarga atmosférica atingir uma estrutura e causar falhas a sistemas internos**

Como medida adequada para reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas em sistemas internos, tais como os circuitos elétricos da instalação aos quais estão ligados, por exemplo, os equipamentos de tecnologia da informação, pode ser utilizado o sistema DPS (dispositivo de proteção contra sobretensão) aplicado em cascata, devendo haver coordenação entre seus elementos, cujos valores podem ser obtidos por meio da Equação (13.14).

$$P_c = P_{spd} \times F_{iba} \quad (13.14)$$

O valor de  $P_{spd}$  depende do sistema de coordenação dos DPS e do nível de proteção contra descargas atmosféricas obtido e para o qual os DPS foram projetados. Seu valor pode ser obtido na [Tabela 13.7](#) em função do nível de proteção.

Já o valor de  $F_{iba}$  depende do nível de isolamento da linha de fornecimento de energia elétrica à estrutura, da blindagem aplicada à linha e do projeto de aterramento desenvolvido para protegê-la. Seu valor pode ser obtido na [Tabela 13.8](#), em função dos diferentes tipos de linha elétrica ou de

sinal conectados à estrutura.

**Tabela 13.6** Valores de probabilidade  $P_b$  em função das medidas de proteção para reduzir danos físicos (NBR 5419-2:2015)

Características da estrutura	Classe do SPDA	$P_b$
Estrutura não protegida por SPDA	-	1
Estrutura protegida por SPDA	IV	0,2
	III	0,1
	II	0,05
	I	0,02
Estrutura com subsistema de captação conforme SPDA classe I e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descida natural		0,01
Estrutura com cobertura metálica e um subsistema de captação, possivelmente incluindo componentes naturais, com proteção completa de qualquer instalação na cobertura contra descargas atmosféricas diretas e uma estrutura metálica contínua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descidas natural		0,001

**Tabela 13.7** Valores de probabilidade  $P_{spd}$  em função do nível de proteção para o qual os DPS foram projetados (NBR 5419-2:2015)

Nível de proteção (NP)	$P_{spd}$
Nenhum sistema de DPS coordenado	1
III-IV	0,05
II	0,02

I

0,01

Para DPS com melhores características de proteção quando comparados com os requisitos definidos para NP I

0,005 - 0,001

**Tabela 13.8** Valores dos fatores  $F_{iba}$  e  $F_{ba}$  em função das condições de blindagem, aterramento e isolamento (NBR 5419-2:2015)

Tipo de linha externa	Conexão na entrada	$F_{iba}$	$F_{ba}$
Linha aérea não blindada	Indefinida	1	1
Linha enterrada não blindada	Indefinida	1	1
Linha de energia com neutro multiaterrado	Nenhuma	1	0,2
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,3
Linha aérea blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,1
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Linha área blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Cabo protegido contra descargas			

atmosféricas ou cabeamento em dutos para cabos protegidos contra descargas atmosféricas, eletroduto metálico ou tubos metálicos	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	0	0
Nenhuma linha externa	Sem conexões com linhas externas (sistemas independentes)	0	0
Qualquer tipo	Interfaces isolantes de acordo com a ABNT 5419-4	0	0

### 13.4.2.4 Probabilidade $P_m$ de uma descarga atmosférica atingir um ponto próximo a uma estrutura e causar falhas em sistemas internos

É função das medidas adotadas de proteção da estrutura, tais como a instalação de SPDA, blindagens com malha, tensão suportável aumentada dos aparelhos, equipamentos, linhas elétricas e sistemas coordenados de DPS. Seu valor pode ser obtido da Equação (13.15):

$$P_m = P_{spd} \times F_{ms} \quad (13.15)$$

$F_{ms}$  - fator calculado pela Equação (13.16).

$$F_{ms} = (K_{s1} \times K_{s2} \times K_{s3} \times K_{s4})^2 \quad (13.16)$$

$K_{s1}$  - função da eficiência por blindagem por malha na estrutura, do projeto de SPDA; seu valor deve ser igual ou inferior a 1 e pode ser obtido pela Equação (13.6.1).

$$K_{s1} = 0,12 \times L_{m1} \quad (13.16.1)$$

$L_{m1}$  e  $L_{m2}$  - larguras da blindagem em forma de grade, ou dos condutores de

descida do SPDA do tipo malha ou o espaçamento entre colunas metálicas da estrutura, em metros;

$K_{s2}$  - função da eficiência por blindagem através de malha de blindagem interna à estrutura; seu valor deve ser igual ou inferior a 1.

$$K_{s2} = 0,12 \times L_{m2} \quad (13.16.2)$$

$K_{s3}$  - função das características da fiação interna, conforme a [Tabela 13.9](#);

$K_{s4}$  - função da tensão suportável de impulso do sistema a ser protegido; deve ser igual ou inferior a 1.

$$K_{s4} = \frac{1}{V_{tsi}} \quad (13.16.3)$$

$V_{tsi}$  - tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido, em kV.

**Tabela 13.9** Fator  $K_{s3}$  em função dos cabos da instalação interna (NBR 5419-2:2015)

Tipo de fiação interna	$K_{s3}$
Cabo não blindado - sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços (1)	1
Cabo não blindado - preocupação no roteamento no sentido de evitar grandes laços (2)	0,2
Cabo não blindado - preocupação no roteamento no sentido de evitar laços (3)	0,01
Cabo blindado e cabos instalados em eletrodutos metálicos (4)	0,0001

(1) Condutores em laço com diferentes roteamentos em grandes edifícios (área do laço da ordem de 50 m<sup>2</sup>).

(2) Condutores em laço roteados em um mesmo eletroduto ou condutores em laço com diferentes roteamentos em edifícios pequenos (área do laço da ordem de 10 m<sup>2</sup>).

(3) Condutores em laço roteados em um mesmo cabo (área do laço da ordem de 0,5 m<sup>2</sup>).

(4) Blindados e eletrodutos metálicos interligados a um barramento de equipotencialização em ambas extremidades e equipamentos estão conectados no mesmo barramento de equipotencialização.

### 13.4.2.5 Probabilidade $P_u$ de uma descarga atmosférica atingir uma linha e causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico

É dada pela Equação (13.17).

$$P_u = P_{tu} \times P_{eb} \times P_{ld} \times F_{iba} \quad (13.17)$$

$P_{tu}$  - função das medidas de proteção contra tensões de toque, tais como restrições físicas ou avisos visíveis de alerta; seu valor é fornecido pela [Tabela 13.10](#);

**Tabela 13.10** Probabilidade  $P_{tu}$  de uma descarga atmosférica, em uma linha que adentre a estrutura, causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas (NBR 5419-2:2015)

Medida de proteção	$P_{tu}$
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos visíveis de alerta	$10^{-1}$
Isolação elétrica	$10^{-2}$
Restrições físicas	0

$P_{eb}$  - função das ligações equipotenciais dos aterramentos do SPDA e do nível de proteção contra descargas atmosféricas (NP); seu valor é fornecido pela [Tabela 13.11](#);

$P_{ld}$  - probabilidade de ocorrência de falha dos sistemas internos devido a uma descarga atmosférica no circuito elétrico de alimentação da estrutura; seu valor pode ser fornecido na [Tabela 13.12](#);

$F_{iba}$  = definido em 13.4.2.3; seu valor é fornecido na [Tabela 13.8](#).

### 13.4.2.6 Probabilidade $P_v$ de uma descarga atmosférica atingir uma linha e causar danos físicos

É dada pela Equação (13.18).

$$P_v = P_{eb} \times P_{ld} \times F_{iba} \quad (13.18)$$

Os significados de  $P_{eb}$  e  $P_{ld}$  são os mesmos já descritos em 13.4.2.5, e  $F_{iba}$  em 13.4.2.3.

**Tabela 13.11** Valores de probabilidade  $P_{eb}$  para o qual os DPS foram projetados (NBR 5419-2:2015)

Nível de proteção (NP)	$P_{eb}$
Sem DPS	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01
Os valores de $P_{eb}$ podem ser reduzidos para DPS que tenham melhores características de proteção comprados com os requisitos definidos para NP I	0,005 - 0,001

### 13.4.2.7 Probabilidade de uma descarga atmosférica atingir uma linha e causar falhas nos sistemas internos à estrutura ( $P_w$ )

É dada pela Equação (13.19):

$$P_w = P_{spd} \times P_{ld} \times F_{iba} \quad (13.19)$$

sendo que o valor de  $P_{spd}$  depende do sistema coordenado de DPS e do nível de proteção contra descargas atmosféricas obtido e para o qual os DPS foram

projetados. Seu valor pode ser definido a partir da [Tabela 13.7](#) em função do nível de proteção.

Os valores de  $P_{spd}$  e  $F_{iba}$  foram definidos em 13.4.2.3. O valor de  $P_{ld}$  foi definido em 13.4.2.5.

### 13.4.2.8 Probabilidade $P_z$ de uma descarga atmosférica, ocorrida nas proximidades de uma linha que adentre a estrutura, causar falhas nos sistemas internos

É dada pela Equação (13.20):

$$P_z = P_{spd} \times P_{li} \times F_{ba} \quad (13.20)$$

$P_{li}$  - probabilidade de falhas de sistemas internos à estrutura em função de uma descarga atmosférica nas proximidades de uma linha conectada à essa estrutura e que depende das características da blindagem da linha e da sua tensão suportável de impulso; seu valor é fornecido na [Tabela 13.13](#);

**Tabela 13.12** Valores de probabilidade  $P_{ld}$  dependendo da resistência da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso  $V_{tsi}$  (NBR 5419-2:2015)

Tipo da linha	Condições do roteamento, blindagem e interligação	Tensão suportável $V_{tsi}$ em kV				
		1	1,5	2,5	4	6
	Linha aérea ou enterrada, não blindada ou com a blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento.	1	1	1	1	1
	Blindada aérea ou enterrada cuja blindagem está $5 \Omega/\text{km} < R_{sb} \leq 20 \Omega/\text{km}$	1	1	0,95	0,9	0,8
	$1 \Omega/\text{km} < R_{sb} \leq 5 \Omega/\text{km}$	0,9	0,8	0,6	0,3	0,1

Linhas de energia ou sinal (1)	interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento	$\Omega/\text{km}$					
		$Rsb \leq 1 \Omega/\text{km}$	0,6	0,4	0,2	0,04	0,02

(1) Para rede de distribuição de energia subterrânea de média tensão o valor de  $Rsb$  varia entre 1 e 5  $\Omega/\text{km}$ .

(2) Nas linhas de sinal em cabos subterrâneos de 20 condutores o valor de  $Rsb$  é de aproximadamente 20  $\Omega/\text{km}$ .

**Tabela 13.13** Valores de probabilidade  $P_{li}$  dependendo do tipo de linha e da tensão suportável de impulso  $V_{tsi}$  dos equipamentos (NBR 5419-2:2015)

Tipo da linha	Tensão suportável $V_{tsi}$ em kV				
	1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Linhas de sinais	1	0,5	0,2	0,08	0,04

$F_{ba}$  - fator que depende das condições da blindagem, do aterramento e das condições da linha.

O valor de  $P_{spd}$  já foi definido em 13.4.2.3 e na [Tabela 13.8](#).

### 13.4.3 Análise da quantidade de perda ( $Lx$ )

#### 13.4.3.1 Perdas de vida humana ( $L_1$ )

Podem ser dadas pelas Equações (13.21) a (13.23).

- Para o tipo de dano D1: ferimentos a seres vivos por choque elétrico

$$L_a = L_u = F_t \times L_t \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} \quad (13.21)$$

A expressão  $\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760}$  é denominada fator para pessoas na zona.

- Para o tipo de dano D2: danos físicos

$$L_b = L_v = F_p \times F_f \times F_z \times L_f \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} \quad (13.22)$$

- Para tipo de dano D3: falhas em sistemas eletroeletrônicos

$$L_c = L_m = L_w = L_z = L_o \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} \quad (13.23)$$

$L_t$  - número médio relativo típico de vítimas feridas por choque elétrico (D1), devido a um evento perigoso decorrente de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.14](#);

$L_f$  - número médio relativo típico de vítimas por danos físicos (D2), devido a um evento perigoso decorrente de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.14](#);

$L_o$  - número relativo médio típico de vítimas por falha de sistemas internos (D3) em função de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.14](#);

$F_t$  - fator de redução de perda de vidas humanas em função do tipo da superfície do solo ou piso da estrutura, devido a um evento perigoso decorrente de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.15](#);

$F_p$  - fator de redução de perda devido a danos físicos em função de determinadas providências de segurança, tais como a instalação de extintores de incêndio, placas de aviso etc., de acordo com a [Tabela 13.16](#); no caso de estrutura com risco de explosão,  $F_p = 1$ ; se forem tomadas mais de uma providência de segurança, pode-se atribuir a  $F_p$  o menor dos valores relevantes;

$F_f$  - fator de redução das perdas em função dos danos físicos, dependendo do

risco de explosões ou incêndios da estrutura, de acordo com a [Tabela 13.17](#);

$F_z$  - fator de aumento das perdas em função dos danos físicos quando um perigo especial estiver presente, de acordo com a [Tabela 13.18](#);

$N_z$  - número de pessoas na zona;

$N_t$  - número total de pessoas na estrutura;

$T_z$  - tempo durante o qual as pessoas estão presentes na zona, em horas/ano.

Se as descargas atmosféricas envolverem estruturas nas proximidades ou o meio ambiente, tais como emissões de particulados químicos ou radioativas, podem ser consideradas perdas adicionais  $L_e$  com a finalidade de determinar a perda total  $L_{ft}$ :

$$L_{ft} = L_f + L_e \quad (13.24)$$

$$L_e = \frac{L_{fe} \times T_e}{8.860} \quad (13.25)$$

$L_{fe}$  - perdas por danos físicos fora da estrutura;

**Tabela 13.14** Tipo de perda  $L_1$ : valores médios típicos de  $L_t$ ,  $L_f$  e  $L_o$  (NBR 5419-2:2015)

Tipo de dano	Valor de perda típico	Tipo da estrutura
D1 ferimentos	$L_t$	$10^{-2}$ Todos os tipos
		$10^{-1}$ Risco da explosão
		$10^{-1}$ Hospital, hotel, escola, edifício cívico
D2 danos físicos	$L_f$	$5 \times 10^{-2}$ Entretenimento público, igreja, museu

		$2 \times 10^{-2}$	Industrial, comercial
		$10^{-2}$	Outros
		$10^{-1}$	Risco de explosão
D3 falhas em sistema interno	$L_0$	$10^{-2}$	Unidade de terapia intensiva e bloco cirúrgico de hospital
		$10^{-3}$	Outras partes de hospital

**Tabela 13.15** Fator de redução  $F_t$  (NBR 5419-2:2015)

Tipo de superfície (2)	Resistência de contato $k \Omega$ (1)	$F_t$
Agricultura, concreto	$\leq 1$	$10^{-2}$
Mármore, cerâmica	1 - 10	$10^{-3}$
Cascalho, tapete, carpete	10 - 100	$10^{-4}$
Asfalto, linóleo, madeira	$\geq 100$	$10^{-5}$

(1) Valores medidos entre um eletroduto de 400 cm<sup>2</sup> comprimido com uma força uniforme de 500 N e um ponto considerado no infinito.

(2) Uma camada de material isolante, por exemplo, asfalto, de 5 cm de espessura (ou uma camada de cascalho de 15 cm de espessura) geralmente reduz o perigo a um nível tolerável.

**Tabela 13.16** Fator de redução  $F_p$  (NBR 5419-2:2015)

Providências	$F_p$
Nenhuma providência	1

Uma das seguintes providências: extintores, instalações fixas operadas manualmente,

instalações de alarme, hidrantes, compartimentos à prova de fogo, rotas de escape	0,5
Uma das seguintes providências: instalações fixas operadas automaticamente, instalações de alarme automático (1)	0,2

(1) Somente se protegidas contra sobretensões e outros danos e se os bombeiros puderem chegar em menos de 10 min.

**Tabela 13.17** Fator de redução  $F_f$  (NBR 5419-2:2015)

Risco	Quantidade de risco	$F_f$
	Zonas 0, 20 e explosivos sólidos	1
Explosão	Zonas 1, 21	$10^{-1}$
	Zonas 2, 22	$10^{-3}$
	Alto	$10^{-1}$
Incêndio	Normal	$10^{-2}$
	Baixo	$10^{-3}$
	Nenhum	0

Zona 0: local no qual uma atmosfera explosiva consistindo em uma mistura de ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa está presente continuamente ou por longos períodos ou frequentemente (ABNT NBR IEC60050-426).

Zona 1: local no qual uma atmosfera explosiva consistindo em uma mistura de ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa pode ocorrer em operação normal ocasionalmente (ABNT NBR IEC60050-426).

Zona 2: local no qual uma atmosfera explosiva consistindo em uma mistura de ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa não é provável de ocorrer em operação normal mas, se isto acontecer, irá persistir somente por períodos curtos.

Zona 20: local no qual uma atmosfera explosiva, na forma de nuvem de poeira combustível no ar, está presente continuamente ou por longos períodos ou frequentemente (ABNT NBR IEC60079-10-2).

Zona 21: local no qual uma atmosfera explosiva, na forma de nuvem de poeira combustível no ar, pode

ocorrer em operação normal ocasionalmente (ABNT NBR IEC60079-10-2).

Zona 22: local no qual uma atmosfera explosiva, na forma de nuvem de poeira combustível no ar, não é provável de ocorrer em operação normal, mas, se isto ocorrer, irá persistir somente por um período curto (ABNT NBR IEC60079-10-2).

$T_e$  - tempo da presença de pessoas nos locais perigosos fora da estrutura.

Se não for possível avaliar os valores de  $L_{fe}$  e  $T_e$ , pode-se admitir  $L_{fe} = 1$  e  $T_e/8.760 = 1$ .

### 13.4.3.2 Perdas inaceitáveis em serviço ao público ( $L_2$ )

As perdas inaceitáveis podem ser determinadas a partir das Equações (13.26) e (13.27).

- Para tipo de dano D2: danos físicos

$$L_b = L_v = F_p \times F_f \times L_f \times \frac{N_z}{N_t} \quad (13.26)$$

- Para tipo de dano D3: falhas em sistemas eletroeletrônicos

$$L_c = L_m = L_w = L_z = L_o \times \frac{N_z}{N_t} \quad (13.27)$$

$L_f$  - número médio relativo típico de usuários não servidos resultante do dano físico (D2), devido a um evento perigoso decorrente de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.19](#);

$L_o$  - número médio relativo típico de usuários não servidos resultante da falha de sistemas internos (D3) em função de ferimentos, danos físicos e falhas no sistema interno devido aos efeitos de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.19](#).

**Tabela 13.18** Fator  $F_z$  (NBR 5419-2:2015)

Tipo de perigo especial	$F_z$
-------------------------	-------

Sem perigo especial	1
Baixo nível de pânico (por exemplo, uma estrutura limitada a dois andares e número de pessoas não superior a 100)	2
Nível médio de pânico (por exemplo, uma estrutura designada para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes entre 100 e 1.000 pessoas)	5
Dificuldade de evacuação (por exemplo, estrutura com pessoas imobilizadas, hospitais)	5
Alto nível de pânico (por exemplo, estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes maior que 1.000 pessoas)	10

**Tabela 13.19** Tipo de perda  $L_2$ : valores médios típicos de  $L_f$  e  $L_o$  (NBR 5419-2:2015)

Tipo de dano	Valor da perda típico	Tipos de serviço
D2: danos físicos	$L_f$	$10^{-1}$ Gás, água, fornecimento de energia
		$10^{-2}$ TV, linhas de sinais
D3: falhas em sistemas internos	$L_o$	$10^{-2}$ Gás, água, fornecimento de energia
		$10^{-3}$ TV, linhas de sinais

### 13.4.3.3 Perdas inaceitáveis em patrimônio cultural ( $L_3$ )

As perdas podem ser determinadas a partir da Equação (13.28).

$$L_b = L_v = F_p \times F_f \times L_f \times \frac{C_z}{C_t} \quad (13.28)$$

$C_t$  - valor total da estrutura adicionado aos bens contidos no seu interior em todas as zonas;

$C_z$  - valor do patrimônio cultural na zona;

$L_f$  - número médio relativo típico de todos os valores atingidos por danos físicos (D2), devido a um evento perigoso decorrente de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.20](#).

**Tabela 13.20** Tipo de perda  $L_3$ : valor médio típico de  $L_f$  (NBR 5419-2:2015)

Tipo de dano	Valor da perda típico	Tipo de serviço
D2: danos físicos	$L_f$	Museus, galerias

#### 13.4.3.4 Perdas econômicas ( $L_4$ )

As perdas econômicas podem ser determinadas a partir das Equações (13.29) a (13.31).

- Para o tipo de dano D1: ferimentos a seres vivos por choque

$$L_a = L_u = F_t \times L_t \times \frac{C_a}{C_t} \quad (13.29)$$

- Para o tipo de dano D2: danos físicos

$$L_b = L_v = F_p \times F_f \times L_f \times \left( \frac{C_a + C_b + C_c + C_s}{C_t} \right) \quad (13.30)$$

- Para o tipo de dano D3: falha em sistemas

$$L_c = L_m = L_w = L_z = L_o \times \frac{C_s}{C_t} \quad (13.31)$$

$L_t$  - número médio relativo típico de todos os valores danificados por choque elétrico (D1), devido a um evento perigoso decorrente de uma descarga

atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.21](#);

$L_f$  - número relativo médio típico de todos os valores atingidos pelos danos físicos (D2), resultantes dos efeitos de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.21](#);

$L_o$  - número relativo médio típico de todos os valores danificados em função da falha de sistemas internos (D3), devido a um evento perigoso decorrente de uma descarga atmosférica, de acordo com a [Tabela 13.21](#);

$F_t$  - fator de redução de perda de animais em função do tipo da superfície do solo ou piso da estrutura, de acordo com a [Tabela 13.15](#);

$F_p$  - fator de redução de perda devido a danos físicos em função das providências tomadas para reduzir as consequências de incêndio, de acordo com a [Tabela 13.16](#);

$F_f$  - fator de redução das perdas em função dos danos físicos, dependendo do risco de explosões e incêndios na estrutura, de acordo com a [Tabela 13.17](#);

$C_a$  - valor dos animais na zona;

$C_b$  - valor da edificação relevante na zona;

$C_c$  - valor dos bens contidos na zona;

**Tabela 13.21** Tipo de perda  $L_4$ : valor médio típico de  $L_f$ ,  $L_f$  e  $L_o$  (NBR 5419-2:2015)

Tipo de dano	Valor da perda típico	Tipo da estrutura	
D1: ferimentos devido ao choque	$L_t$	$10^{-2}$	Todos os tipos onde somente animais estão presentes
		1,00	Risco de explosão
		0,50	Hospital, indústria, museus, agricultura
D2: danos físicos	$L_f$	0,20	Hotel, escola, escritórios,

			igreja, entretenimento público, comércio
		10 <sup>-1</sup>	Outros
		10 <sup>-1</sup>	Risco de explosão
		10 <sup>-2</sup>	Hospital, indústria, escritório, hotel, comercial
D3: falhas em sistemas internos	$L_0$	10 <sup>-3</sup>	Museus, agricultura, escola, igreja, entretenimento público
		10 <sup>-4</sup>	Outros

$C_s$  - valor dos sistemas internos, incluindo suas atividades na zona;

$C_t$  - valor total da estrutura, somando-se todas as zonas para animais, edificação, bens e sistemas internos, incluindo suas atividades.

As relações  $\frac{C_a}{C_t}$ ,  $\left(\frac{C_a + C_b + C_c + C_s}{C_t}\right)$  e  $\frac{C_s}{C_t}$  somente devem ser consideradas nas Equações (13.29) a (13.31), se a análise de risco for realizada a partir de uma análise de custo-benefício para perda econômica (L4) prevista no item 6.10 da NBR 5419-2:2015 associada ao Anexo D da mesma norma. No caso de se utilizar um valor representativo para o risco tolerável R4, de acordo com a Tabela 4 da norma mencionada, as relações não podem ser levadas em consideração, sendo as mesmas substituídas pela unidade (1). O autor não tratou do desenvolvimento dessas relações devido às dificuldades para a obtenção das variáveis  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  e  $C_s$ , deixando para o leitor que tenha necessidade dessa aplicação fazer sua avaliação de acordo com a norma.

Se as descargas atmosféricas envolverem estruturas nas proximidades ou

o meio ambiente, tais como emissões químicas ou radioativas, podem ser consideradas perdas adicionais  $L_e$  com a finalidade de determinar a perda total:

$$L_{fe} = L_f + L_e \quad (13.32)$$

$$L_e = \frac{L_{fe} \times C_e}{C_t} \quad (13.33)$$

$L_{fe}$  - perda devida a danos físicos fora da estrutura; se o valor de  $L_{fe}$  considerar

$L_{fe} = 1$ ;

$C_e$  - valor total em perigo fora da estrutura.

#### 13.4.4 Análise dos componentes de risco

A NBR 5419-2 distribui os riscos em quatro fontes de danos, cada uma delas associada a até três tipos de danos.

As Equações (13.34) a (13.41) têm sua origem na Equação (13.1).

##### 13.4.4.1 Fonte de danos S1: descarga atmosférica na estrutura

###### a) D1: ferimentos a seres vivos devidos a choque elétrico

Pode ser determinado pela Equação (13.34).

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a \quad (13.34)$$

$R_a$  - componente relativo a ferimentos a seres vivos decorrentes de choques elétricos devido à tensão de passo e de choque na parte interna e externa da estrutura, nas zonas em torno dos condutores de descida;

$N_{ate}$  - Equação (13.5);

$P_a$  - Equação (13.13);

$L_a$  - Equação (13.21).

### **b) D2: danos físicos**

Pode ser determinado pela Equação (13.35).

$$R_b = N_{ate} \times P_b \times L_b \quad (13.35)$$

$R_b$  - componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos, na parte interna da estrutura, ocasionando incêndio ou explosão;

$P_b$  - Tabela 13.6;

$L_b$  - Equação (13.22).

### **c) D3: falhas em sistemas eletroeletrônicos**

Pode ser determinado pela Equação (13.36).

$$R_c = N_{ate} \times P_c \times L_c \quad (13.36)$$

$R_c$  - componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP (*lightning electromagnetic pulse*), podendo ocorrer perdas do tipo L2 e L4, em todos os casos, juntamente com L1 nos casos de estruturas com risco de explosão;

$P_c$  - Equação (13.14);

$L_c$  - Equação (13.23).

## **13.4.4.2 Fonte de danos S2: descarga atmosférica próxima à estrutura**

### **a) D3: falhas em sistemas eletroeletrônicos**

Pode ser determinado pela Equação (13.37):

$$R_m = N_{atpe} \times P_m \times L_m \quad (13.37)$$

$R_m$  - componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP, podendo ocorrer perdas do tipo L2 e L4 em todos os casos, juntamente com o tipo L1 nos casos de estruturas com risco de explosão;

$N_{atpe}$  - Equação (13.7);

$P_m$  - Equação (13.15);

$L_m$  - Equação (13.23).

### **13.4.4.3 Fonte de danos S3: descarga atmosférica na linha de fornecimento de energia e de comunicação conectada à estrutura**

#### **a) D1: ferimentos a seres vivos devido a choque elétrico**

Pode ser determinado pela Equação (13.38).

$$R_u = (N_{sl} + N_{atea}) \times P_u \times L_u \quad (13.38)$$

$R_u$  - componente relativo a ferimentos a seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e de passo na parte interna da estrutura.

$N_{sl}$  - Equação (13.9);

$N_{atea}$  - Equação (13.6);

$P_u$  - Equação (13.17);

$L_u$  - Equação (13.29).

#### **b) D2: danos físicos**

Pode ser determinado pela Equação (13.39).

$$R_v = (N_{sl} + N_{atea}) \times P_v \times L_v \quad (13.39)$$

$R_v$  - componente relativo a danos físicos decorrentes de incêndio ou explosão iniciado por centelhamento perigoso entre instalações externas e partes

metálicas, geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura, tendo como origem a corrente de descarga atmosférica transmitida ao longo das linhas;

$N_{sl}$  - Equação (13.9);

$N_{atea}$  - Equação (13.6);

$P_v$  - Equação (13.18);

$L_v$  - Equação (13.22).

### c) D3: falhas em sistemas eletroeletrônicos

Pode ser determinado pela Equação (13.40).

$$R_w = (N_{sl} + N_{atea}) \times P_w \times L_w \quad (13.40)$$

$R_w$  - componente relativo a falhas de sistemas internos causadas por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas pelas mesmas;

$N_{sl}$  - Equação (13.9);

$N_{atea}$  - Equação (13.6);

$P_w$  - Equação (13.19);

$L_w$  - Equação (13.23).

### 13.4.4.4 Fonte de danos S4: descarga atmosférica nas proximidades da linha de fornecimento de energia e de comunicação conectada à estrutura

#### a) D3: falhas em sistemas eletroeletrônicos

Pode ser determinado pela Equação (13.41).

$$R_z = N_{slp} \times P_z \times L_z \quad (13.41)$$

$R_z$  - componente relativo a falhas de sistemas internos causadas por

sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas às mesmas, podendo ocorrer em todos os casos de perdas do tipo L2 e L4, juntamente como o tipo L1, nos casos de estruturas com risco de explosão.

$N_{slp}$  - Equação (13.11);

$P_z$  - Equação (13.20);

$L_z$  - Equação (13.27).

### 13.4.5 Riscos toleráveis

Os valores de referência de risco tolerável ( $R_t$ ) decorrentes de descargas atmosféricas para diferentes tipos de perda são:

- L1 (perda de vida humana ou ferimentos permanentes):  $R_t = 10^{-5}$ .
- L2 (perda de serviço ao público):  $R_t = 10^{-3}$ .
- L3 (perda de patrimônio cultural):  $R_t = 10^{-4}$ .
- L4 (perda de valor econômico):  $R_t = 10^{-3}$  (em geral, os dados necessários para efetivar essa análise não são disponíveis no momento do desenvolvimento de um projeto).

### 13.4.6 Divisão da estrutura em zonas

Na avaliação de cada componente de risco, pode-se dividir a estrutura em uma ou mais diferentes zonas, desde que guardem similaridades nas suas características, ou seja: Z1, Z2... Zn. Como exemplo, podemos dividir a área de uma indústria nas seguintes zonas:

- Z1: área externa à edificação.
- Z2: área externa gramada da edificação.
- Z3: área interna de produção (que pode ser subdividida em outras áreas, quando não há homogeneidade nas suas características construtivas, de produção, de número de funcionários etc.).
- Z4: área administrativa e comercial.

- Z5: centro de controle da produção.

### 13.4.7 Divisão da linha de alimentação da estrutura em seções

Na avaliação de cada componente de risco, pode-se dividir a linha (energia e comunicação) que alimenta a estrutura em uma ou mais seções, ou seja: S1, S2... Sn. Em geral, pode-se considerar o trecho aéreo e o subterrâneo, quando ocorrer as duas situações.

#### Exemplo de aplicação (13.1)

Avaliar a necessidade de proteção contra descargas atmosféricas perigosas que podem ocorrer na fábrica de tecidos Companhia de Tecelagem Heitor M. Costa S.A., localizada no Distrito Industrial de Fortaleza. A parte superior da construção é considerada plana e suas dimensões são: (i) comprimento, 120 m; (ii) largura, 100 m; (iii) altura, 10 m. A edificação é isolada de outras construções. A fábrica é conectada à rede elétrica em média tensão por um alimentador aéreo de 2.550 m de comprimento. A linha de telecomunicação tem comprimento de 1.540 m e é subterrânea.

#### a) Dados do projeto

As zonas para classificação dos riscos foram assim divididas:

Zona Z1: corresponde à área externa em torno dos condutores de descida em até 3 m fora da edificação.

Zona Z2: corresponde à área externa e gramada que circula a edificação (estrutura).

Zona Z3: corresponde à estrutura no interior da qual é industrializado o produto têxtil.

Zona Z4: corresponde à estrutura unida à edificação industrial, na qual funcionam os seguintes setores: (i) setor administrativo; (ii) setor de recursos humanos; e (iii) setor comercial.

Cada uma das zonas mencionadas será analisada individualmente para a composição dos

riscos, a fim de definir se há necessidade de aplicação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

Número de pessoas com presença na fábrica e sua distribuição nas diferentes zonas anteriormente definidas

A Tabela 13.22 fornece o número de funcionários e o tempo que cada grupo tem presença anual nas diferentes zonas. A fábrica funciona em três turnos: (i) das 6 às 12 horas; (ii) das 12 às 18 horas; e (iii) das 18 às 22 horas. A Tabela 13.22 também quantifica as pessoas em cada turno, totalizando 5.760 horas/ano (16 horas/dia  $\times$  30 dias  $\times$  12 meses).

**Tabela 13.22** Distribuição das pessoas por zona

Zona	Número de pessoas	Tempo de presença anual
Z1: área externa próxima às descidas do SPDA	5	5.760
Z2: área externa gramada	8	5.760
Z3: área industrial	350	5.760
Z4: área administrativa/comercial/RH	30	5.760
<b>Total (<math>N_t</math>)</b>	<b>393</b>	-

No caso de empreendimentos fabris, a perda por ferimento a seres vivos por choque elétrico (L1) e a perda econômica (L4) são fundamentais para a avaliação da necessidade de proteção. Nas condições do enunciado da questão, somente é possível determinar o risco do tipo  $R_1$  relacionado à perda de vidas humanas incluindo ferimento, empregando-se os componentes de risco  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_u$  e  $R_v$ , com base na Equação (13.1). Em geral, na fase de projeto, não se considera a avaliação econômica do empreendimento, risco  $R_4$ , para perdas econômicas (L4), pois ainda são prematuros os dados necessários para tal avaliação. Para melhor entendimento, veja a Seção 13.4 deste capítulo.

**Tabela 13.23** Características da estrutura e do meio ambiente

Parâmetros de entrada	Comentários	Símbolo	Valor	Referência
Ocupação da estrutura	Fábrica	-	-	-
Densidade de descargas atmosférica para a terra em dias de tempestade 1/(km <sup>2</sup> /ano)	Figura 13.5	$D_{dat}$	3	Equação (13.2)
Dimensões da estrutura	-	$L_e W_e H_e$	120 × 100 × 10	-
Fator de localização da estrutura	Estrutura isolada	$F_{le}$	1	Tabela 13.1
Fator tipo de linha de energia para a estrutura adjacente	Não há estrutura adjacente	$F_{tl}$	0,2	Tabela 13.2
Fator tipo de linha de sinal para a estrutura adjacente	Não há estrutura adjacente	$F_{tl}$	1	Tabela 13.2
SPDA	Não há SPDA instalado	$P_b$	1	Tabela 13.6
Nível de proteção: sem DPS	Não há DPS instalado	$P_{eb}$	1	Tabela 13.11
Blindagem espacial externa	Não há blindagem espacial	$K_{s1}(1)$	1	Equação (13.16.1)

(1)  $K_{s1} = 0,12 \times L_{m1} = 1$  (valor máximo).

A avaliação do risco  $R_1$  será realizada com base nos seguintes procedimentos:

Para zona Z1

- Dano D1 (ferimentos a seres vivos por choque elétrico): cálculo de  $R_a$

**Tabela 13.24** Características relativas à linha de energia elétrica

Parâmetros de entrada	Comentários	Símbolo	Valor	Referência
Comprimento (m)	Linha de energia	$L_l$	2.560	-
Fator de instalação da linha	Aéreo	$F_{il}$	1	Tabela 13.3
Fator de tipo da linha	Linha de média tensão	$F_{tl}$	0,2	Tabela 13.2
Fator ambiental da linha	Suburbano	$F_{amb}$	0,5	Tabela 13.4
Blindagem de linha ( $\Omega/\text{km}$ )	Não	$R_{sb}$	-	Tabela 13.12
Blindagem, aterramento, isolamento	Não	$F_{iba}$	1	Tabela 13.8
		$F_{ba}$	1	
Estrutura adjacente	Não	$L_{\sigma} W_{\sigma} H_a$	-	Ver Figura 13.8
Fator de localização da estrutura adjacente	Não	$F_{le}$	-	Tabela 13.1
Tensão suportável dos sistemas internos	Sistema de baixa tensão	$V_{tsi}$	2,5	Tabela 13.12
		$K_{s4} (1)$	0,4	Equação (13.16.3)

-	Parâmetros resultantes		
	$P_{ld}$	1	Tabela 13.12
$P_{li}$	0,3	Tabela 13.13	

(1) Linha de energia:  $K_{s4} = 1/V_{tsi} = 1/2,5 = 0,4$ .

Para zona Z2

- Dano D1 (ferimentos a seres vivos por choque elétrico): cálculo de  $R_a$

Para zona Z3

- Dano D1 (ferimentos a seres vivos por choque elétrico): cálculo de  $R_a$  e  $R_u$
- Dano D2 (danos físicos):  $R_b$  e  $R_v$

Para zona Z4

- Dano D1 (ferimentos a seres vivos por choque elétrico): cálculo de  $R_a$  e  $R_u$
- Dano D2 (danos físicos): cálculo de e

### b) Características da estrutura e do meio ambiente

Identificam-se na Tabela 13.23 as características dimensionais da edificação, seu tipo de ocupação e os tipos de proteção existentes.

### c) Características relativas à linha de energia elétrica que alimenta a indústria

Identificam-se na Tabela 13.24 as características básicas da linha elétrica, sua localização, tipo construtivo e dimensão.

### d) Características relativas à linha de sinais que se conecta à indústria

Identificam-se na Tabela 13.25 as características básicas da linha de sinal, sua localização, tipo construtivo e dimensão.

### e) Fatores relacionados às zonas da fábrica

A indústria foi dividida em quatro diferentes zonas: (i) Z1 corresponde à área externa à edificação em até 3 m em torno dos cabos de descida; (ii) Z2 corresponde à área externa gramada que circunda a edificação; (iii) Z3 corresponde à área de máquinas de produção; e (iv) Z4 corresponde

às áreas internas: setor administrativo, setor comercial, setor de recursos humanos, restaurante e setores afins. No caso de ampliar a quantidade de zonas na área industrial e nas áreas administrativas, os procedimentos seriam idênticos.

**Tabela 13.25** Características relativas à linha de sinais

Parâmetros de entrada	Comentários	Símbolo	Valor	Referência
Comprimento (m)	Linha de sinal	$L_l$	1.540	-
Tipo de instalação	Subterrâneo	$F_{il}$	0,5	Tabela 13.3
Fator tipo de linha de sinal	Linha de sinal	$F_{tl}$	1	Tabela 13.2
Fator ambiental da linha de sinal	Suburbano	$F_{amb}$	0,8	Tabela 13.4
Blindagem de linha ( $\Omega/\text{km}$ )	Sim	$R_{sb}$ (1)	0,9	Tabela 13.12
Blindagem, aterramento, isolamento	Sim	$F_{iba}$	1	Tabela 13.8
		$F_{ba}$	0	
Estrutura adjacente	Não	$L_a, W_a, H_a$	-	Figura 13.8
Fator de localização da estrutura adjacente	Não	$F_{le}$	-	Tabela 13.1
Tensão suportável dos sistemas internos	-	$V_{tsi}$	1,5	Tabela 13.12
-	Parâmetros	$K_{s4}$ (2)	0,67	Equação (13.16.3)

resultantes

$P_{id} (3)$

0,4

Tabela 13.12

$P_{ii}$

0,5

Tabela 13.13

(1) Para  $1 < R_{sb} \leq 5 \Omega/\text{km}$  e  $V_{tsi} = 1,5 \text{ kV}$ , ou seja,  $R_{sb} = 0,8$ .

(2) Linha de sinal:  $K_{s4} = 1/V_{tsi} = 1/1,5 = 0,67$ .

(3) Para  $R_{sb} < 1 \Omega/\text{km} \rightarrow P_{id} = 0,40$ .

**Tabela 13.26** Fatores relacionados à zona Z1 (área externa próxima aos cabos de descida do SPDA)

Parâmetros de entrada	Comentários	Símbolo	Valor	Referência
Tipo de piso	Cerâmica	$F_t$	$10^{-3}$	Tabela 13.15
Proteção contra choques	Não	$P_{ta}$	1	Tabela 13.5
Risco de incêndio	Não	$F_f$	0	Tabela 13.17
Proteção contra incêndio	Não	$F_p$	1	Tabela 13.16
Blindagem espacial	Não	$K_{s2} (1)$	1	Equação (13.16.2)
	Perigo especial: sem perigo	$F_z$	1	Tabela 13.18
L1: perda de vida humana	D1: devido à tensão de passo e de toque	$L_t$	$10^{-2}$	Tabela 13.14
	D2: devido a danos físicos	$L_f$	-	
	D3: devido à falha de sistemas internos	$L_o$	-	

Fator de pessoas na zona (2)	$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = \frac{5}{393} \times \frac{5.760}{8.760}$	-	0,0084	-
---------------------------------	---	---	--------	---

(1) Utilizou-se o valor máximo

(2)  $N_z = 5$  (Tabela 13.22);  $T_z = 5.760$  (Tabela 13.22);  $N_t = 393$  (Tabela 13.22).

#### Fatores relacionados à área externa à edificação – zona Z1

Esses fatores estão contidos na Tabela 13.26.

#### Fatores relacionados à área externa à edificação, área gramada – zona Z2

Esses fatores estão contidos na Tabela 13.27.

#### Fatores relacionados à área externa à edificação – zona Z3

Esses fatores estão contidos na Tabela 13.28 e representam a área de produção.

#### Fatores relacionados à área interna à edificação – zona Z4

Esses fatores estão contidos na Tabela 13.29 e representam a área interna onde são realizados os serviços administrativos, comerciais, recursos humanos, almoxarifado etc.

#### f) **Determinação das áreas de exposição equivalente relacionadas à estrutura, linha de energia e linha de sinal.**

**Tabela 13.27** Fatores relacionados à zona Z2 (área externa gramada)

Parâmetros de entrada	Comentários	Símbolo	Valor	Referência
Tipo de piso	Grama	$F_t$	$10^{-2}$	Tabela 13.15
Proteção contra choques	Não	$P_{ta}$	1	Tabela 13.5
Risco de incêndio	Não	$F_f$	0	Tabela 13.17

Proteção contra incêndio	Não	$F_p$	1	Tabela 13.16
Blindagem espacial	Não	$K_{s2}(1)$	1	Equação (13.16.2)
L1: perda de vida humana	Perigo especial: sem perigo	$F_z$	1	Tabela 13.18
	D1: devido à tensão de passo e de toque	$L_t$	$10^{-2}$	
	D2: devido a danos físicos	$L_f$	-	Tabela 13.14
	D3: devido à falha de sistemas internos	$L_o$	-	
Fator de pessoas na zona (2)	$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = \frac{8}{393} \times \frac{5.760}{8.760}$	-	0,0133	-

(1) Utilizou-se o valor máximo.

(2)  $N_z = 8$  (Tabela 13.22);  $T_z = 5.760$  (Tabela 13.22);  $N_t = 393$  (Tabela 13.22).

Determinação da área de exposição equivalente para a estrutura

De acordo com a Equação (13.3), temos:

$$S_{egr} = L_e \times W_e + 2 \times (3 \times H_e) \times (L_e + W_e) + \pi \times (3 \times H_e)^2$$

$$S_{egr} = 120 \times 100 + 2 \times (3 \times 10) \times (120 + 100) + \pi \times (3 \times 10)^2 = 28.027 \text{ m}^2$$

$$L_e = 120 \text{ m}$$

$$W_e = 100$$

$$H_e = 10$$

Determinação da área de exposição equivalente atingida por descarga atmosférica estendida a 500 m do perímetro da estrutura

De acordo com a Equação (13.8), temos:

$$S_{eqpm500} = 2 \times 500 \times (L_e + W_e) + \pi \times 500^2$$

$$S_{eqpm500} = 2 \times 500 \times 120 + 100 + \pi \times 500^2 = 1.005.398 \text{ m}^2$$

Nota: por não ter na prática quase nenhuma influência sobre a estrutura deste Exemplo de aplicação, o valor pode ser desconsiderado para efeito do cálculo das áreas de exposição equivalente da estrutura.

Determinação da área de exposição equivalente para a linha de energia

- Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha de energia

O cálculo da área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem diretamente a linha de distribuição que alimenta a fábrica pode ser obtido a partir da Equação (13.10).

**Tabela 13.28** Fatores relacionados à zona Z3 (área de máquinas de produção)

Parâmetros de entrada	Comentários	Símbolo	Valor	Referência
Tipo de piso	Concreto	$F_t$	$10^{-2}$	Tabela 13.15
Proteção contra choques (descargas atmosféricas na estrutura)	Não	$P_{ta}$	1	Tabela 13.5
Proteção contra choques (descargas atmosféricas na linha)	Não	$P_{tu}$	1	Tabela 13.10

Risco de incêndio	Alto	$F_f$	$10^{-1}$	Tabela 13.17
Proteção contra incêndio	Sim	$F_p$	0,5	Tabela 13.16
Blindagem espacial: interna	Não	$K_{s2}(1)$	1	Equação (13.16.2)
Energia: fiação interna	Não blindada	$K_{s3}$	1	Tabela 13.9
Energia: DPS coordenados	Não	$P_{spd}$	1	Tabela 13.7
Telecom: fiação interna	Não blindada	$K_{s3}$	1	Tabela 13.9
DPS coordenados	Não	$P_{spd}$	1	Tabela 13.7
	Perigo especial: médio pânico	$F_z$	5	Tabela 13.18
L1: perda de vida humana	D1: devido à tensão de passo e de toque	$L_t$	$10^{-2}$	Tabela 13.14
	D2: devido a danos físicos	$L_f$	$2 \times 10^{-2}$	
	D3: devido à falha de sistemas internos	$L_o$	-	
Fator de pessoas na zona	$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = \frac{350}{393} \times \frac{5.760}{8.760}$	-	0,5856	-

(1) Foi utilizado o valor máximo igual a 1.

(2)  $N_z = 350$  (Tabela 13.22);  $T_z = 5.760$  (Tabela 13.22);  $N_t = 393$  (Tabela 13.22).

$$S_{eqle} = 40 \times L_{le} = 40 \times 2.560 = 102.400 = 10,24 \times 10^4 \text{ m}^2$$

- Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem um ponto próximo à linha de energia

O cálculo da área de exposição equivalente de descargas atmosféricas para a Terra que atingem um ponto próximo da linha de distribuição que alimenta a fábrica pode ser obtido pela Equação (13.12).

$$L_{le} = 2.650 \text{ m}$$

$$S_{eqlep} = 4.000 \times L_{le} = 4.000 \times 2.560 = 10.240.000 = 10,240 \times 10^6 \text{ m}^2$$

- Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem diretamente a estrutura adjacente à linha de energia elétrica

De acordo com a Equação (13.3), temos:

$$S_{eqrea} = L_a \times W_a + 2 \times (3 \times H_a) \times (L_a + W_a) + \pi \times (3 \times H_a)^2$$

Como não temos estrutura adjacente (veja Figura 13.8), o valor de  $S_{eqra} = 0$ .

Determinação da área de exposição equivalente para a linha de sinal

- Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha de sinal

O cálculo da área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha de sinal da fábrica pode ser obtido pela Equação (13.10).

**Tabela 13.29** Fatores relacionados à zona Z4 (administrativa, RH, comercial)

Parâmetros de entrada	Comentários	Símbolo	Valor	Referência
Tipo de piso	Cerâmica	$F_t$	$10^{-3}$	Tabela 13.15
Proteção contra choques				

(descargas atmosféricas na estrutura)	Não	$P_{ta}$	1	Tabela 13.5
Proteção contra choques (descargas atmosféricas na linha)	Não	$P_{tu}$	1	Tabela 13.10
Risco de incêndio	Baixo	$F_f$	$10^{-3}$	Tabela 13.17
Proteção contra incêndio	Não	$F_p$	1	Tabela 13.16
Blindagem espacial	Não	$K_{s2}$	1	Equação (13.16.2)
Energia: fiação interna	Não blindada	$K_{s3}$	0,2	Tabela 13.9
Energia: DPS coordenados	Não	$P_{spd}$	1	Tabela 13.7
Telecom: fiação interna	Não blindada	$K_{s3}$	1	Tabela 13.9
DPS coordenados	Não	$P_{spd}$	1	Tabela 13.7
	Perigo especial: baixo pânico	$F_z$	2	Tabela 13.18
L1: perda de vida humana	D1: devido à tensão de passo e de toque	$L_t$	$10^{-2}$	
	D2: devido a danos físicos	$L_f$	$2 \times 10^{-2}$	Tabela 13.14

	D3: devido à falha de sistemas internos	$L_o$	-	
Fator de pessoas na zona	$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = \frac{30}{393} \times \frac{5.760}{8.760}$	-	0,05019	-

$$L_{js} = 1.540 \text{ m.}$$

$$S_{eqjs} = 40 \times L_{js} = 40 \times 1.540 = 61.600 \text{ m}^2.$$

Como a linha de sinal de comunicação é enterrada, o valor de  $S_{eqjs} = 0$  (linha sem exposição às descargas atmosféricas).

Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem um ponto próximo à linha de sinal

O cálculo da área de exposição equivalente de descargas atmosféricas para a Terra que atingem uma área próxima à linha de sinal da fábrica pode ser obtido pela Equação (13.12).

$$S_{eqjsp} = 4.000 \times L_{js} = 4.000 \times 1.540 = 6.160.000 \text{ m}^2.$$

Como a linha de comunicação é enterrada, o valor de  $S_{eqjs} = 0$ .

Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem uma estrutura adjacente à linha de sinal

$$S_{eqrsa} = L_{ad} \times W_{ad} + 2 \times (3 \times H_{ad}) \times (L_{ad} + W_{ad}) + \pi \times (3 \times H_{ad})^2$$

Como não existe estrutura adjacente, o valor de  $S_{eqrsa} = 0$ .

A Tabela 13.30 resume os cálculos anteriormente elaborados.

### g) Número anual de eventos perigosos esperados

Localização relativa da estrutura ou edificação

- Determinação do número de eventos perigosos para a estrutura decorrente de uma descarga atmosférica

Tomando a alternativa simplificada dada pela Equação (13.2) e selecionando a curva isocerâmica mostrada na Figura 13.5 que passa pela região metropolitana de Fortaleza, obtemos o valor de 30 dias de tempestade/ano:

$$N_{dda} = 30$$

$$D_{dat} = 0,10 \times N_{dda} = 0,10 \times 30 = 3 \text{ descargas atmosféricas perigosas por } 1/(\text{km}^2 \times \text{ano}).$$

Logo, o número de eventos perigosos para a estrutura devido às descargas atmosféricas pode ser obtido pela Equação (13.5).

**Tabela 13.30** Área de exposição equivalente: estrutura, linha de energia e de sinal

Parâmetros de entrada	Símbolo	Resultado (m <sup>2</sup> )	Referências	Equação
Estrutura	$S_{eqr}$	28.027	Equação (13.3)	$S_{eqr} = L_e \times W_e + 2 \times (3 \times H_e) \times (L_e + W_e) + \pi \times (3 \times H_e)^2$
	$S_{eqpm500}$	-	Equação (13.8)	$S_{eqpm500} = 2 \times 500 \times (L_e + W_e) + \pi \times 500^2$
Linha de energia	$S_{eqle}$	102.400	Equação (13.10)	$S_{eqle} = 40 \times L_l$
	$S_{eqlep}$	10.240.000	Equação (13.12)	$S_{eqlep} = 4.000 \times L_l$
	$S_{eqrea} (1)$	0	Equação (13.3)	$S_{eqrea} = L_a \times W_a + 2 \times (3 \times H_a) \times (L_a + W_a) + \pi \times (3 \times H_a)^2$
	$S_{eqls}$	0	Equação (13.10)	$S_{eqls} = 40 \times L_l$

Linha de sinal	$S_{eqisp}$	0	Equação (13.12)	$S_{eqisp} = 4.000 \times L_l$
	$S_{eqrsa} (1)$	0	Equação (13.3)	$S_{eqrsa} = L_a \times W_a + 2 \times (3 \times H_a) \times (L_a + W_a) + \pi \times (3 \times H_a)^2$

(1) Como não existe estrutura nas proximidades da fábrica, os valores de  $S_{eqrea}$  e  $S_{eqrsa}$  serão nulos.

$$F_{le} = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$N_{ate} = D_{dat} \times S_{eqr} \times F_{le} \times 10^{-6} = 3 \times 28.027 \times 1 \times 10^{-6} = 0,0841 \text{ 1/(km}^2 \times \text{ano)}$$

- Determinação do número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente devido a descargas atmosféricas

Pode ser obtida a partir da Equação (13.6).

$$F_{le} = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$F_{tl} = 0,20 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$S_{eqra} = 0 \text{ (não há estrutura adjacente)}$$

$$N_{atea} = D_{dat} \times F_{lea} \times F_{tl} \times 10^{-6}$$

Como não há estrutura adjacente à fábrica, o valor de  $N_{atea}$  deve ser desconsiderado.

- Determinação do número de eventos perigosos próximo à estrutura devido a descargas atmosféricas

Pode ser obtida pela Equação (13.7).

$$N_{atpe} = D_{dat} \times S_{eqpm500} \times 10^{-6} = 3 \times 1.005.398 \times 10^{-6} = 3,0162/\text{ano}$$

Localização relativa à linha de energia elétrica

- Avaliação do número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas

atmosféricas que atingem a linha de distribuição de energia elétrica

De acordo com a Equação (13.9), o número de sobretensões de amplitude igual ou superior a 1 kV vale:

$$N_{sle} = D_{dat} \times S_{eqle} \times F_{ij} \times F_{amb} \times F_{tl} \times 10^{-6} = 3 \times 102.400 \times 1 \times 0,5 \times 0,2 \times 10^{-6} = 0,0307/\text{ano}$$

$$F_{ij} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

$$F_{amb} = 0,50 \text{ (Tabela 13.24)}$$

$$F_{tl} = 0,20 \text{ (Tabela 13.24)}$$

- Avaliação do número médio anual de descargas atmosféricas perigosas que atingem um ponto próximo à linha de distribuição de energia

Logo, o número de sobretensões de amplitude igual ou superior a 1 kV/ano, de acordo com a Equação (13.11), vale:

$$N_{slep} = D_{dat} \times S_{eqlep} \times F_{ij} \times F_{amb} \times F_{tl} \times 10^{-6} = 3 \times 10.240.000 \times 1 \times 0,5 \times 0,2 \times 10^{-6} = 3,0720/\text{ano}$$

- Número de eventos perigosos que atingem uma estrutura adjacente conectada à extremidade da linha de distribuição de energia

De acordo com a Equação (13.6), temos:

$$N_{atea} = D_{dat} \times S_{eqra} \times F_{lea} \times F_{tl} \times 10^{-6} \text{ (este valor deve ser desconsiderado, pois não existe estrutura adjacente)}$$

Localização relativa à linha de sinal

- Avaliação do número médio anual de eventos perigosos decorrentes de descargas atmosféricas na linha de sinal

De acordo com a Equação (13.9), o número de sobretensões de amplitude igual ou superior a 1 kV/ano vale:

$N_{sls} = D_{dat} \times S_{eqsls} \times F_{il} \times F_{amp} \times F_{tl} 10^{-6} = 3 \times 61.600 \times 0,5 \times 0,5 \times 1 \times 10^{-6}$  (como a linha de sinal é subterrânea, não sujeita a descargas atmosféricas, podemos considerar  $N_{sls}$  nulo, ou seja,  $N_{sls} = 0$ ).

$$F_{il} = 0,50 \text{ (Tabela 13.25)}$$

$$F_{amb} = 0,50 \text{ (Tabela 13.25)}$$

$$F_{tl} = 1 \text{ (Tabela 13.25)}$$

Avaliação do número médio anual de descargas atmosféricas perigosas que atingem um ponto próximo à linha de sinal

Logo, o número de sobretensões de amplitude igual ou superior a 1 kV, de acordo com a Equação (13.11), vale:

$N_{lsp} = D_{dat} \times S_{eqlsp} \times F_{il} \times F_{amp} \times F_{tl} 10^{-6} = 3 \times 6.160.000 \times 0,50 \times 0,50 \times 1 \times 10^{-6}$  (como a linha de sinal é subterrânea, não sujeita a descargas atmosféricas, podemos considerar  $N_{lsp}$  nulo, ou seja,  $N_{lsp} = 0$ ).

Número de eventos perigosos que atingem uma estrutura adjacente à linha de sinal

De acordo com a Equação (13.6), temos:

$$N_{ateas} = D_{dat} \times S_{eqrsa} \times F_{le} \times F_{tl} \times 10^{-6} \text{ (esse valor deve ser desconsiderado, pois não existe estrutura adjacente).}$$

A Tabela 13.31 sintetiza os resultados dos cálculos realizados anteriormente para a estrutura, linha de energia e de sinal.

**h) Avaliação dos riscos a que ficam submetidas as estruturas diante dos eventos decorrentes de descargas atmosféricas**

Avaliaremos o risco  $R_1$  definido no enunciado do projeto.

Riscos relativos à zona Z1

Dano D1: ferimentos a seres vivos devido a choque elétrico

\* Cálculo de  $R_a$ : Equação (13.34)

**Tabela 13.31** Número anual de eventos perigosos esperados

Parâmetros de entrada	Símbolo	Resultado (1/ano)	Referências	Equação
	$N_{ate}$	0,0841	Equação (13.5)	$N_{ate} = D_{dat} \times S_{egr} \times F_{le} \times 10^{-6}$
Estrutura	$N_{atea}$	0	Equação (13.6)	$N_{atea} = D_{dat} \times S_{eqra} \times F_{lea} \times F_{tl} \times 10^{-6}$
	$N_{atpe}$	3,1620	Equação (13.7)	$N_{atpe} = D_{dat} \times S_{eqpm500} \times 10^{-6}$
Linha de energia	$N_{sle}$	0,0307	Equação (13.9)	$N_{sl} = D_{dat} \times S_{eqle} \times F_{il} \times F_{amb} \times F_{tl} \times 10^{-6}$
	$N_{slep}$	3,0720	Equação (13.11)	$N_{slep} = D_{dat} \times S_{eqlp} \times F_{il} \times F_{amb} \times F_{tl} \times 10^{-6}$
	$N_{atea}$	0	Equação (13.6)	$N_{atea} = D_{dat} \times S_{eqa} \times F_{lea} \times F_{tl} \times 10^{-6}$
Linha telecom	$N_{sls}$	0	Equação (13.9)	$N_{sls} = D_{dat} \times S_{eql} \times F_{il} \times F_{amb} \times F_{tl} \times 10^{-6}$
	$N_{slsp}$	0	Equação (13.11)	$N_{slsp} = D_{dat} \times S_{eqp} \times F_{lea} \times F_{tl} \times 10^{-6}$
	$N_{ateas}$	0	Equação (13.6)	$N_{ateas} = D_{dat} \times S_{eqa} \times F_{lea} \times F_{tl} \times 10^{-6}$

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a$$

$$N_{ate} = 0,0841/\text{ano (Tabela 13.31)}$$

$$P_a = P_{ta} \times P_b = 1 \times 1 = 1$$

$$P_{ta} = 1 \text{ (Tabela 13.26)}$$

$$P_b = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

De acordo com a Equação (13.21), tem-se:

$$L_a = F_t \times L_t \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 10^{-3} \times 10^{-2} \times 0,0084 = 0,084 \times 10^{-6}$$

$$F_t = 10^{-3} \text{ (Tabela 13.26)}$$

$$L_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.26)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,0084 \text{ (Tabela 12.26)}$$

Logo,  $R_a$  vale:

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a = 0,0841 \times 1 \times 0,084 \times 10^{-6} = 0,0071 \times 10^{-6}$$

Obs.: os valores de  $R_a$ , bem como os demais valores que constarão da Tabela 13.32, serão divididos pela constante  $10^{-5}$  para melhor visualização desses valores. Durante a análise de risco, os valores da Tabela 13.32 serão multiplicados pela mesma constante.

$$R_a = \frac{0,0071 \times 10^{-6}}{10^{-5}} = 0,00071$$

Riscos relativos à zona Z2

- Dano D1: ferimentos a seres vivos devido a choque elétrico

\* Cálculo de  $R_a$ : Equação (13.34)

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a$$

$$N_{ate} = 0,0841/\text{ano (Tabela 13.31)}$$

$$P_a = P_{ta} \times P_b = 1 \times 1 = 1$$

$$P_{ta} = 1 \text{ (Tabela 13.27)}$$

$$P_b = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

De acordo com a Equação (13.21), temos:

$$L_a = F_t \times L_t \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 10^{-2} \times 10^{-2} \times 0,0133 = 0,0133 \times 10^{-4}$$

$$F_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.27);}$$

$$L_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.27);}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,0133 \text{ (Tabela 13.27).}$$

Logo,  $R_a$  vale:

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a = 0,0841 \times 0,0133 \times 10^{-4} = 0,0113 \times 10^{-5}$$

$$R_a = \frac{0,0113 \times 10^{-5}}{10^{-5}} = 0,0113$$

Riscos relativos à zona Z3

- Dano D1: ferimentos a seres vivos devido a choque elétrico

\* Cálculo de  $R_a$ : Equação (13.34)

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a$$

$$N_{ate} = 0,0841/\text{ano (Tabela 13.31)}$$

$$P_a = P_{ta} \times P_b = 1 \times 1 = 1$$

$$P_{ta} = 1 \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$P_b = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

De acordo com a Equação (13.21), tem-se:

$$L_a = F_t \times L_t \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 10^{-2} \times 10^{-2} \times 0,5856 = 0,5856 \times 10^{-4}$$

$$F_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$L_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,5856 \text{ (Tabela 13.28).}$$

Logo,  $R_a$  vale:

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a = 0,0841 \times 1 \times 0,5856 \times 10^{-4} = 0,049248 \times 10^{-4} = 0,4927 \times 10^{-5}$$

$$R_a = \frac{0,4927 \times 10^{-5}}{10^{-5}} = 0,4927$$

\* Cálculo de  $R_d$ : Equação (13.38)

$$R_d = R_{ule} + R_{uls}$$

Para a linha de energia,  $R_{ule}$  vale:

$$R_{ule} = (N_{sle} + N_{atea}) \times P_u \times L_u$$

$$N_{sle} = 0,0307 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$N_{atea} = 0$$

De acordo com a Equação (13.17), temos:

$$P_u = P_{tu} \times P_{eb} \times P_{ld} \times P_{lba} = 1 \times 1 \times 1 \times 1 = 1$$

$$P_{tu} = 1 \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$P_{eb} = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$P_{ld} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

$$F_{lba} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

De acordo com a Equação (13.21), temos:

$$L_u = F_t \times L_t \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 10^{-2} \times 10^{-2} \times 0,5856 = 0,5856 \times 10^{-4}$$

$$F_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$L_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,5856 \text{ (Tabela 13.28)}$$

Logo,  $R_{ule}$  vale:

$$R_{ule} = (N_{sle} + N_{atea}) \times P_u \times L_u = (0,0307 + 0) \times 1 \times 0,5856 \times 10^{-4} = 0,1807 \times 10^{-5}$$

$$R_{ule} = \frac{0,1807 \times 10^{-5}}{10^{-5}} = 0,1807$$

Para a linha de sinal,  $R_{uls}$  vale:

$$R_{uls} = (N_{sls} + N_{atea}) \times P_u \times L_u$$

$$N_{sls} = 0$$

$$N_{atea} = 0$$

Logo,  $R_{uls} = 0$

Assim, o valor de  $R_u$  vale.

$$R_u = R_{ule} + R_{uls} = 0,1807 + 0 = 0,1807$$

Dano D2: danos físicos

\* Cálculo de ( $R_b$ ): Equação (13.35)

$$R_b = N_{ate} \times P_b \times L_b$$

$$N_{ate} = 0,0841/\text{ano (Tabela 13.31)}$$

$$P_b = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

De acordo com a Equação (13.30), temos:

$$L_b = F_p \times F_f \times F_z \times L_f \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,5 \times 10^{-1} \times 5 \times 2 \times 10^{-2} \times 0,5856 = 2,9280 \times 10^{-3}$$

$$F_p = 0,5 \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$F_f = 10^{-1} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$F_z = 5 \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$L_f = 2 \times 10^{-2} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,5856 \text{ (Tabela 13.28)}$$

Logo,  $R_b$  vale:

$$R_b = N_{ate} \times P_b \times L_b = 0,0841 \times 1 \times 2,9280 \times 10^{-3} = 0,2462 \times 10^{-3}$$

$$R_b = \frac{0,2462 \times 10^{-3}}{10^{-5}} = 24,6200$$

\* Cálculo de  $R_v$ : Equação (13.39)

$$R_v = R_{vle} + R_{vls}$$

Para a linha elétrica,  $R_{vle}$  vale:

$$R_{vle} = (N_{sle} + N_{atea}) \times P_v \times L_v$$

$$N_{sle} = 0,0307 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$N_{atea} = 0 \text{ (Tabela 13.31)}$$

De acordo com a Equação (13.18), tem-se:

$$P_v = P_{eb} \times P_{lb} \times P_{iba} = 1 \times 1 \times 1 = 1$$

$$P_{eb} = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$P_{lb} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

$$P_{iba} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

De acordo com a Equação (13.22), temos:

$$L_v = F_p \times F_f \times F_z \times L_f \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,5 \times 10^{-1} \times 5 \times 2 \times 10^{-2} \times 0,5856 = 0,29228 \times 10^{-4}$$

$$F_p = 0,5 \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$F_f = 10^{-1} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$F_z = 5 \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$L_f = 2 \times 10^{-2} \text{ (Tabela 13.28)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,5856 \text{ (Tabela 13.28).}$$

Logo,  $R_{vle}$  vale:

$$R_{vle} = (N_{sle} + N_{atea}) \times P_v \times L_v = (0,0307 + 0) \times 1 \times 0,29228 \times 10^{-4} = 0,8970 \times 10^{-6}$$

$$R_{vle} = \frac{0,8970 \times 10^{-6}}{10^{-5}} = 0,0897$$

Para a linha de sinal,  $R_{vls}$  vale:

$$R_{vls} = (N_{sls} + N_{atea}) \times P_v \times L_v$$

$$N_{sls} = 0 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$N_{atea} = 0$$

Logo,  $R_{vls} = 0$

Dessa forma, o valor de  $R_v$  vale:

$$R_v = R_{vle} + R_{vls} = 0,0897 + 0 = 0,0897$$

Riscos relativos à zona Z4

- Dano D1: ferimentos a seres vivos devido a choque elétrico

\* Cálculo de  $R_a$ : Equação (13.34)

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a$$

$$N_{ate} = 0,0841/\text{ano} \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$P_{ta} = 1 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$P_b = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

De acordo com a Equação (13.21), tem-se:

$$L_a = F_t \times L_t \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 10^{-3} \times 10^{-2} \times 0,05856 = 0,5856 \times 10^{-6}$$

$$F_t = 10^{-3} \text{ (Tabela 13.29);}$$

$$L_t = 10^2 \text{ (Tabela 13.29);}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,05019 \text{ (Tabela 13.29).}$$

Logo,  $R_a$  vale:

$$R_a = N_{ate} \times P_a \times L_a = 0,0841 \times 1 \times 0,05019 \times 10^{-6} = 0,4220 \times 10^{-8}$$

$$R_a = \frac{0,4220 \times 10^{-8}}{10^{-5}} = 0,00042$$

\* Cálculo de  $R_u$ : Equação (13.38)

$$R_u = R_{ule} \times R_{uls}$$

Para a linha de energia,  $R_{ule}$  vale:

$$R_{ule} = (N_{sle} + N_{atea}) \times P_u \times L_u$$

$$N_{sle} = 0,0307 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$N_{atea} = 0 \text{ (Tabela 13.31)}$$

De acordo com a Equação (13.17), temos:

$$P_u = P_{tu} \times P_{eb} \times P_{ld} \times F_{iba} = 1 \times 1 \times 1 \times 1 = 1$$

$$P_{tu} = 1 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$P_{eb} = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$P_{ld} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

$$F_{iba} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

De acordo com a Equação (13.21), temos:

$$L_u = F_t \times L_t \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 10^{-3} \times 10^{-2} \times 0,05019 = 0,05019 \times 10^{-5}$$

$$F_t = 10^{-3} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$L_t = 10^{-2} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,05019 \text{ (Tabela 13.29).}$$

Logo,  $R_{ule}$  vale:

$$R_{ule} = (N_{sle} + N_{atea}) \times P_u \times L_u = (0,0307 + 0) \times 1 \times 0,05019 \times 10^{-5} = 0,15408 \times 10^{-7}$$

$$R_{ule} = \frac{0,15408 \times 10^{-7}}{10^{-5}} = 0,00154$$

Para a linha de sinal,  $R_{uls}$  vale:

$$R_{uls} = (N_{sls} + N_{atea}) \times P_u \times L_u$$

$$N_{sls} = 0 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$N_{atea} = 0 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$R_{uls} = (N_{sls} + N_{atea}) \times P_u \times L_u = (0 + 0) \times P_u \times L_u = 0$$

Logo,  $R_u$  vale:

$$R_u = R_{ule} + R_{uls} = 0,00154 + 0,0 = 0,00154$$

Dano D2: danos físicos

\* Cálculo de  $R_b$ : Equação (13.35)

$$R_b = N_{ate} \times P_b \times L_b$$

$$N_{ate} = 0,0841/\text{ano (Tabela 13.31)}$$

$$P_b = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

De acordo com a Equação (13.22):

$$L_b = F_p \times F_f \times F_z \times L_f \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 1 \times 10^{-3} \times 2 \times 2 \times 10^{-2} \times 0,05019 = 0,20076 \times 10^{-5}$$

$$F_p = 1 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$F_f = 10^{-3} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$F_z = 2 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$L_f = 2 \times 10^{-2} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,05019 \text{ (Tabela 13.29).}$$

Logo,  $R_b$  vale:

$$R_b = N_{ate} \times P_b \times L_b = 0,0841 \times 1 \times 0,20076 \times 10^{-5} = 0,01688 \times 10^{-5}$$

$$R_b = \frac{0,01688 \times 10^{-5}}{10^{-5}} = 0,01688$$

\* Cálculo de  $R_v$ : Equação (13.39)

$$R_v = R_{vle} + R_{vls}$$

Para a linha elétrica,  $R_{vle}$  vale:

$$R_{vle} = (N_{sle} + N_{atea}) \times P_v \times L_v$$

$$N_{sle} = 0,0307 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$N_{atea} = 0 \text{ (Tabela 13.31)}$$

$$R_{vle} = R_{vle} + R_{vls} = 0,0307 + 0 = 0,0307$$

De acordo com a Equação (13.18), tem-se:

$$P_v = P_{eb} \times P_{lb} \times F_{iba} = 1 \times 1 \times 1 = 1$$

$$P_{eb} = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$P_{ld} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

$$F_{iba} = 1 \text{ (Tabela 13.24)}$$

De acordo com a Equação (13.22), temos:

$$L_v = F_p \times F_f \times F_z \times L_f \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 1 \times 10^{-3} \times 2 \times 2 \times 10^{-2} \times 0,05019 = 0,20076 \times 10^{-5}$$

$$F_p = 1 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$F_f = 10^{-3} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$F_z = 2 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$L_f = 2 \times 10^{-2} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,05019 \text{ (Tabela 13.29).}$$

Logo,  $R_{vle}$  vale:

$$R_{vle} = (N_{sie} + N_{atea}) \times P_v \times L_v = (0,0307 + 0) \times 1 \times 0,20076 \times 10^{-5} = 0,00616 \times 10^{-5}$$

$$R_{vle} = \frac{0,00616 \times 10^{-5}}{10^{-5}} = 0,00616$$

Para a linha de sinal,  $R_{vls}$  vale:

De acordo com a Equação (13.39), tem-se:

$$R_{vls} = (N_{sls} + N_{atea}) \times P_v \times L_v$$

De acordo com a Equação (13.18), tem-se:

$$P_v = P_{eb} \times P_{lb} \times P_{iba} = 1 \times 0,4 \times 1 = 0,4$$

$$P_{eb} = 1 \text{ (Tabela 13.23)}$$

$$P_{ld} = 0,4 \text{ (Tabela 13.25)}$$

$$F_{iba} = 1 \text{ (Tabela 13.25)}$$

De acordo com a Equação (13.22), temos:

$$L_v = F_p \times F_f \times F_z \times L_f \times \frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 1 \times 10^{-3} \times 2 \times 2 \times 10^{-2} \times 0,05019 = 0,20076 \times 10^{-5}$$

$$F_p = 1 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$F_f = 10^{-3} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$F_z = 2 \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$L_f = 2 \times 10^{-2} \text{ (Tabela 13.29)}$$

$$\frac{N_z}{N_t} \times \frac{T_z}{8.760} = 0,05019 \text{ (Tabela 13.29).}$$

Logo,  $R_{vle}$  vale:

$$R_{vls} = N_{sls} + N_{atea} \times P_v \times L_v = 0,0307 + 0 \times 0,4 \times 0,20076 \times 10^{-5} = 0,00247 \times 10^{-5}$$

$$R_{vls} = \frac{0,00247 \times 10^{-5}}{10^{-5}} = 0,00247$$

Logo,  $R_v$  vale:

$$R_v = R_{vle} + R_{vls} = 0,00616 + 0,00247 = 0,01008$$

De acordo com a Tabela 13.32, o valor de  $R_1 = 25,24825 \times 10^{-5}$ . Como o valor tolerável é  $R_t = 10^{-5}$ , temos:

$$R_1 > R_t$$

portanto, há necessidade de se projetar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para edificação.

**Tabela 13.32** Riscos do tipo  $R_1$  para estruturas não protegidas (valores  $\times 10^{-5}$ )

Parâmetros de entrada	Símbolo	Zonas				Estrutura
		Z1	Z2	Z3	Z4	
D1: ferimentos	$R_a$	0,00071	0,01130	0,49270	0,00049	0,50520
	$R_u = \frac{R_u}{p} + \frac{R_u}{t}$	-	-	0,00179	0,00179	0,00358
D2: danos físicos	$R_b$	-	-	24,62000	0,01969	24,63969
	$R_v = \frac{R_v}{p} + \frac{R_v}{t}$	-	-	0,08970	0,01008	0,09977
Total de $R_1$		0,00071	0,01130	25,20419	0,03205	25,24825
Tolerável		$R_1 > R_t$				$R_t = 1$

## 13.5 Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)

São projetados com a finalidade de interceptar as descargas atmosféricas que atingem diretamente a parte superior da estrutura ou suas laterais, permitindo que a corrente elétrica decorrente flua para a terra sem ocasionar transitórios perigosos à vida e ao patrimônio, centelhamento e efeitos térmicos e mecânicos danosos à estrutura.

Os SPDA podem ser projetados e construídos utilizando materiais *condutores naturais*, isto é, partes integrantes da estrutura que não podem ser alteradas, como armaduras de pilares e fundação, ou materiais *condutores não naturais*, isto é, aqueles que não integram a estrutura, como cabos de cobre, alumínio, aço, aço cobreado etc., e que foram ali instalados com a finalidade única de proteger a estrutura contra descargas atmosféricas.

Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, de forma geral, são constituídos de três subsistemas bem definidos, porém intimamente interligados:

#### **a) Subsistemas de captação**

São os elementos condutores normalmente expostos localizados na parte mais elevada da edificação e responsáveis pelo contato direto com as descargas atmosféricas.

Os captosres podem ser classificados segundo sua natureza construtiva:

- Captosres naturais

São constituídos de elementos condutores expostos, normalmente partes integrantes da edificação que se quer proteger. As coberturas metálicas das estruturas, mastros ou quaisquer elementos condutores integrados à edificação expostos acima das coberturas, como tubos e tanques metálicos etc., são exemplos de captosres naturais.

- Captosres não naturais

São constituídos de elementos condutores expostos, normalmente

instalados sobre a cobertura e a lateral das edificações, cuja finalidade é estabelecer o contato direto com as descargas atmosféricas. São exemplos de captosres não naturais os condutores de cobre nus expostos em forma de malha e os captosres de haste.

## **b) Subsistemas de descida**

São elementos condutores expostos ou não que permitem a continuidade elétrica entre os captosres e o subsistema de aterramento.

Os subsistemas de descida podem ser classificados segundo sua natureza construtiva.

- Subsistemas de descida naturais

São elementos condutores, normalmente partes integrantes da edificação, que, por sua natureza condutiva, permitem escoar para o subsistema de aterramento as correntes elétricas resultantes das descargas atmosféricas. São exemplos de subsistemas de descida naturais os postes metálicos, as torres metálicas de comunicação (rádio e TV), as armaduras de aço interligadas dos pilares das estruturas, devidamente interligadas para permitir a equipotencialização, além de outros meios compatíveis.

- Subsistemas de descida não naturais

São constituídos de elementos condutores expostos ou não, dedicados exclusivamente à condução ao subsistema de aterramento da edificação das correntes elétricas dos raios que atingem os captosres. São exemplos de subsistemas de descida não naturais os condutores de cobre nus instalados sobre as laterais das edificações ou nelas embutidos, barras de ferro de construção ou similar instaladas no interior dos pilares das edificações para uso exclusivo do sistema de proteção contra descargas atmosféricas etc.

## **c) Subsistemas de aterramento**

São constituídos de elementos condutores enterrados ou embutidos nas fundações das edificações e responsáveis pela dispersão das correntes elétricas no solo.

Os subsistemas de aterramento podem ser classificados segundo sua natureza construtiva.

- Subsistemas de aterramento naturais

São constituídos de elementos metálicos embutidos nas fundações das edificações e parte integrante destas. São exemplos de subsistemas de aterramento naturais a armação das fundações de concreto armado das edificações, a armação das bases de torre de aerogeradores, as estruturas de concreto armado enterradas e outros meios equivalentes.

- Subsistemas de aterramento não naturais

São constituídos de elementos condutores enterrados horizontal ou verticalmente que dispersam as correntes elétricas no solo. São exemplos de subsistemas de aterramento não naturais os condutores de cobre nus diretamente enterrados em torno da edificação e hastes de terra com cobertura eletrolítica de cobre enterradas verticalmente, interligadas aos condutores horizontais e verticais.

Os materiais empregados nos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas são: (i) cobre: maciço, ou encordado e utilizados como cobertura; (ii) aço galvanizado a quente: maciço ou encordado; (iii) aço inoxidável: maciço ou encordado; (iv) aço cobreado: maciço ou encordado; e (v) alumínio: maciço ou encordado.

Esses materiais normalmente podem ser instalados nos meios ambientes a seguir considerados, devendo-se, no entanto, observar suas limitações devido principalmente a sua corrosão e a sua destruição por meio galvânico:

- Ao ar livre: todos, com exceção do alumínio em áreas de elevada dispersão de névoa salina.

- Embutidos na terra: todos, com exceção do alumínio.
- Embutidos no concreto simples ou reboco: todos, com exceção do alumínio.
- Embutidos no concreto armado: todos, com exceção do alumínio e do cobre.

Os projetos de um sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas podem ser definidos, de forma geral, por dois diferentes tipos de construção, ou seja:

### **13.5.1 Estruturas protegidas por elementos naturais**

Podem ser assim denominadas as estruturas que utilizam como proteção contra descargas atmosféricas quaisquer elementos condutores integrantes das mesmas para capturar os raios e conduzir as correntes de descarga atmosféricas até o subsistema de aterramento para sua dissipação na terra.

#### **13.5.1.1 Subsistema de captadores naturais**

O subsistema de captadores naturais é constituído por elementos condutores expostos que podem ser atingidos diretamente por descargas atmosféricas:

- Coberturas metálicas de edificações.
- Mastros ou outros elementos metálicos cuja extremidade se sobressai à cobertura.
- Calhas metálicas instaladas na periferia das edificações.
- Estruturas metálicas de suporte de fachadas envidraçadas construídas acima de 60 m do solo.
- Tubulações metálicas e tanques contendo misturas explosivas ou combustíveis construídos de material com espessura não inferior aos valores indicados na [Tabela 13.33](#) desde que todas as suas partes constituídas sejam equipotencializadas.

- Deve haver continuidade elétrica entre os diversos componentes dos captosres.
- Não devem ser considerados protegidos os elementos não metálicos e os elementos metálicos salientes à superfície protegida pelos captosres.
- Os diâmetros e as seções dos condutores metálicos mais utilizados em um SPDA devem ter as dimensões indicadas na [Tabela 13.33](#).
- Podem ser utilizadas chapas metálicas como sistema captor, o que é muito comum em galpões industriais. Chapas de alumínio são as mais utilizadas para cobertura desse tipo de edificação. A [Tabela 13.34](#) estabelece o material e a correspondente espessura da chapa para serviço de captação de descargas atmosféricas.

**Tabela 13.33** Seção mínima dos condutores de captação, hastes captoras e condutores de descida (reprodução parcial da NBR 5419-3:2015)

Material	Configuração	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	Comentários
	Fita maciça	50	Espessura mínima de 2,5 mm
Aço galvanizado a quente	Arredondado maciço	50	Diâmetro de 8 mm
	Encordado	50	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm
Cobre	Fita maciça	35	Espessura de 1,75 mm
	Encordado	35	Diâmetro de cada fio da cordoalha 2,5 mm

Alumínio	Fita maciça	70	Espessura de 3 mm
	Arredondado maciço	70	Diâmetro de 9,5 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,5 mm
Aço inox	Fita maciça	50	Espessura de 2 mm
	Arredondado maciço	50	Diâmetro de 8 mm
	Encordoado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 1,7 mm
Aço cobreado IACS 30%	Arredondado maciço	50	Diâmetro de 8 mm
	Encordoado	50	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3 mm

**Tabela 13.34** Espessuras mínimas das chapas metálicas ou tubulações metálicas dos subsistemas de captação: classes do SPDA de I a IV (reprodução parcial da NBR 5419-3:2015)

Material	Espessura (mm)	
	$E(1)$	$E(2)$
Aço inoxidável galvanizado a quente	4	0,5
Cobre	5	0,5
Alumínio	7	0,65

(1) O valor de  $E$  previne perfuração, pontos quentes ou ignição.

(2) O valor de  $E'$  somente para chapas metálicas, se não for importante prevenir a perfuração, pontos quentes ou problemas com ignição.

### 13.5.1.2 *Subsistema de descida natural*

O subsistema de descida natural é constituído de elementos metálicos eletricamente contínuos que interligam o subsistema de captosres à malha de aterramento na base da edificação.

Constituem-se ainda condutores de descida naturais as estruturas metálicas, tais como postes, torres e similares, bem como as armaduras de aço dos pilares de concreto da edificação que têm continuidade até a armadura da base.

O subsistema de descida natural deve obedecer às seguintes prescrições:

- Os pilares metálicos das estruturas de concreto podem ser empregados como condutores de descida, desde que apresentem continuidade elétrica.
- As instalações metálicas das estruturas com comprovada continuidade elétrica podem ser utilizadas como condutores de descida naturais, respeitando-se as seções mínimas dos condutores de descida definidas na [Tabela 13.33](#).
- As armações de aço interligadas das estruturas de concreto armado dos pilares das edificações podem ser utilizadas como condutores de descida, desde que pelo menos 50 % dos cruzamentos das barras verticais com as horizontais sejam firmemente amarradas com arame torcido, e as barras verticais sejam soldadas ou sobrepostas por, no mínimo, 20 vezes seu diâmetro e firmemente amarradas com arame torcido, devendo haver continuidade elétrica comprovada. Neste caso, não há necessidade da utilização de anéis condutores intermediários.
- As tubulações contendo misturas inflamáveis ou explosivas podem ser utilizadas como condutores de descida naturais, desde que as gaxetas de acoplamento dos flanges sejam metálicas, apropriadamente conectadas, se comprove a continuidade elétrica da

mesma e as posturas locais permitam seu uso como tal.

- Podem ser embutidos em cada pilar da estrutura da edificação condutores de descida específicos (cabo de aço galvanizado, barra chata ou redonda de aço), instalados paralelamente às barras redondas estruturais dos pilares, com continuidade elétrica assegurada por solda ou por conexão mecânica do tipo aparafusado ou à compressão. O condutor de descida deve fazer contato direto com a armadura da base de concreto, através de uma conexão que assegure a continuidade do sistema de descarga atmosférica.
- Pode-se utilizar também a armação de aço embutida em concreto armado pré-fabricado, desde que se assegure a continuidade da conexão e a resistência elétrica medida no valor inferior a  $1\Omega$ .
- Não pode ser utilizada como condutor de descida armação de aço de concreto protendido, a não ser que sejam atendidas algumas condições normativas e haja concordância do construtor.
- Podem ser utilizadas chapas de alumínio, algumas vezes empregadas na cobertura das laterais de galpões industriais, desde que sua espessura atenda a [Tabela 13.34](#).

### **13.5.1.3 Subsistema de aterramento natural**

É constituído de elementos metálicos instalados vertical ou horizontalmente e responsáveis pela dispersão da corrente elétrica de descarga atmosférica no solo.

Podem ser utilizadas como eletrodos de aterramento naturais as armações de aço das fundações.

O dimensionamento e a instalação dos eletrodos constituídos pelas armaduras de aço embutidas nas fundações das estruturas devem atender às seguintes prescrições:

- As armações de aço embutidas nas fundações das estruturas de

concreto armado podem ser utilizadas como eletrodo de aterramento, desde que sejam amarradas com arame torcido em cerca de 50 % de seus cruzamentos ou simplesmente soldadas e se assegure a continuidade elétrica.

- As barras horizontais das armações de aço das fundações utilizadas como condutor de aterramento devem ser soldadas ou sobrepostas por, no mínimo, 20 vezes seu diâmetro e firmemente amarradas com arame torcido e apresentem comprovada continuidade elétrica.
- Estruturas metálicas subterrâneas contidas na área da edificação podem ser utilizadas como condutor de aterramento, desde que apresentem continuidade elétrica.
- As armaduras de aço das fundações devem ser interligadas com as armaduras de aço dos pilares da estrutura, utilizadas como condutores de descida naturais, devendo-se assegurar continuidade elétrica entre as referidas armaduras.
- A camada de concreto que envolve os eletrodos anteriormente referidos deve ter, no mínimo, 5 cm de espessura.

### **13.5.2 Estruturas protegidas por elementos não naturais**

Podem ser assim denominadas as estruturas que utilizam como proteção contra descargas atmosféricas elementos condutores específicos na função de captação dos raios, descida das correntes de descarga e aterramento para a dissipação dessas correntes.

Os materiais utilizados nas estruturas protegidas por elementos não naturais devem satisfazer às seguintes condições:

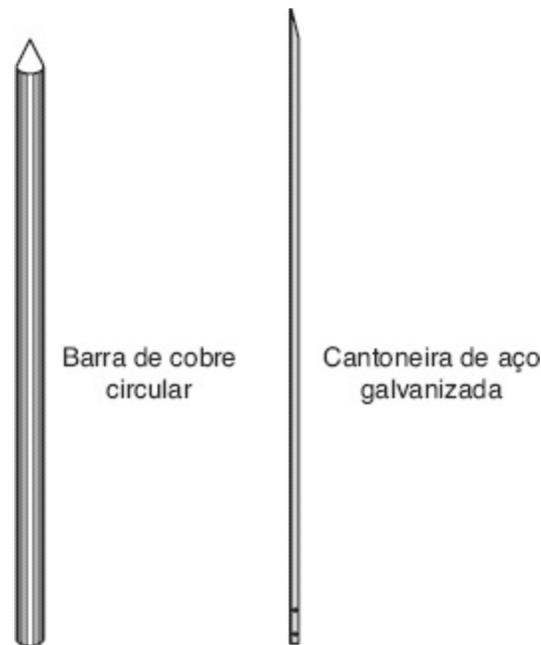
- Suportar os efeitos térmicos e eletrodinâmicos resultantes das correntes de descarga atmosféricas.
- Devem ser condutores de cobre, alumínio, aço cobreado IACS 30 %, aço galvanizado a quente e aço inoxidável.

### 13.5.2.1 *Subsistema de captação não natural*

O subsistema de captação não natural é constituído dos seguintes elementos metálicos:

- Captadores de haste

Os captadores de haste são elementos metálicos especialmente construídos para receber o impacto das descargas atmosféricas. São normalmente instalados na parte superior das edificações, nos projetos de SPDA que utilizam o método do ângulo de proteção ou de Franklin. A [Figura 13.9](#) mostra dois captadores de haste simples empregados muito frequentemente na proteção contra descargas atmosféricas de subestações ao tempo. Já os captadores do tipo Franklin são constituídos, em geral, de quatro elementos em forma de ponta, conforme mostrado na [Figura 13.10](#).



**Figura 13.9** Captor de haste de ponta.

- O captor de haste necessita de um suporte metálico ou não, denominado mastro, ao qual é fixado na extremidade superior.

- O suporte metálico pode ser constituído de um tubo de cobre de comprimento entre 3 e 5 m e 55 mm de diâmetro. Deve ser fixado firmemente a uma base metálica plana fixada no topo da estrutura a proteger. Além de suportar o captor, neste caso, a função do mastro é servir de condutor metálico.
- Também poderá ser utilizada como suporte uma haste vertical não metálica. Neste caso, deve-se conectar a parte superior do subsistema de descida diretamente ao captor.
- Minicaptos de haste

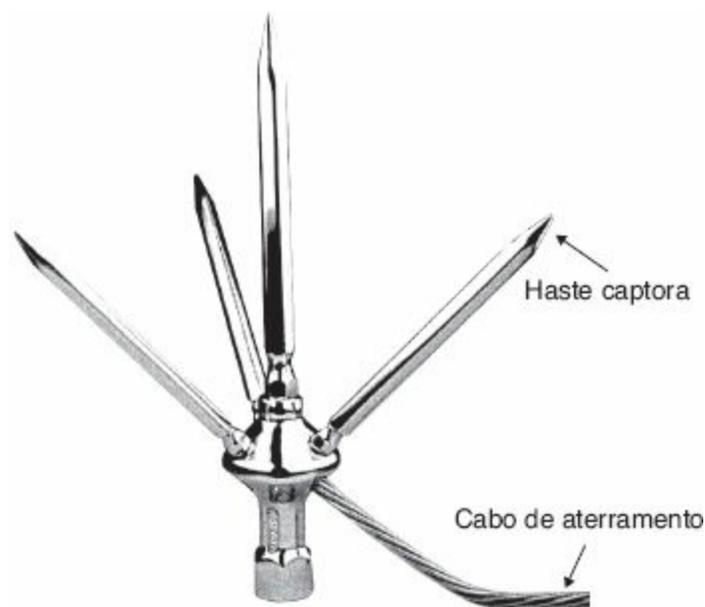
São elementos metálicos, em forma de haste de pequeno comprimento (entre 20 e 30 cm), conectados às malhas captoras instaladas na parte superior das edificações, dimensionados nos projetos de SPDA. Essas hastes são utilizadas para evitar que o centelhamento devido ao impacto das descargas atmosféricas sobre o sistema de condutores horizontais produza danos no material de cobertura da edificação a ser protegida.

- Subsistema de captação de condutores em malha

É constituído de cabos condutores de cobre nus, alumínio, aço cobreado IACS 30 %, aço galvanizado a quente e aço inoxidável, conectados em forma de malha e instalados na parte superior das edificações. A seção dos condutores horizontais que formam a malha captora é dada na [Tabela 13.33](#).

Se a cobertura da edificação for constituída de material não combustível, os condutores de captação podem ser fixados diretamente na estrutura da cobertura. Entretanto, no caso de a cobertura ser constituída de material combustível, devem-se fixar os condutores a uma distância de 15 cm acima da cobertura.

Se forem utilizados captos de condutores de cobre encordados, a seção mínima deverá ser de 35 mm<sup>2</sup>, de acordo com a [Tabela 13.33](#).



**Figura 13.10** Captor do tipo Franklin.

Quando o subsistema captor for constituído de chapas metálicas, sua espessura não poderá ser inferior aos valores indicados na [Tabela 13.34](#).

Quando o subsistema captor é constituído de uma ou mais hastes fixadas em mastros separados não metálicos, sem conexão com a armadura da cobertura (SPDA isolado), deve-se utilizar um condutor de descida para cada haste. Se o mastro é metálico e está interligado à armadura da edificação, não há necessidade de se utilizar condutor de descida.

**Tabela 13.35** Espaçamentos típicos entre os condutores de descida e entre os anéis condutores, de acordo com a classe do SPDA (NBR 5419-3:2015)

Classe do SPDA	Espaçamento em m
I	10
II	15
III	15
IV	20

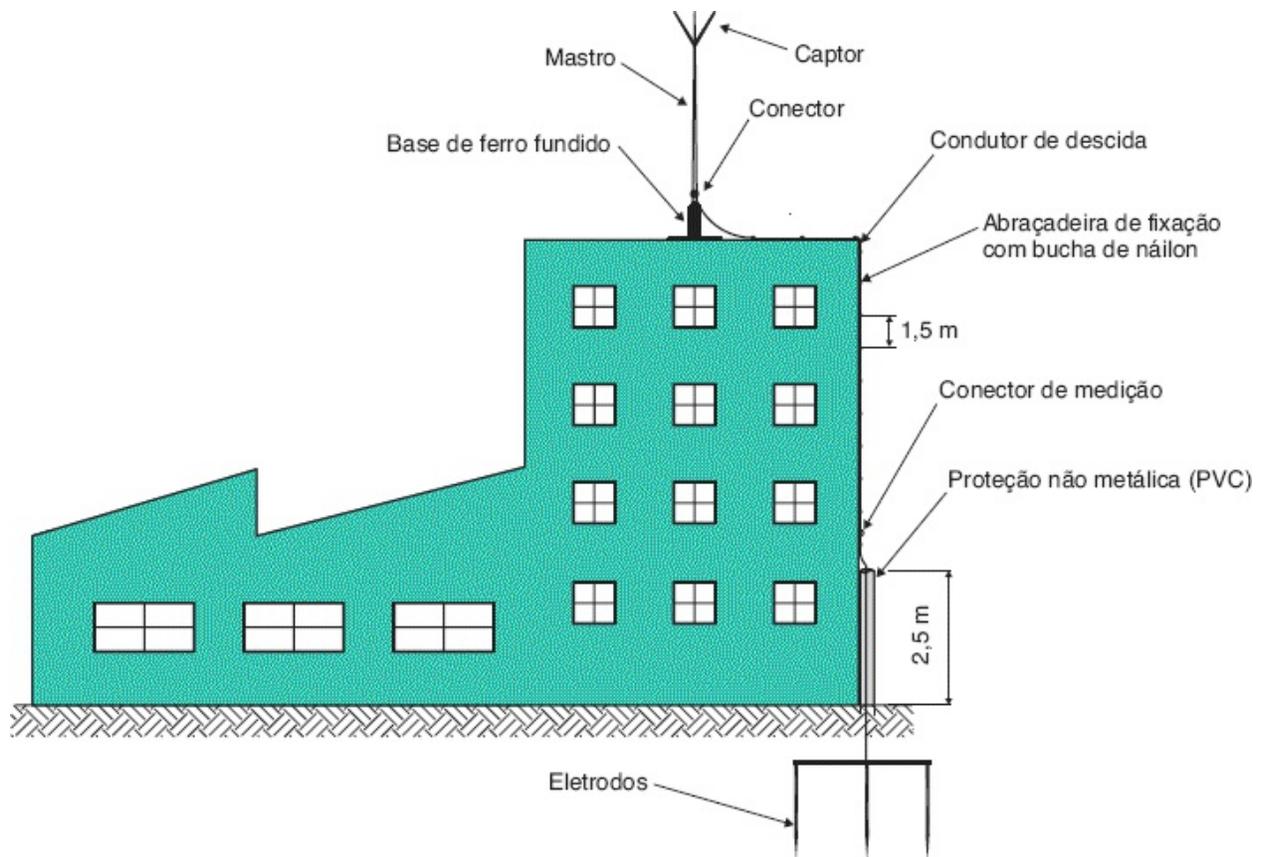
---

### **13.5.2.2 *Subsistema de descida não natural***

O sistema de descida não natural é constituído de condutores de cobre nus, alumínio, aço cobreado IACS 30 %, aço galvanizado a quente e aço inoxidável, cujas seções são dadas na [Tabela 13.33](#).

Deve atender às seguintes condições:

- Se forem utilizados condutores de cobre encordoados, a seção mínima deverá ser de 35 mm<sup>2</sup>, de acordo com a [Tabela 13.33](#).
- Os condutores de descida não naturais devem ser distribuídos ao longo do perímetro do volume a proteger, obedecendo aos afastamentos máximos previstos na [Tabela 13.35](#), devendo-se adotar no mínimo dois condutores de descida.
- Os condutores de descida devem ser instalados a uma distância mínima de 50 cm de portas, janelas e outras aberturas.



**Figura 13.11** Elementos de um SPDA em estruturas que utilizam materiais não combustíveis.

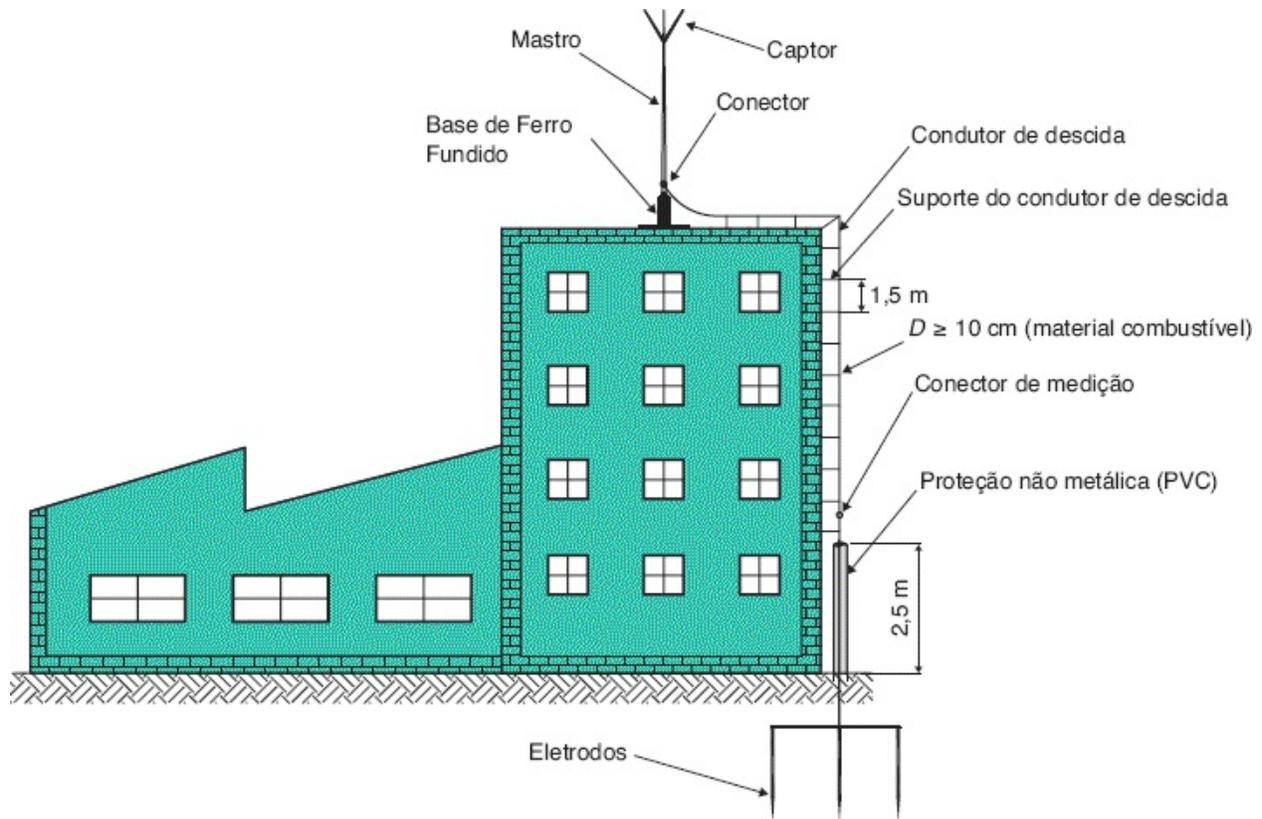
- Os condutores de descida podem ser instalados na superfície para SPDA não isolado, conforme a [Figura 13.11](#), ou no interior de parede, se não for constituída de material inflamável e a elevação de temperatura decorrente da passagem da corrente elétrica não resultar em risco para o material da referida parede.
- Os suportes metálicos dos condutores de descida do SPDA isolado não devem estar em contato com a parede de material inflamável cuja elevação de temperatura decorrente da passagem da corrente elétrica resultar em risco para o material da referida parede, devendo-se utilizar um suporte metálico para manter uma distância de 10 cm entre o condutor de descida e o volume a proteger, conforme mostrado na [Figura 13.12](#).
- Sempre que possível, deve-se instalar um condutor de descida em

cada canto saliente da estrutura, excluído da quantidade de descidas determinada pelas distâncias indicadas na [Tabela 13.35](#).

- Recomenda-se que os usuários das edificações evitem utilizar equipamentos de tecnologia da informação próximos aos condutores de descida.
- Os condutores de descida não devem ser instalados, em princípio, no interior de calhas ou tubos de águas pluviais, a fim de evitar corrosão, mesmo que o condutor seja isolado.
- Os condutores de descida externos devem ser protegidos contra danos mecânicos até, no mínimo, 2,5 m acima do nível do solo, conforme as [Figuras 13.11 e 13.12](#). A proteção deve ser feita por eletroduto rígido de PVC ou eletroduto rígido metálico. Quando a proteção mecânica for metálica, o condutor de descida deve ser conectado em ambas as extremidades do eletroduto.
- Os condutores de descida devem ser retilíneos e verticais, de modo a tornar o trajeto o mais curto possível.
- Os condutores de descida, de preferência, não devem conter emendas. Quando necessárias, deve ser utilizada solda exotérmica ou elétrica.
- Para se obter uma melhor uniformidade na distribuição das correntes de descarga atmosférica, devem-se interligar horizontalmente os diversos condutores de descida, a intervalos de 10 a 20 m de altura e ao nível do solo, de acordo com os espaçamentos dados na [Tabela 13.35](#).
- Se forem adotados captadores de haste fixados em mastros separados, não metálicos e não interligados às armaduras, para cada condutor de descida deve ser conectado, no mínimo, um eletrodo de aterramento distinto, radial ou vertical, devendo-se utilizar, no mínimo, dois eletrodos.
- No caso de captadores de SPDA isolado constituídos de condutores

suspensos, deve ser utilizado um condutor de descida para cada suporte.

- Para o caso de captores de SPDA isolado constituindo uma rede de condutores, deve ser utilizado, no mínimo, um condutor de descida em cada suporte de terminação dos condutores.



**Figura 13.12** Elementos de um SPDA em estruturas que utilizam materiais combustíveis nas paredes

- O número dos condutores de descida não pode ser inferior a dois quando o SPDA não for isolado, cujas distâncias entre os condutores estão indicadas na [Tabela 13.35](#), devendo-se sempre buscar um espaçamento o mais uniforme possível.
- Existe baixa probabilidade de ocorrerem descargas atmosféricas nas laterais de estruturas com altura inferior a 60 m. Nas estruturas com altura superior a 60 m, apesar de o risco de impacto lateral das descargas atmosféricas ainda ser baixo, e de efeitos muito inferiores

aos impactos diretos na parte superior da estrutura, devem-se tomar precauções quando há saliências nas paredes externas, como, por exemplo, antenas para captação de sinal de satélite, pois estas podem ser danificadas mesmo com baixos valores de pico de corrente de impacto. Quando há necessidade de se utilizarem captos externos laterais, deve-se optar por condutores de descida em cobre, aço etc., localizados nas arestas verticais das estruturas, desde que não existam condutores metálicos naturais externos como parte integrante da arquitetura da edificação.

- A fixação dos condutores de descida deve obedecer às seguintes distâncias máximas:
  - Condutores flexíveis (cabos e cordoalhas) posicionados horizontalmente: igual ou inferior a 1,0 m;
  - Condutores flexíveis (cabos e cordoalhas) posicionados verticalmente: igual ou inferior a 1,5 m;
  - Condutores rígidos (fitas e barras) posicionados horizontalmente: igual ou inferior a 1,0 m;
  - Condutores rígidos (fitas e barras) posicionados verticalmente: igual ou inferior a 1,5 m.

### **13.5.2.3 *Subsistema de aterramento não natural***

O subsistema de aterramento não natural é constituído pelos seguintes elementos metálicos:

- Eletrodos verticais (hastes de aterramento), que são elementos metálicos especialmente fabricados para utilização em aterramento de sistemas elétricos, incluindo-se os SPDA. Os aspectos construtivos das hastes de aterramento foram estudados no Capítulo 11 deste livro.
- Os eletrodos horizontais devem ser constituídos de condutores

metálicos, cuja seção é dada na [Tabela 13.36](#). Para condutores de cobre, a seção mínima do cabo é de 50 mm<sup>2</sup>.

- Os eletrodos de aterramento não naturais devem ser instalados a uma distância aproximada de 1,0 m das paredes externas e enterrados no mínimo a 50 cm de profundidade.
- O condutor de aterramento deve ser formado por um anel em torno da estrutura, tendo pelo menos 80 % de contato com o solo.
- Os eletrodos verticais devem ser distribuídos uniformemente no perímetro da estrutura.
- O raio médio da área  $R_{ma}$  abrangido pelos condutores de aterramento em anel não pode ser inferior a  $L_1$ , cujos valores estão contidos no gráfico da [Figura 13.13](#). Também podem ser calculados pela Equação (13.42) para SPDA da classe I e pela Equação (13.43) para SPDA da classe II.

$$L_1 = 0,03 \times \rho - 10 \quad (13.42)$$

$$L_1 = 0,02 \times \rho - 11 \quad (13.43)$$

$\rho$  - resistividade do solo, em  $\Omega \cdot m$ .

Os subsistemas de aterramento naturais e não naturais devem atender às seguintes prescrições gerais:

- O subsistema de aterramento deve ser único para os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, sistema de potência e sistema de tecnologia da informação.
- Para assegurar a dispersão das correntes elétricas devido às descargas atmosféricas sem causar sobretensões que possam trazer perigo às pessoas e danos materiais, é mais importante o arranjo e as dimensões da malha de aterramento do que o valor de sua resistência considerada.
- Deve-se perseguir uma resistência de aterramento igual ou inferior a

10  $\Omega$ , com a finalidade de reduzir o processo de centelhamento entre elementos da estrutura a ser protegida e diminuir os valores dos potenciais elétricos produzidos no solo.

- Quando em uma mesma área existirem dois ou mais subsistemas de aterramento, devem-se interligar todos eles por meio de uma ligação equipotencial realizada pela fita trançada de cobre ou, mais comumente, cabo de cobre.
- De preferência, os condutores não devem conter emendas. Quando necessário, deve ser utilizada solda exotérmica. Se se utilizarem conexões mecânicas de pressão, as mesmas devem estar contidas no interior de caixas de inspeção.

### 13.5.3 Ligações equipotenciais

Para evitar riscos de choques elétricos, incêndios e explosão no interior da estrutura a ser protegida, devem-se equalizar os potenciais elétricos interligando todos os elementos condutivos existentes na estrutura e no seu interior.

O SPDA deve ser conectado com os demais sistemas de aterramento, ou seja, com as massas do sistema elétrico, com a armadura metálica das estruturas, com as instalações metálicas e com as massas dos equipamentos de tecnologia da informação, devendo obedecer às seguintes prescrições básicas:

- A equipotencialização dos SPDA externos isolados deve ser realizada ao nível do solo.
- A equipotencialização dos SPDA externos não isolados deve ser realizada na base da estrutura ao nível do solo.
- Os condutores de ligação equipotencial devem ser conectados a uma barra de ligação equipotencial instalada no subsolo ou próxima ao nível do solo ou, ainda, próximo ao Quadro Geral de BT, de forma a

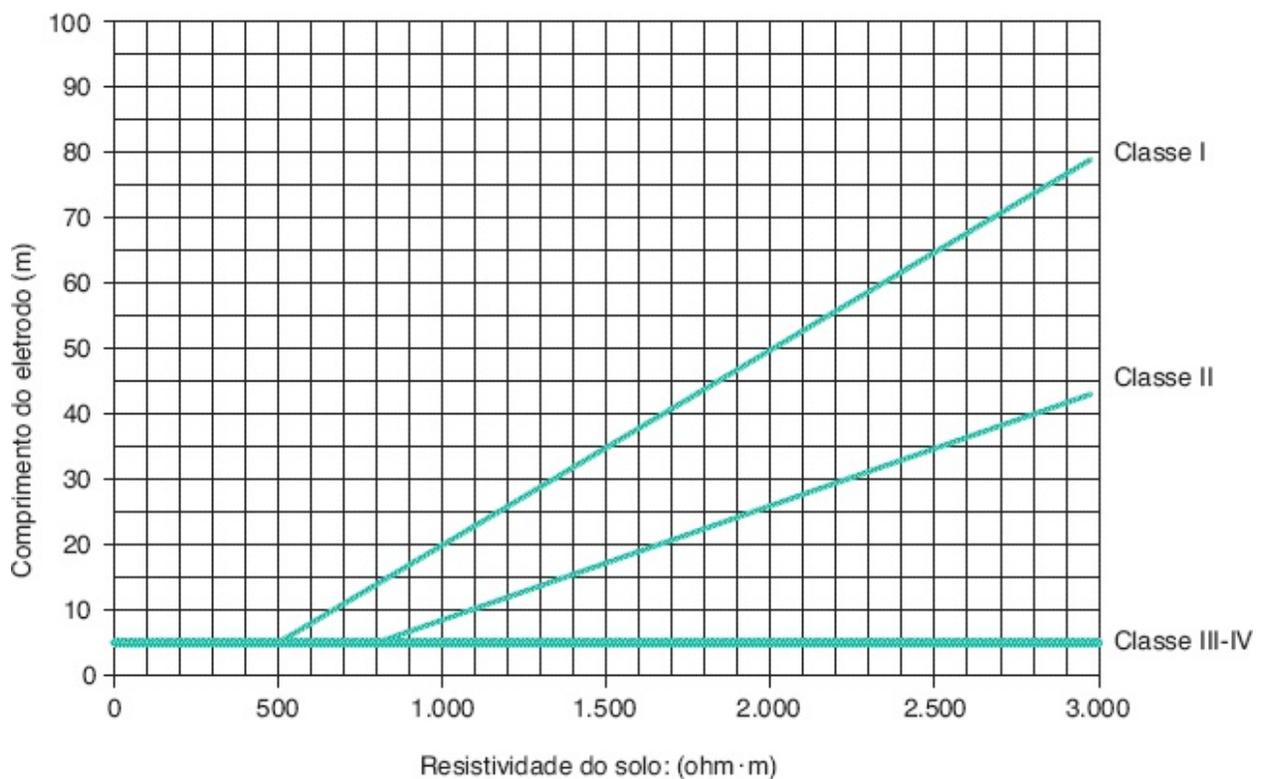
proporcionar fácil acesso.

- Os condutores de equipotencialização devem ser retilíneos e de menor comprimento possível.
- Em grandes estruturas, deve ser instalada mais de uma barra de ligação equipotencial devidamente interligada.
- A cada intervalo não superior a 20 m deve existir uma ligação equipotencial (BEL) para estruturas com mais de 20 m de altura.
- As barras de ligação equipotencial local BEL (barramento de equipotencialização local) devem ser conectadas ao anel horizontal que interligam os condutores de descida.
- O barramento de equipotencialização principal BEP (barramento de equipotencialização) deve ser ligado ao subsistema de aterramento.

**Tabela 13.36** Dimensões mínimas dos eletrodos de aterramento (reprodução parcial da NBR 5419-3:2015)

Material	Configuração	Eletrodo cravado diâmetro (mm)	Eletrodo não cravado	Comentários
Aço galvanizado a quente	Fita maciça	-	90 mm <sup>2</sup>	Espessura mínima de 3 mm
	Arredondado maciço	16	Diâmetro: 10 mm	-
	Tubo	25 mm	-	Espessura mínima de 2 mm
	Encordado	-	70 mm <sup>2</sup>	-
	Fita maciça	-	50 mm <sup>2</sup>	Espessura de 2 mm
	Encordado		50 mm <sup>2</sup>	Diâmetro de cada fio: 3 mm

Cobre	Arredondado maciço	15 mm	-	-
	Tubo	20 mm	-	Espessura da parede de 2 mm
Aço inox	Arredondado maciço	15 mm	Diâmetro: 10 mm	Espessura mínima: 2 mm
	Fita maciça		100 mm <sup>2</sup>	
Aço cobreado IACS 30 %	Arredondado maciço	12,7 mm	70 mm <sup>2</sup>	Diâmetro de cada fio da cordoalha: 8 mm
	Encordoado			



**Figura 13.13** Comprimento mínimo do eletrodo de aterramento (NBR 5419-3:2015).

- Todos os condutores não vivos dos sistemas elétricos e

equipamentos de tecnologia da informação devem ser direta ou indiretamente conectados à ligação equipotencial.

- As luvas isolantes inseridas nas canalizações de gás ou de água devem ser curto-circuitadas.
- As seções mínimas dos condutores utilizados na equalização dos potenciais podem ser conhecidas na [Tabela 13.37](#), para condutores que interligam diferentes barramentos BEP e BEL, e na [Tabela 13.38](#), para condutores de ligação equipotencial que conectam diferentes instalações metálicas internas aos barramentos BEP e BEL.
- A seção do condutor em aço inoxidável como condutor equipotencial deve ser igual à do aço galvanizado a fogo.
- Em uma mesma edificação, deve-se projetar um só sistema de aterramento, no qual, por meio de ligações equipotenciais, se conectariam todas as partes da instalação que obrigatoriamente devessem ser conectados à terra. A [Figura 13.14](#) mostra a forma pela qual são interconectadas todas as partes não condutivas da instalação, tais como tubulação metálica de água, condutor de aterramento, armações metálicas diversas como bandejas, prateleira, painéis etc. A conexão da tubulação metálica de gás com o sistema de aterramento deve ser definida pelas normas da concessionária de gás local.

**Tabela 13.37** Seção mínima dos condutores para ligação equipotencial que interligam diferentes barramentos (BEP e BEL) ou que ligam barras ao sistema de aterramento: classes do SPDA de I a IV (NBR 5419-3:2015)

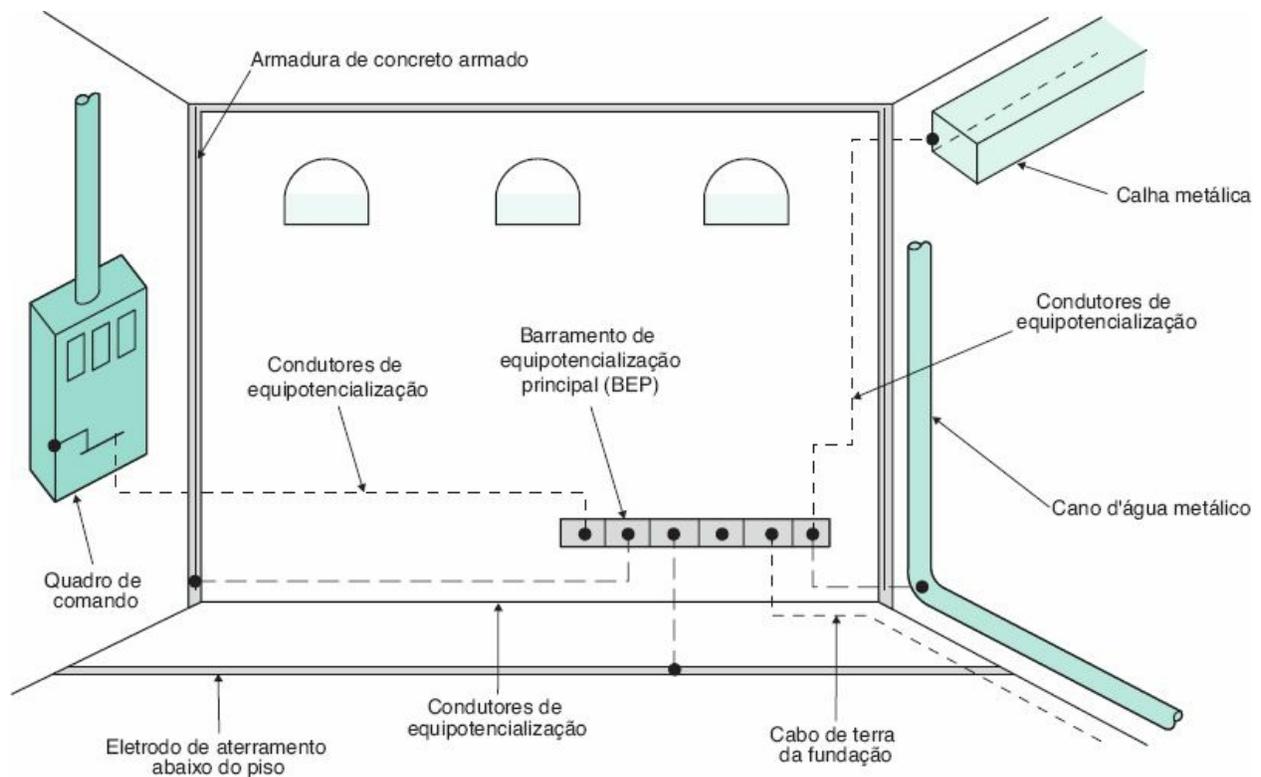
Modo de instalação	Material	Seção emmm <sup>2</sup>
	Cobre	16
Não enterrado	Alumínio	25

	Aço galvanizado a fogo	50
Enterrado	Cobre	50
	Aço galvanizado a fogo	80

**Tabela 13.38** Seção mínima dos condutores para ligação equipotencial que conectam diferentes instalações metálicas internas aos barramentos (BEP e BEL): classes do SPDA de I a IV (NBR 5419-3:2015)

Material	Seção em mm <sup>2</sup>
Cobre	6
Alumínio	10
Aço galvanizado a fogo	16

- As interligações equipotenciais podem ser realizadas pelos seguintes meios:
  - Direto: utilizar condutores de ligação não naturais em que a continuidade elétrica não pode ser garantida pelas ligações naturais.
  - Indireto: utilizar dispositivos de proteção contra surtos (DPS) quando não for possível executar a ligação direta por meio de condutores não naturais ou utilizar centelhadores quando a ligação direta não for permitida.
- Quando não for possível ou aceitável uma ligação direta de equipotencialização, deve-se utilizar um DPS que apresente as seguintes características técnicas:



**Figura 13.14** Ligações equipotenciais ao barramento de equipotencialização principal (BEP).

- A corrente de impulso deve ser igual ou superior à corrente de descarga atmosférica que flui do SPDA externo para os elementos metálicos interligados.
- A tensão de impulso disruptiva nominal deve ser inferior ao nível de impulso suportável entre as partes.
- Os condutores vivos dos sistemas internos que não sejam blindados nem estejam instalados no interior de eletrodutos devem possuir equipotencialização ao BEP por meio de um DPS.
- Os condutores vivos devem ser ligados ao BEP ou BEL somente pelo DPS.
- Os condutores PE e PEN de um sistema TN devem ser conectados diretamente ao BEP ou ao BEL.
- A união dos segmentos das tubulações metálicas de água, gás, ar comprimido e óleo que contenham anéis isolantes intercalados deve

ser interligada por condutores ou DPS dedicados a essa utilização.

### 13.5.4 Proximidades do SPDA com outras estruturas

Se um SPDA qualquer está adjacente a uma estrutura constituída de massas, condutores de um sistema elétrico e instalações metálicas, entre as quais o SPDA, e não for possível estabelecer uma ligação equipotencial para evitar um centelhamento perigoso, deve-se assegurar uma distância de segurança igual ou superior ao valor dado pela Equação (13.44).

$$D = K_i \times \frac{K_c}{K_m} \times L_{cd} \quad (13.44)$$

$K_i$  - depende do nível de proteção admitido e seu valor é dado na [Tabela 13.39](#);

$L_{cd}$  - comprimento ao longo do subsistema de captação ou do subsistema de descida, desde o ponto onde a distância de segurança deve ser considerada até a equipotencialização mais próxima, em m;

$K_m$  - depende do material de construção e seu valor é encontrado na [Tabela 13.39](#);

**Tabela 13.39** Valores de  $K_i$  e  $K_m$  (NBR 5419-3:2015)

Nível de proteção do SPDA	$K_i$	Material	$K_m$
I	0,080	Ar	1,00
II	0,060	Sólido	0,50
III	0,040	–	–
IV	0,040	–	–

$K_c = 1$  (para um condutor de descida – SPDA externo isolado);

$K_c = 0,66$  (para duas descidas – SPDA externo isolado);

$K_c = 0,44$  (para três ou mais descidas – SPDA externo isolado).

O valor de  $K_c$  pode ser determinado pela Equação (13.45) se o sistema captor for constituído de malha e possuir um número de descidas igual ou superior a quatro, conectadas por condutores horizontais em anel.

$$K_c = \frac{1}{2 \times N} + 0,1 + 0,2 \times \sqrt[3]{\frac{C}{H}} \quad (13.45)$$

Os valores de  $H$  e  $C$  podem ser identificados por meio da [Figura 13.15](#), sendo  $N$  o número de condutores de descida.

### Exemplo de aplicação (13.2)

Determinar a distância de segurança do galpão industrial ilustrado na Figura 13.15, sabendo-se que  $H = 10$  m e  $C = 12$  m. O subsistema captor é constituído de malha de cabo de cobre e existem 12 condutores de descida. O comprimento ao longo do subsistema de descida, desde o ponto onde a distância de segurança deve ser considerada até a equipotencialização mais próxima, vale 56 m. O SPDA deve ser da classe I.

$$K_i = 0,08 \text{ (Tabela 13.39)}$$

$$L_{cd} = 56 \text{ m (valor admitido)}$$

$$K_m = 0,5 \text{ (Tabela 13.39)}$$

$$K_c = \frac{1}{2 \times N} + 0,1 + 0,2 \times \sqrt[3]{\frac{C}{H}} = \frac{1}{2 \times 12} + 0,1 + 0,2 \times \sqrt[3]{\frac{12}{10}} = 0,3542$$

Logo, a distância de segurança vale:

$$D = K_i \times \frac{K_c}{K_m} \times L_{cd} = 0,08 \times \frac{0,3542}{0,5} \times 56 = 3,1 \text{ m}$$

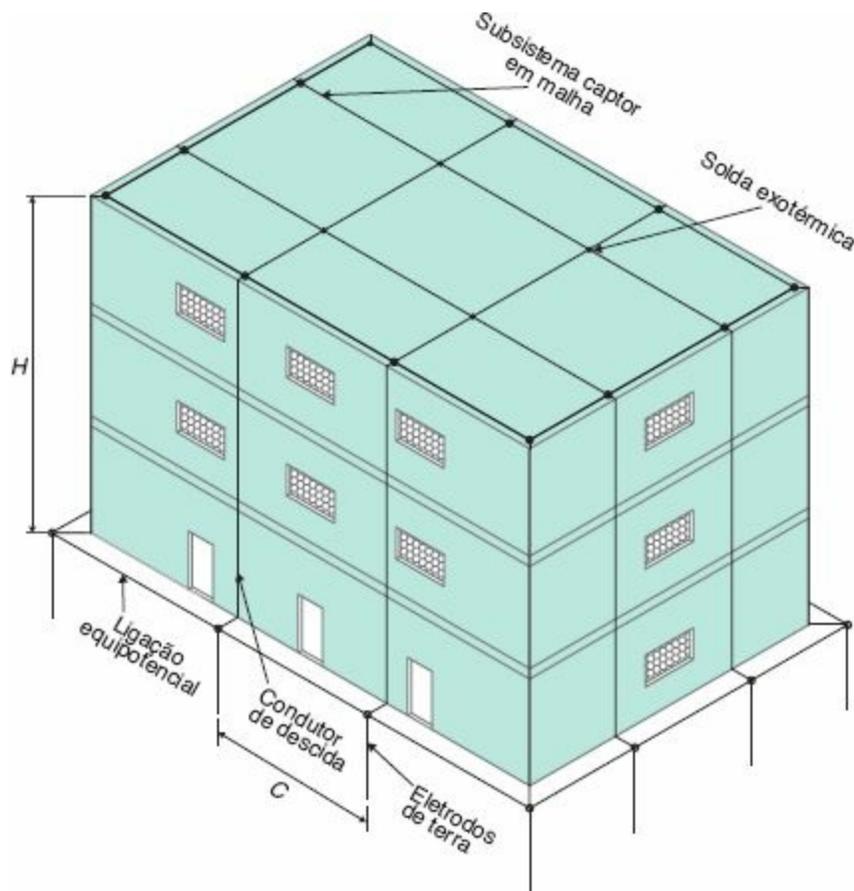


Figura 13.15 Sistema captor em malha.

### 13.5.5 Aterramento de tanques e tubulações metálicas para uso de produtos inflamáveis

Os tanques e tubulações metálicas que armazenam e transportam, respectivamente, produtos inflamáveis devem atender aos seguintes requisitos quanto ao aterramento:

- Os tanques metálicos de armazenamento de líquidos que podem produzir vapor inflamável (por exemplo, tanque de armazenamento de gasolina), ou de armazenamento de gases, são normalmente autoprotégidos, desde que a espessura da chapa em aço seja igual ou

superior a 5 mm e, se em alumínio, a espessura da chapa seja igual ou superior a 7 mm.

- Tanques metálicos de armazenamento de líquidos nas condições anteriores em contato direto com o solo ao qual estão conectadas as linhas de tubulação metálica não necessitam de subsistema de captação.
- Tanques ou contêineres individuais metálicos devem ser conectados a eletrodos de aterramento nas seguintes condições:
  - Tanques com dimensões horizontais ou diâmetros de até 20 m devem ser ligados, no mínimo, a dois eletrodos de aterramento equidistantes ao longo do perímetro.
  - Em tanques com dimensões superiores a 20 m, devem ser utilizadas duas interligações à terra, adicionando-se a cada 10 m de perímetro mais uma interligação complementar à terra.
- Linhas de tubulações metálicas externas ao processo industrial devem ser ligadas a eletrodos de aterramento verticais ou horizontais a cada 30 m ou ligados ao nível do solo a elementos já aterrados.
- Os tanques agrupados em pátios, tal como ocorre na área de armazenamento de combustível de usinas termelétricas que utilizam óleo diesel ou óleo combustível, devem ter cada tanque aterrado pelo menos em um ponto e interligado entre si formando um sistema equalizado.
- As estações de bombeamento e suas correspondentes tubulações metálicas longas destinadas ao transporte de líquidos inflamáveis devem ser interligadas por condutores de seção igual ou superior a 50 mm<sup>2</sup>, incluindo-se as respectivas blindagens metálicas.

Peças metálicas isoladas que são partes de tubulações longas que

- transportam líquidos inflamáveis devem ser interligadas a fim de evitar centelhamento.

## 13.6 Métodos de proteção contra descargas atmosféricas

Existem três métodos de proteção contra descargas atmosféricas definidos pela NBR 5419-3:2015: (i) método do ângulo de proteção; (ii) método das malhas; e (iii) método da esfera rolante.

O gráfico da [Figura 13.16](#) mostra os valores do ângulo de proteção em função da altura da estrutura e da classe do SPDA, enquanto a [Tabela 13.40](#) indica o tamanho da malha captora e o raio da esfera rolante em função da classe do SPDA.

### 13.6.1 Método do ângulo de proteção

Também conhecido como Método de Franklin, consiste em se determinar o volume de proteção propiciado por um cone, cujo ângulo da geratriz com a vertical varia segundo o nível de proteção desejado e para determinada altura da construção  $H_c$ . De acordo com a [Figura 13.17](#), o ângulo máximo de proteção é uma função da altura do captor para diferentes classes de SPDA.

Utilizando a propriedade das pontas metálicas de propiciar o escoamento das cargas elétricas para a atmosfera, chamado *poder das pontas*, Franklin concebeu e instalou um dispositivo que desempenha esta função, denominado para-raios.

Fica claro que as descargas elétricas dentro de determinada zona são mais facilmente escoadas pelo para-raios do que por uma estrutura de concreto, por exemplo.

A [Figura 13.18](#) mostra o princípio fundamental da atuação de um para-raios. As cargas elétricas, em vez de irromperem de um ponto qualquer do solo, são conduzidas até as pontas do para-raios (captor) por meio de um cabo de boa condutividade elétrica, permitindo que as correntes decorrentes sejam conduzidas à terra e propiciando, assim, a proteção da construção

dentro de determinado raio de atuação.

### 13.6.1.1 Volume de proteção formado por hastes

O para-raios deve oferecer uma proteção dada por um cone cujo vértice corresponde à extremidade superior do captor e cuja geratriz faz um ângulo de  $\alpha^\circ$  com a vertical, propiciando um raio de base do cone de valor dado pela Equação (13.46), conforme se observa na [Figura 13.19](#).

$$R_p = H_c \times \text{tg}\alpha \quad (13.46)$$

$R_p$  - raio da base do cone de proteção, em m;

$H_c$  - altura da extremidade do captor em relação à base, em m;

$\alpha$  - ângulo de proteção com a vertical, conforme mostra a [Figura 13.19](#).

Deve-se estabelecer uma proteção de borda da parte superior da edificação, através de um condutor, compondo a malha de interligação dos captores.

Um único mastro pode oferecer dois volumes de proteção para dois planos de referência e, conseqüentemente, dois ângulos também diferentes. Este é o caso do exemplo da [Figura 13.20](#), em que o mastro forma dois cones de proteção. O cone de proteção dado pelo ângulo  $\alpha_1$  e altura  $H_1$  do mastro tem como referência o plano formado pela área superior da estrutura, enquanto o ângulo  $\alpha_2$  e altura  $H_2 = H_e + H_1$  tem como referência o plano do solo.

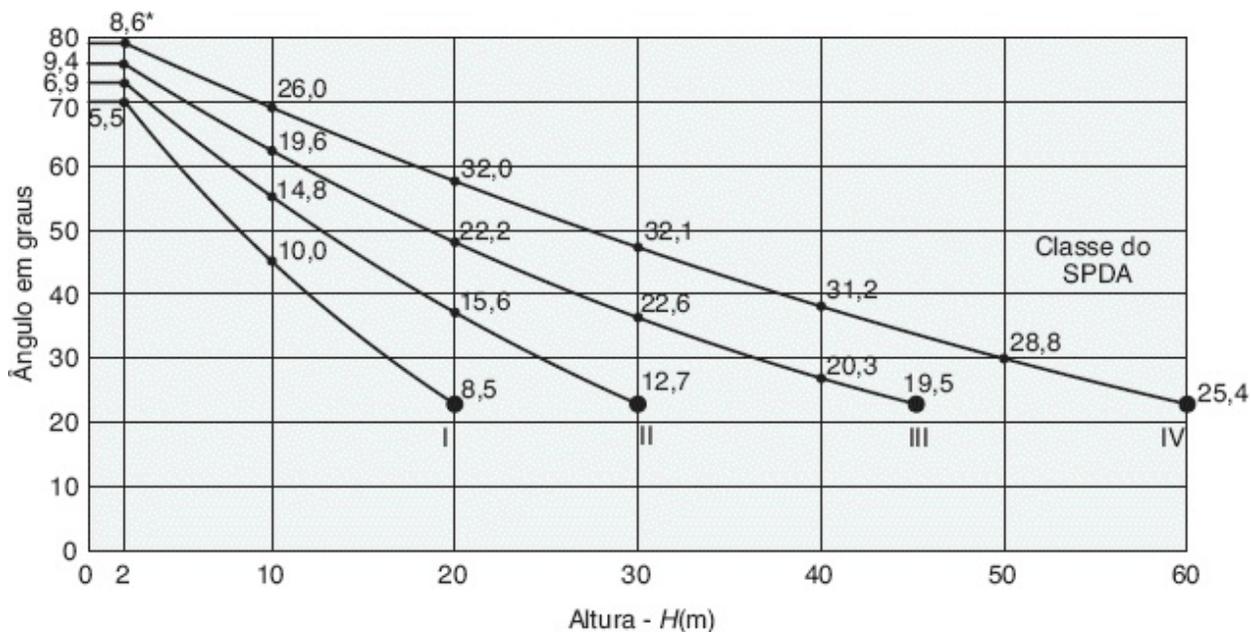
### 13.6.1.2 Número de condutores de descida

Deve ser função do nível de proteção desejado e do afastamento entre os condutores de descida, de acordo com a [Tabela 13.35](#):

**Tabela 13.40** Valores máximos do ângulo de proteção  $\alpha^\circ$ , de dimensão da malha de terra e do raio da esfera rolante (NBR 5419-3:2015)

---

Classe do SPDA	Métodos de proteção		
	Ângulo de proteção $\alpha$ °	Máximo afastamento dos condutores da malha	Raio da esfera rolante
	(1)	(2)	(3)
I	Ver <a href="#">Figura 13.17</a>	5 × 5	20
II		10 × 10	30
III		15 × 15	45
IV		20 × 20	60



(\*) Raios das bases dos cones de proteção, em metros.

Notas:

- 1)  $H$  é a altura do captor acima do plano de referência da área a ser protegida.
- 2) O ângulo não será alterado para valores de  $H$  inferior a 2 m.
- 3) Para valores de  $H$  superiores aos valores de cada curva são aplicáveis somente ao Método da Esfera Rolante e ao Método das Malhas.

**Figura 13.16** Ângulo de proteção correspondente à classe do SPDA.

$$N_{cd} = \frac{P_{co}}{D_{cd}} \quad (13.47)$$

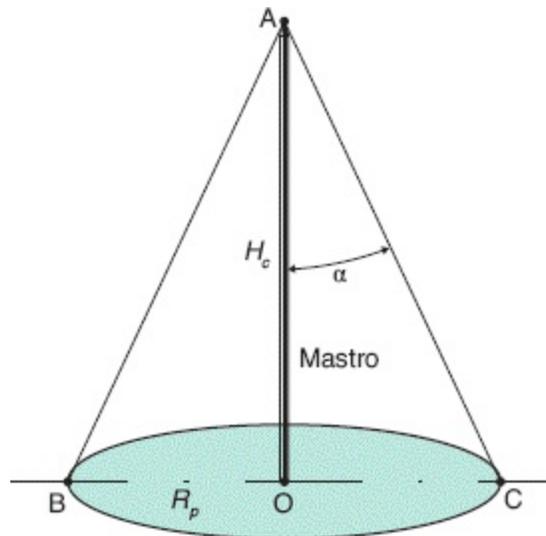
$N_{cd}$  - número dos condutores de descida;

$P_{co}$  - perímetro da construção, em m;

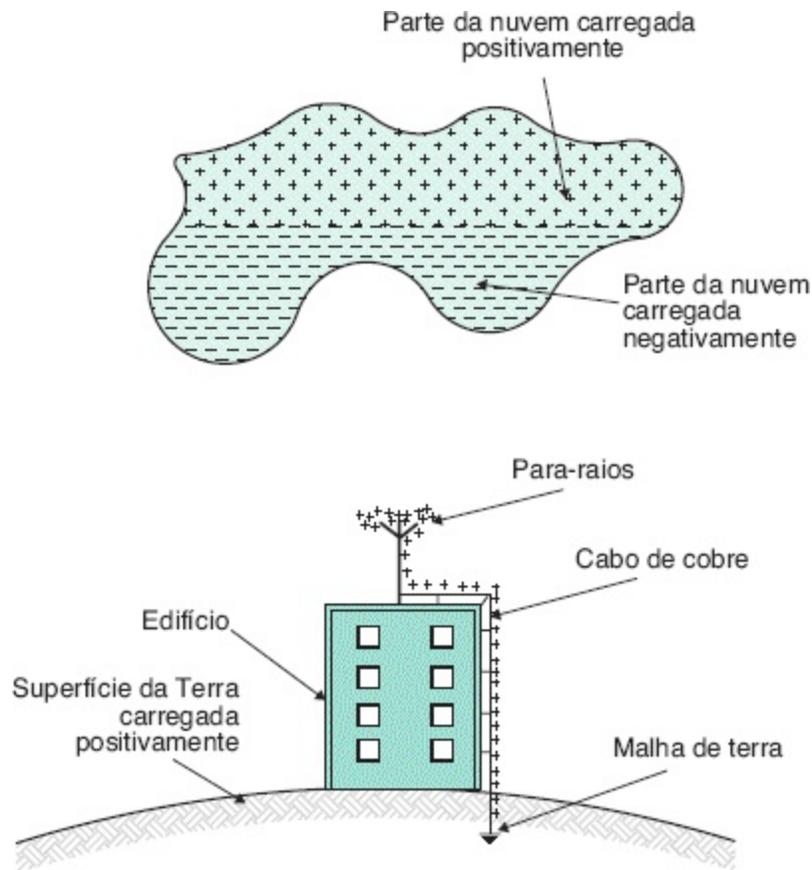
$D_{cd}$  - espaçamento entre os condutores de descida, dado na [Tabela 13.35](#).

Os condutores de descida devem ser distribuídos ao longo de todo o perímetro da construção, podendo-se admitir um espaçamento dos condutores 20 % maior do que o registrado na [Tabela 13.35](#), não se admitindo, entretanto, um número de descidas inferior a dois.

A [Figura 13.24](#) mostra, esquematicamente, os condutores de descida de uma construção fabril relativa ao Exemplo da aplicação (13.3).



**Figura 13.17** Volume de proteção provido pelo mastro do para-raios.

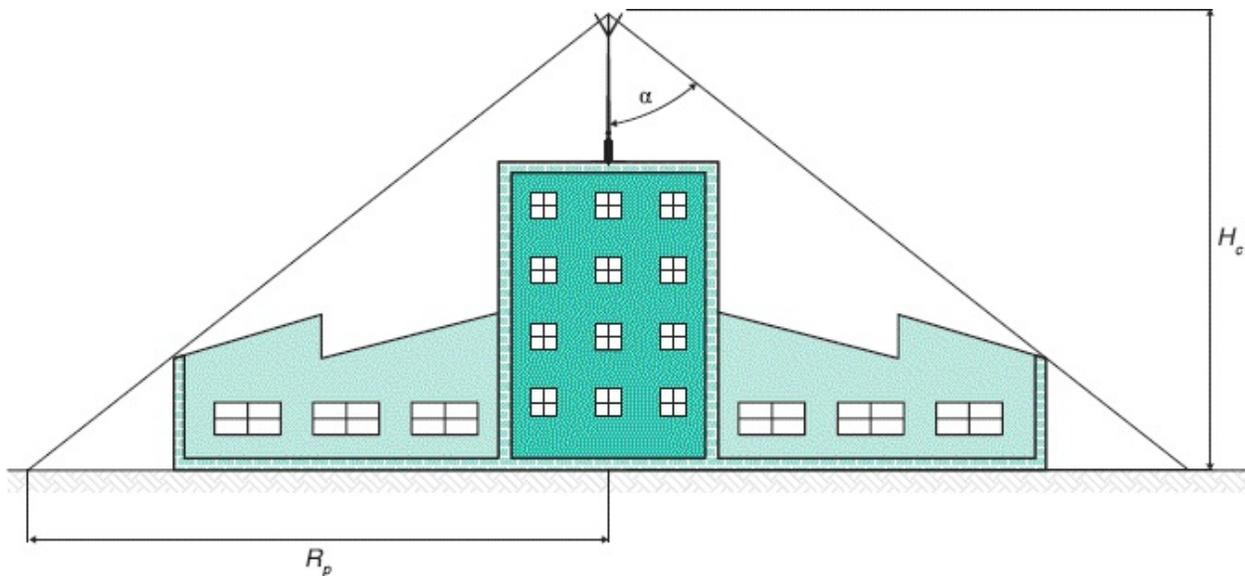


**Figura 13.18** Ilustração da concentração de cargas elétricas no captor.

### **13.6.1.3 Seção do condutor**

De preferência, devem ser utilizados condutores de cobre nus, principalmente em zonas industriais de elevada poluição ou próximas à orla marítima.

A seção mínima dos condutores é dada em função do tipo do material e da altura da edificação, conforme a [Tabela 13.33](#).



**Figura 13.19** Ângulo de proteção do para-raios.

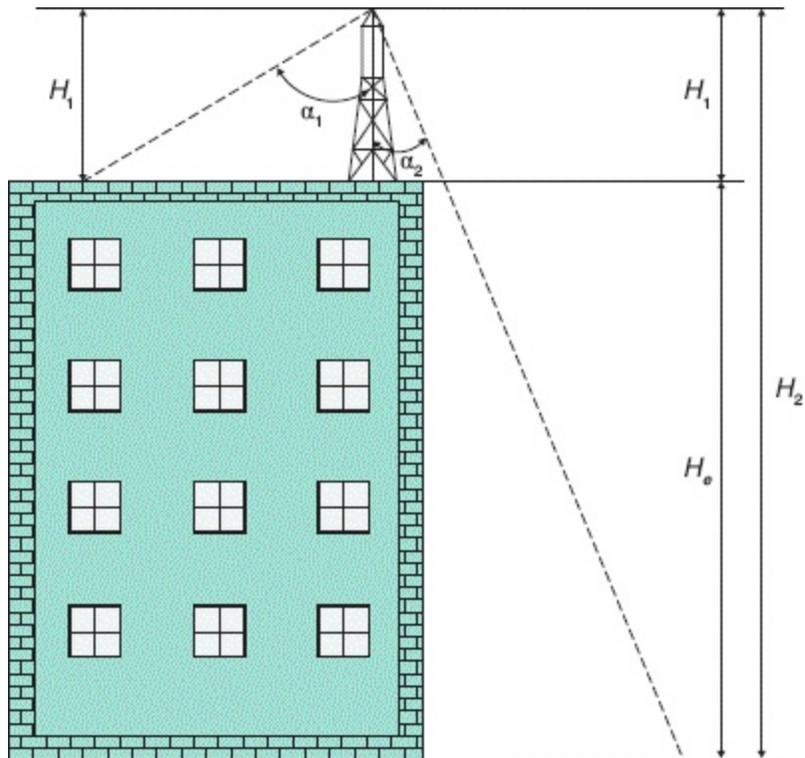
#### **13.6.1.4 Resistência da malha de terra**

A resistência da malha de terra não deve ser superior a  $10 \Omega$  em qualquer época do ano.

#### **13.6.1.5 Volume de proteção formado por cabos suspensos**

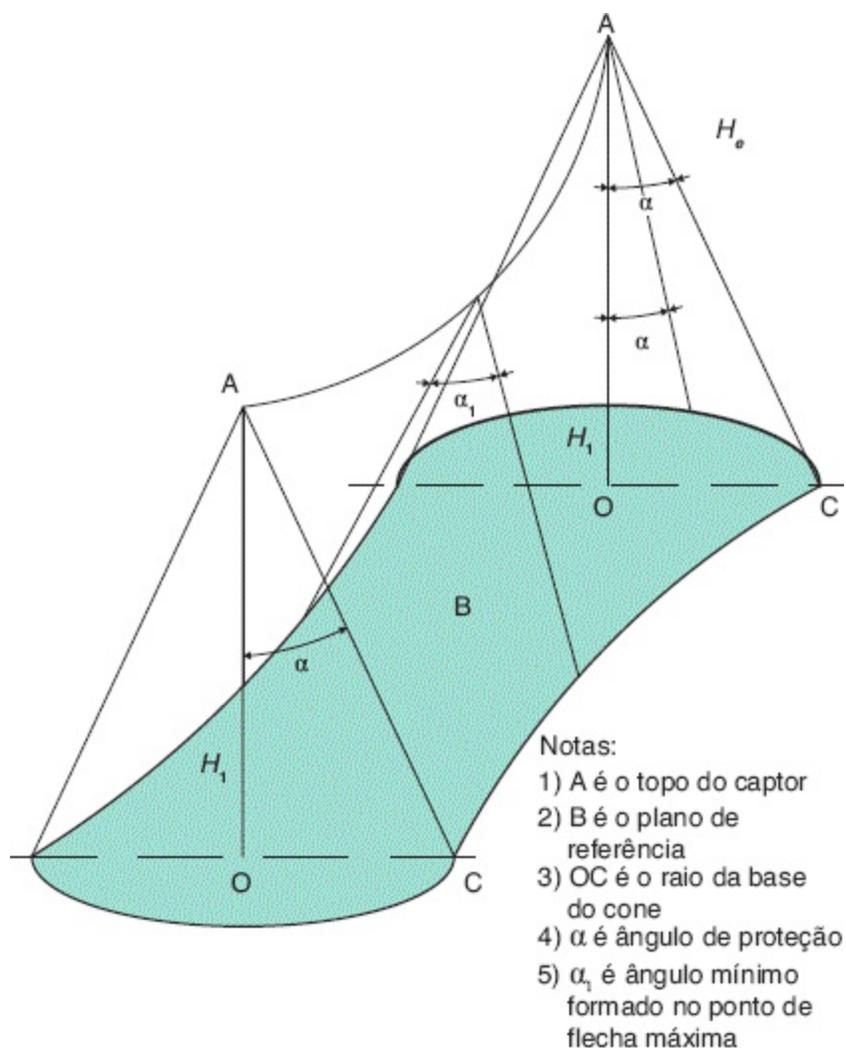
O método do ângulo de proteção também pode ser aplicado utilizando-se um cabo condutor fixado em duas ou mais estruturas com altura elevada (mastros, torres metálicas ou não), em conformidade com a [Figura 13.21](#). Pode-se observar que a proteção é delimitada por um volume prismático irregular, que forma um ângulo máximo nas extremidades e ângulo inferior no ponto de flecha máxima do cabo condutor em suspensão. Ressalta-se que, para qualquer objeto estar protegido, seu volume deve ficar contido no interior do volume prismático irregular. Isto é importante na proteção de subestações de médio e grande porte, normalmente projetadas nas tensões iguais ou superiores a 69 kV, em que os equipamentos apresentam grandes

volumes e alturas.



**Figura 13.20** Volume de proteção provido pelo mastro do para-raios para duas alturas.

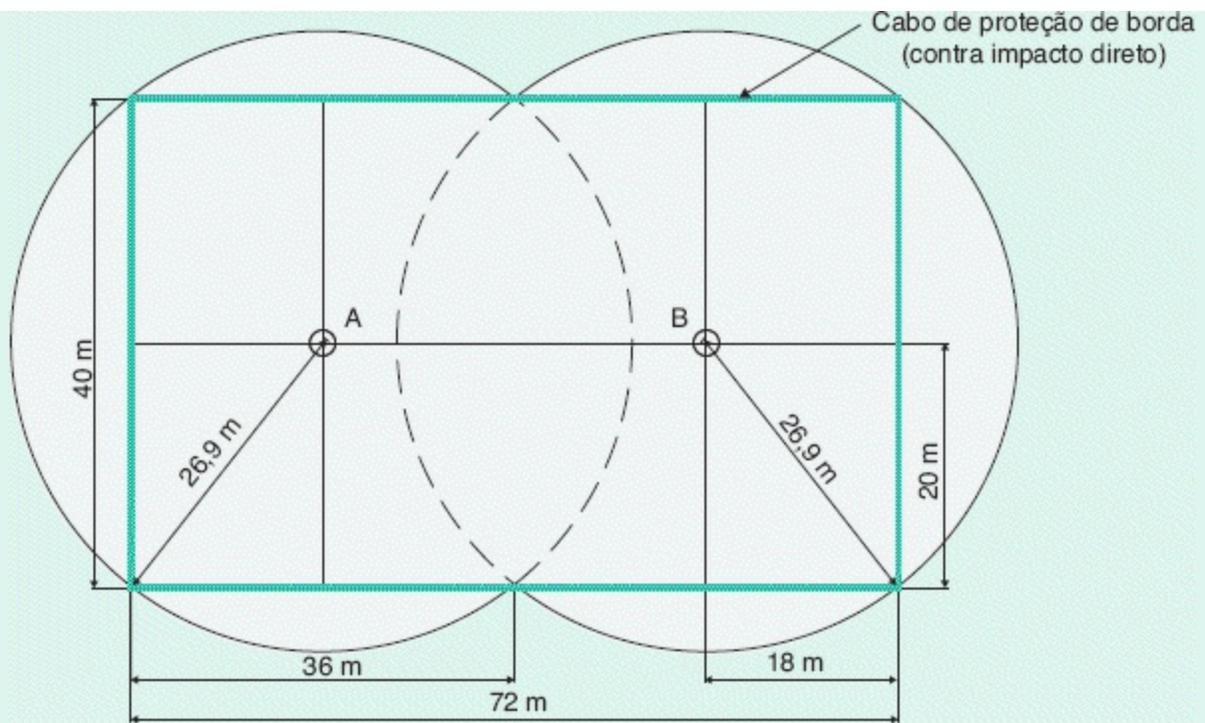
As estruturas de suporte do cabo condutor devem conter no seu topo os captosres de haste com as respectivas descidas e aterramento. Esse tipo de configuração pode também ser útil em áreas abertas que necessitam de proteção contra descargas atmosféricas.



**Figura 13.21** Volume de proteção provido por um cabo condutor suspenso.

### Exemplo de aplicação (13.3)

Conhecidas as dimensões do prédio da indústria de manufaturados simples, representadas na Figura 13.24, projetar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas utilizando o método do ângulo de proteção. A vista superior da edificação é mostrada nas Figuras 13.22 e 13.23. Admitir que a proteção da estrutura é de nível III. A resistividade do solo é de  $1.000 \Omega \cdot m$ .



**Figura 13.22** Vista superior da edificação da Figura 13.24.

**a) Comprimento do mastro**

Considerando-se, inicialmente, dois para-raios instalados nos pontos A e B indicados na Figura 13.22, podemos determinar o raio mínimo de proteção da base do cone, que é de 26,9 m. Pela Figura 13.16, podemos observar que para o nível de proteção III não se consegue um mastro com comprimento necessário, posicionado inicialmente conforme a Figura 13.22. O maior raio da base do cone  $R_{bc}$  que se pode obter na curva do nível de proteção III é de 22,2 m, de acordo com o gráfico da Figura 13.16, considerando um mastro com altura  $H_c = 30$  metros com ângulo de proteção de  $\alpha = 37^\circ$ , admitindo o teto da edificação como a superfície de referência, ou seja:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{R_{bc}}{H_c} \rightarrow R_{bc} = H_c \times \operatorname{tg}\alpha = 30 \times \operatorname{tg}37^\circ = 22,6 \text{ m} < 26,9 \text{ m (condição não satisfeita)}$$

Adotando-se agora quatro para-raios posicionados, conforme mostra a Figura 13.24, podemos determinar o raio da base do cone  $R_{bc}$  de proteção cujo valor é 20,5 m. Neste caso, conseguimos um mastro de altura  $H_c = 20$  m com ângulo de proteção igual a  $48^\circ$ , cujo raio da

base de proteção vale 22,2 m, conforme gráfico da Figura 13.16, ou seja:

$$R_{bc} = H_c \times \operatorname{tg} \alpha = 20 \times \operatorname{tg} 48^\circ = 22,2 \text{ m} > 20,5 \text{ m (condição satisfeita)}$$

Para fins práticos de instalação e de custo, consideramos que  $H_c = 20 \text{ m}$  é um mastro de comprimento muito grande. Evoluindo o desenvolvimento da questão, para determinarmos uma melhor solução, podemos adotar seis mastros. Deixamos o desenvolvimento do cálculo para o leitor como exercício e continuamos a determinar os demais valores do SPDA para a condição de  $H_c = 20 \text{ m}$ .

### b) Número de condutores de descida

Pela Tabela 13.35, temos:

$$D_{cd} = 15 \text{ m (nível de proteção III)}$$

$$N_{cd} = \frac{P_{co}}{D_{cd}} = \frac{2 \times 72 + 2 \times 40}{15} = 15 \rightarrow N_{cd} = 16 \text{ descidas}$$

O comprimento do anel condutor em torno da construção vale:

$$P_{co} = 2 \times (72 + 1 + 1) + 2 \times (40 + 1 + 1) = 232 \text{ m}$$

A Figura 13.24 mostra a configuração de instalação dos condutores de descida.

### c) Afastamento entre os condutores de descida

Na parte frontal e dos fundos da estrutura

$$D_{cd1} = \frac{L_f}{N_{cd}} = \frac{72}{6-1} = 14,4 < 15 \text{ m} \rightarrow D_{cd1} = 15 \text{ m (veja o arranjo final na Figura 13.24)}$$

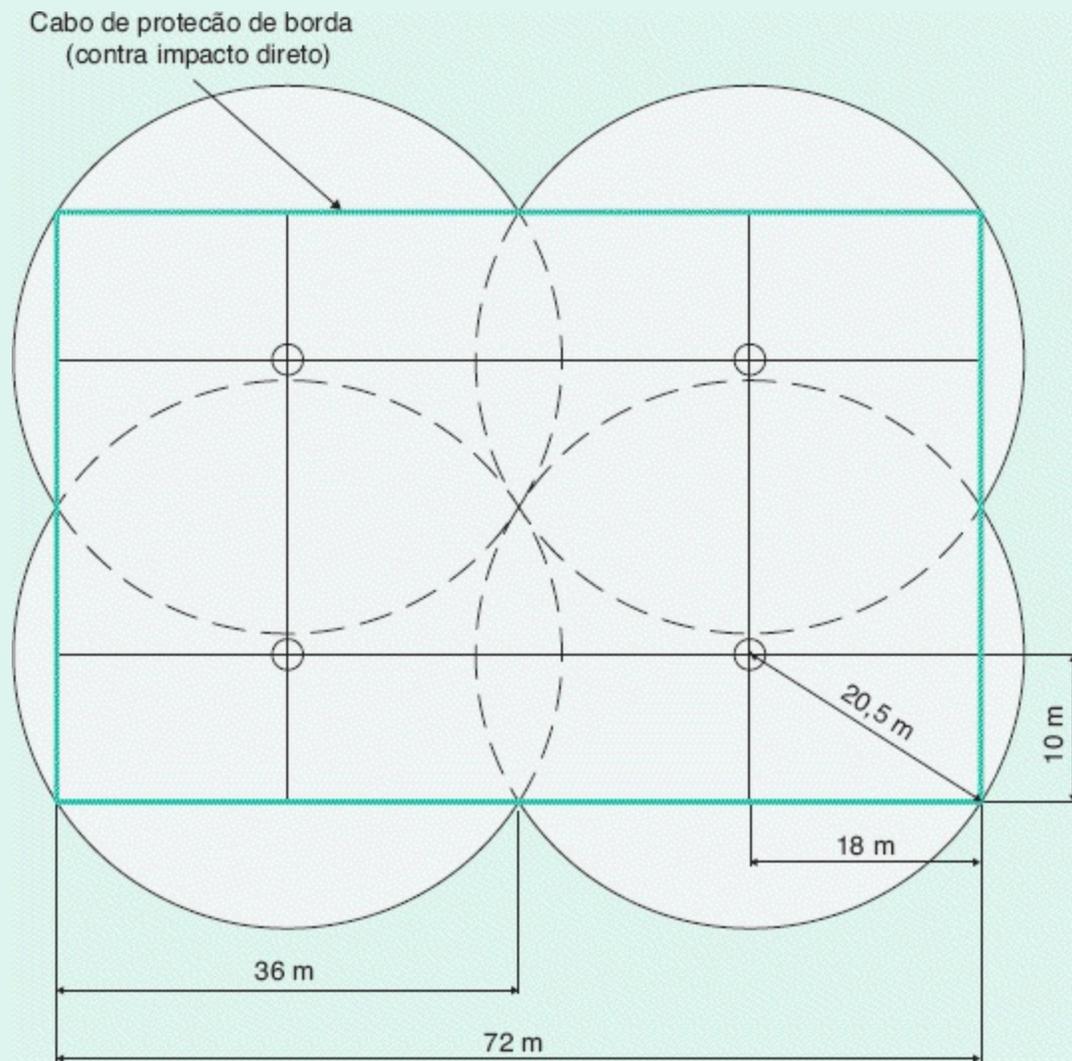
Nas partes laterais da estrutura

$$D_{cd2} = \frac{L_l}{N_{cd2}} = \frac{40}{4-1} = 13,3 < 15 \text{ m} \rightarrow D_{cd2} = 14 \text{ m (veja o arranjo final na Figura 13.24)}$$

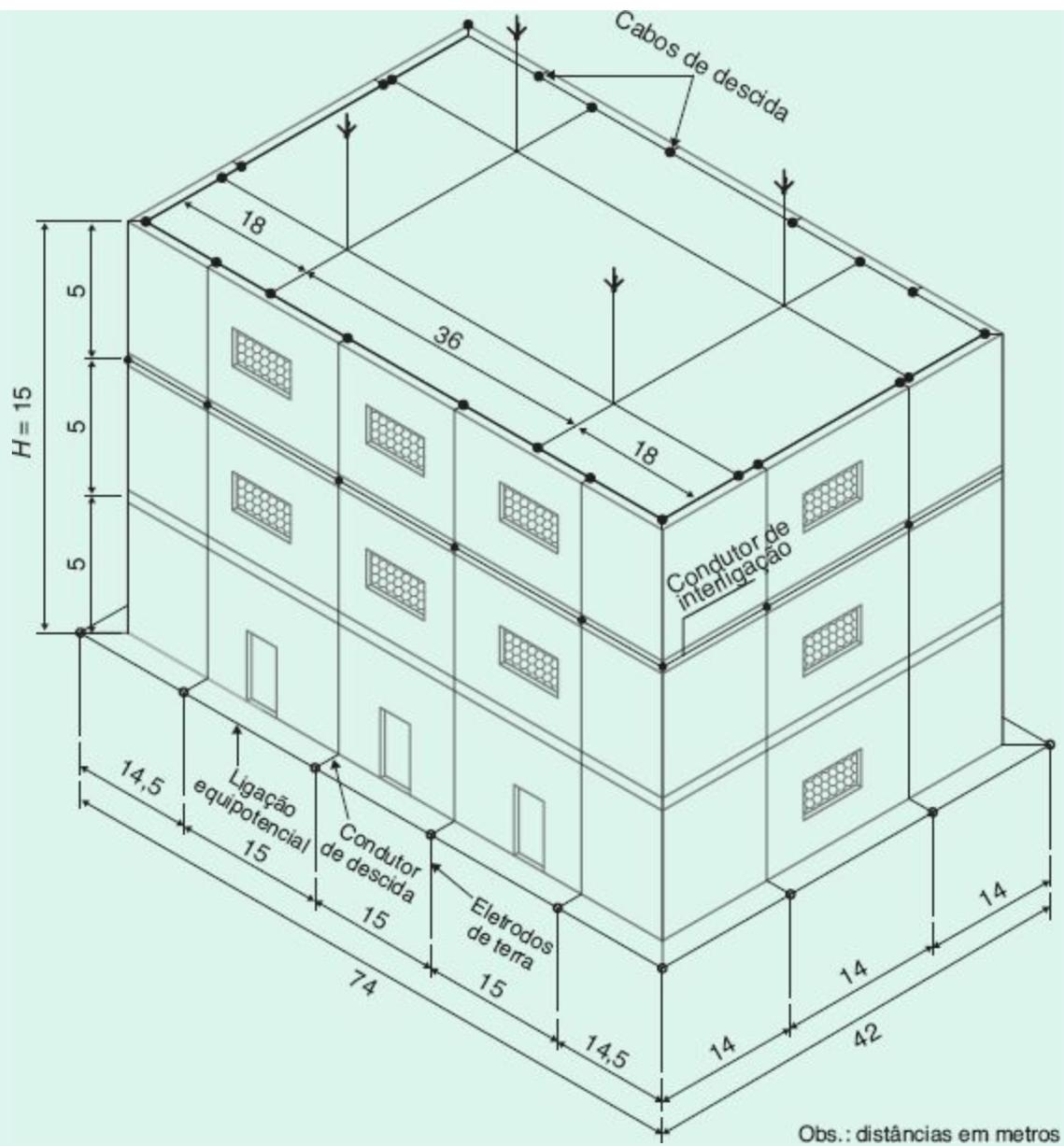
Para se adequar à dimensão frontal da estrutura e atender ao afastamento de 1 m entre o cabo que circunda a estrutura e sua base, adotaremos a distância entre as hastes de terra com os seguintes valores:  $14,5 + 15 + 15 + 15 + 14,5 = 74$  m.

#### d) Seção do condutor de descida

A seção mínima do condutor deve ser de  $S_{cd} = 35 \text{ mm}^2$ , em cabo de cobre, segundo a Tabela 13.33.



**Figura 13.23** Vista superior da edificação da Figura 13.24.



**Figura 13.24** Elementos para proteção de edifícios contra descargas atmosféricas.

### e) Número de eletrodos de aterramento

Como no presente caso há 16 condutores de descida, será adotado o mesmo número de eletrodos verticais de aço cobreado de 3 m cada, conectando-se cada eletrodo na extremidade de cada condutor de descida.

### f) Comprimento mínimo dos eletrodos de aterramento

De acordo com o gráfico da Figura 13.13, o comprimento mínimo dos eletrodos de aterramento para o SPDA classe III vale:

$$\rho = 1.000 \Omega \cdot \text{m} \rightarrow L_1 = 5 \text{ m}$$

O raio médio da área equivalente do círculo abrangida pelo condutor de aterramento em anel circulando a estrutura, e a 1 m desta, vale:

$$S = 74 \times 42 = 3.108 \text{ m}^2$$
$$R_{\text{ma}} = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 3.108}{\pi}} = 31,4 > 5 \text{ m (condição satisfeita)}$$

A ligação equipotencial entre os eletrodos verticais pode ser feita através de cabo de cobre nu encordoado de seção igual a  $50 \text{ mm}^2$ , de acordo com a Tabela 13.36.

## 13.6.2 Métodos das malhas

Também conhecido como Método de Faraday, consiste em envolver a parte superior da construção com uma malha captora de condutores elétricos nus, cuja distância entre eles é função do nível de proteção desejado dado pela Tabela 13.40, que estabelece as dimensões do módulo da malha de proteção:

$$A_{\text{rnc}} \leq A_{\text{mc}} \quad (13.48)$$

$A_{\text{mc}}$  - área mínima do módulo da malha captora, em  $\text{m}^2$ , de acordo com a Tabela 13.40, coluna (2);

$A_{\text{rnc}}$  - área do módulo da malha captora obtida a partir da área de cobertura da edificação, em  $\text{m}^2$ .

O método das malhas, ao contrário do método do ângulo de proteção, é indicado, na prática, para edificações com uma grande área horizontal, nas quais seria necessária uma grande quantidade de captores do tipo haste,

tornando o projeto muito oneroso.

O método das malhas é fundamentado na teoria pela qual o campo eletromagnético é nulo no interior de uma estrutura metálica ou envolvida por uma superfície metálica ou por uma malha metálica, quando são percorridas por uma corrente elétrica de qualquer intensidade. A maior proteção que se pode obter utilizando o método das malhas é construir uma estrutura e envolvê-la completamente com uma superfície metálica, o que, obviamente, não é uma solução aplicável.

Para se fazer uso do método das malhas, é necessário conhecer as seguintes prescrições:

- O método das malhas é indicado para telhados horizontais planos, sem curvaturas. Pode também ser utilizado nas superfícies laterais planas da estrutura como captor para descargas laterais.
- A malha captora deve ser instalada na parte superior da estrutura e nas saliências porventura existentes.
- A malha captora deve envolver a cumeeira dos telhados, se o declive do mesmo for superior a 1/10.
- A abertura da malha é função do nível de proteção calculado para uma particular estrutura, conforme a [Tabela 13.40](#).
- Quanto menor for a abertura da malha protetora, maior será a proteção oferecida à estrutura.
- Recomenda-se a instalação de minicaptos verticais, com comprimento 20 a 30 cm, ao longo dos condutores que compõem a malha protetora. Isso evita que o centelhamento devido ao impacto da descarga atmosférica danifique o material da cobertura.
- O número de descidas pode ser determinado pela [Tabela 13.35](#).
- Quando existir qualquer estrutura na cobertura que se projete a mais de 30 cm do plano da malha captora e constituída de materiais não condutores, tais como chaminés, sistema de exaustão de ar etc., esta deve ser protegida por um dispositivo de captação conectado à

malha captora.

- Quando existir uma estrutura metálica que não possa assumir a função de captor, deve estar contida no volume de proteção da malha captora.

### Exemplo de aplicação (13.4)

Considerar a estrutura da Figura 13.25 e dimensionar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas com base no método das malhas, considerando um nível de proteção II. A Figura 13.26 mostra a área superior da estrutura da Figura 13.25.

#### a) Dimensões da malha captora

Construção com nível de proteção II

De acordo com a Tabela 13.40, as dimensões máximas do módulo da malha captora de proteção são de  $10 \times 10$  m.

A área da construção vale:

$$S_{cond} = 40 \times 72 = 2.880 \text{ m}$$

#### b) Número de condutores da malha captora

Na direção da maior dimensão da construção, o número de condutores da malha captora vale:

$$N_{cm1} = \frac{L_m}{D_{cm}} + 1 = \frac{72}{10} + 1 = 8,2 \rightarrow N_{cm1} = 9 \text{ condutores (veja Figura 13.25)}$$

Na direção da menor dimensão da construção, o número de condutores da malha captora vale:

$$N_{cm2} = \frac{L_c}{D_{cm}} + 1 = \frac{40}{10} + 1 = 5 \text{ condutores (veja a disposição da malha captora na Figura 13.25)}$$

Logo, o arranjo da malha captora foi concebido de acordo com a Figura 13.25, em que os

afastamentos dos condutores das diversas malhas são inferiores a  $10 \times 10$  m:

$$A_{mc} = 10 \times 10 = 100 \text{ m}^2$$

$$A_{rmc} = 9 \times 10 = 90 \text{ m}^2 \text{ (veja malha captora na Figura 13.25)}$$

$$A_{rmc} = A_{mc} \text{ (condição satisfeita)}$$

### c) Número de condutores de descida

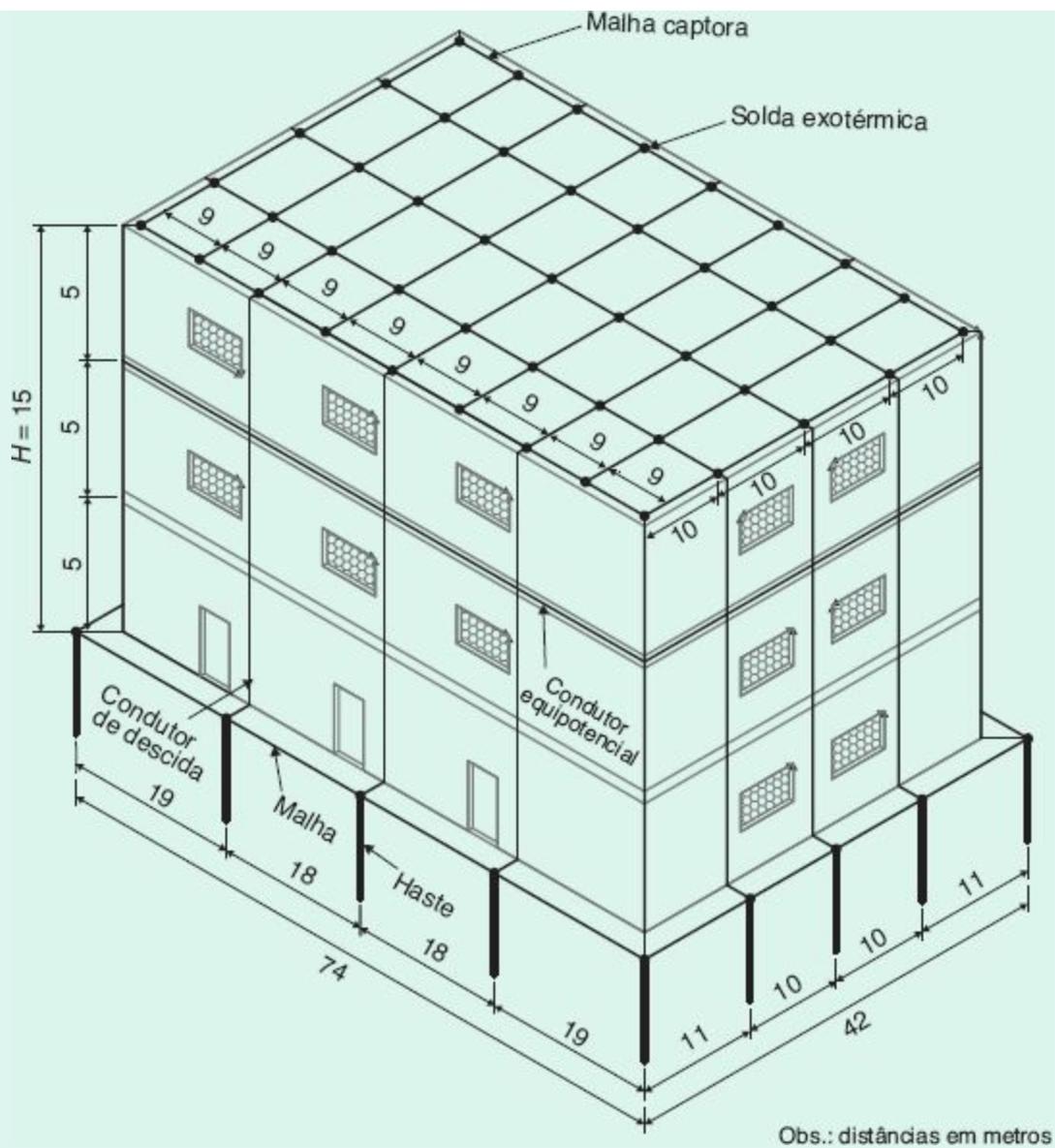
Da Tabela 13.35, temos:

$$D_{cd} = 15 \text{ m (Tabela 13.35 – nível de proteção II)}$$

O comprimento do perímetro da construção vale:

$$P_{co} = 2 \times 72 + 2 \times 40 = 224 \text{ m}$$

$$N_{cd} = \frac{P_{co}}{D_{cd}} = \frac{224}{15} = 14,9 \rightarrow N_{cd} = 16 \text{ descidas (para se adequar ao perímetro da estrutura)}$$



**Figura 13.25** Estrutura envolvida pelo SPDA.

**d) Seção dos condutores da malha captora e de descida**

$$S_c = 35 \text{ mm}^2 \text{ (condutor de cobre, conforme a Tabela 13.33)}$$

A Figura 13.25 mostra o SPDA envolvendo a estrutura através da malha captora e dos condutores de descida. A vista superior da malha é dada na Figura 13.26.

### e) Seção do condutor equipotencial ou condutor de aterramento

A seção do condutor equipotencial deve ser de  $50 \text{ mm}^2$ , de cobre nu encordado, de acordo com a Tabela 13.36.

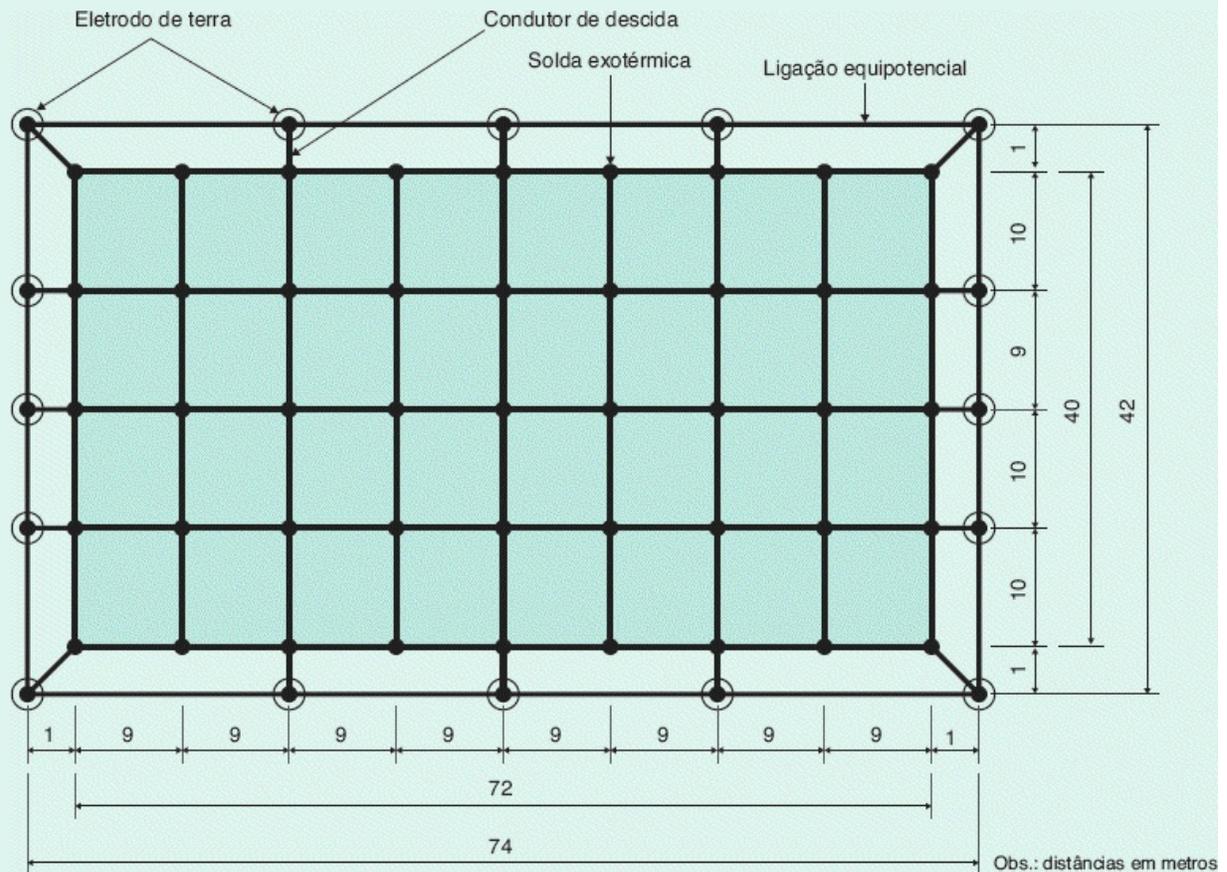


Figura 13.26 Malha captora.

### 13.6.3 Método da esfera rolante

Também conhecido como método eletrogeométrico, se baseia na delimitação do volume de proteção dos captores de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, podendo ser utilizados hastes, cabos ou mesmo uma combinação de ambos. É empregado com muita eficiência em estruturas de

formas arquitetônicas complexas. Em função dessa característica, o método da esfera rolante tem bastante aplicação em subestação de potência de instalação exterior.

Com base na conceituação da formação de uma descarga atmosférica vista na Seção 13.2, o método da esfera rolante se fundamenta na premissa de uma esfera de raio  $R_e$ , com o centro localizado na extremidade do líder antes de seu último salto, conforme visto na [Figura 13.27](#). Os pontos da superfície da referida esfera são o lugar geométrico que deve ser atingido por uma descarga atmosférica.

Ao rolar a esfera fictícia sobre o solo e sobre o sistema de proteção, delimita-se a região em que ela não toca, formando, assim, a zona protegida. Ou melhor, a zona protegida pode ser definida como a região em que a esfera rolante não consegue tocar, exceto nos captores.

A aplicação do método da esfera rolante envolve dois diferentes casos:

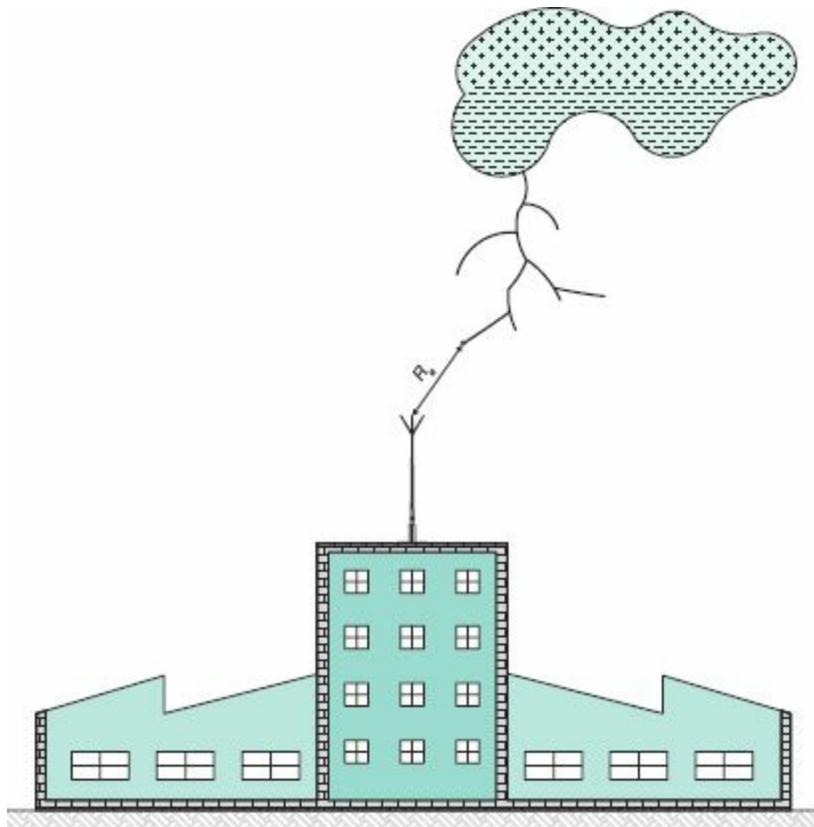


Figura 13.27 Determinação da distância do raio da esfera do modelo eletrogeométrico.

### 13.6.3.1 Volume de proteção de um captor vertical quando a altura do captor $H_c$ é inferior a $R_e$

Tomando-se o raio da esfera rolante  $R_e$ , traçam-se uma reta horizontal paralela ao plano do solo e um segmento de círculo com o centro no topo do captor. Com o centro no ponto de interseção  $P$  e o raio  $R_e$ , traça-se um segmento de círculo que tangencie o topo do captor e o plano do solo, conforme pode ser observado na Figura 13.28. O volume formado pela rotação da área hachurada em torno do captor representa o volume de proteção oferecido pelo SPDA.

### 13.6.3.2 Volume de proteção de um captor vertical quando a altura $H_c$ é superior a $R_e$

Com base no mesmo procedimento anterior, pode-se determinar o volume de proteção, conforme a Figura 13.29. Deve-se observar que a estrutura excedente ao volume de proteção pode ser atingida por descargas atmosféricas laterais.

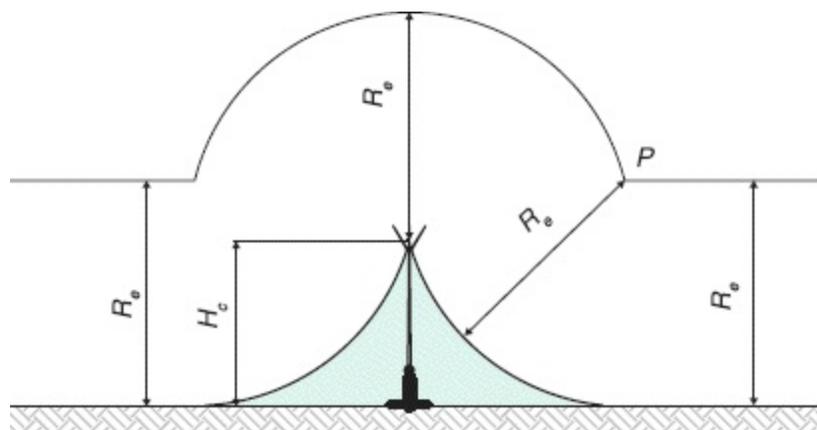


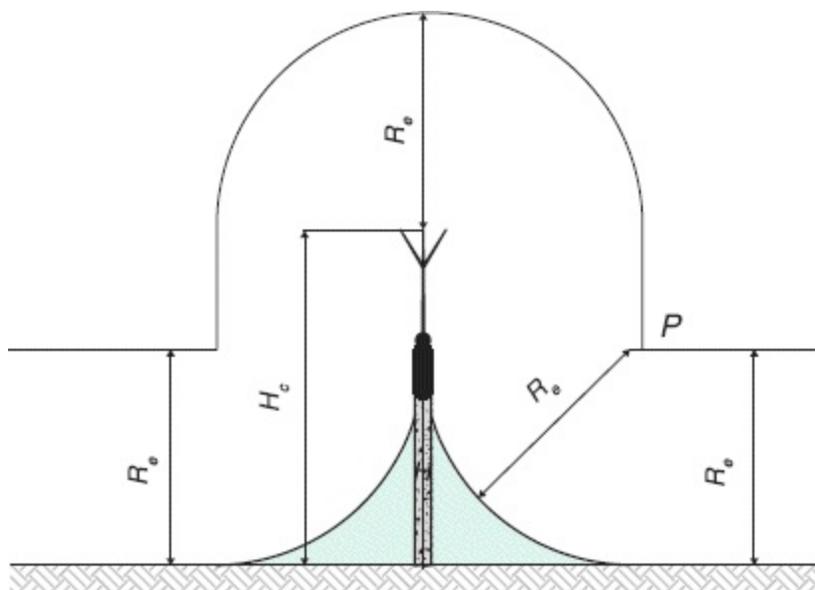
Figura 13.28 Volume de proteção para  $H < R_e$ .

À medida que a altura da haste captora aumenta a partir do valor  $H_c \geq$

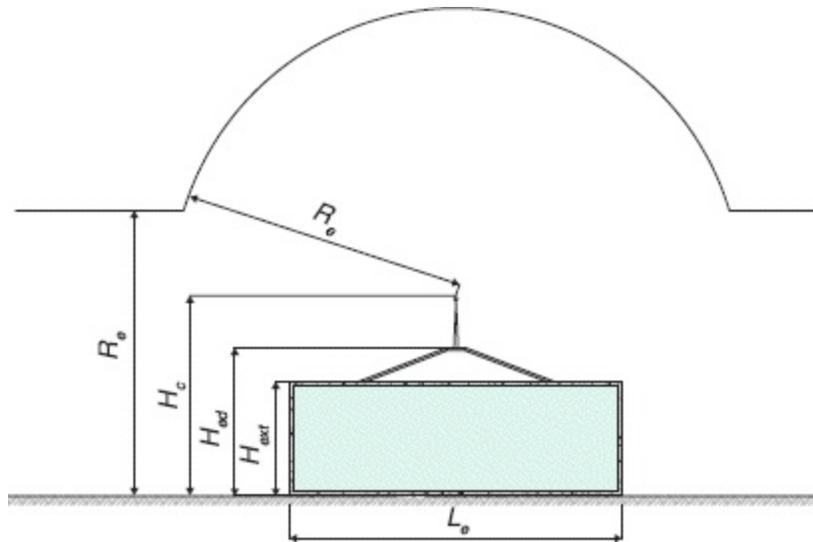
$R_e$ , verifica-se que o SPDA perde eficiência, isto é, o volume de proteção não cresce com o aumento do comprimento da haste captora.

O modelo da esfera rolante é aplicado com sucesso em edificações de geometria muito irregular, tanto na parte superior como na parte perimétrica. Já em estruturas simples, como, por exemplo, a estrutura da [Figura 13.30](#) e edificações circulares, sua aplicação é bastante simples.

O método da esfera rolante pode ser utilizado em qualquer tipo de estrutura, incluindo-se as subestações de alta tensão de instalação ao tempo, notadamente aquelas com tensão superior a 69 kV. No nível de tensão igual ou inferior a 69 kV, em que se utilizam estruturas de suporte dos barramentos em concreto armado ou metálicas, normalmente empregadas em grande parte dos padrões de subestação das concessionárias de energia elétrica, são próximas o suficiente para permitir que apenas a utilização de para-raios de haste forneça o volume de proteção capaz de dispensar o uso de cabos-guarda.



**Figura 13.29** Volume de proteção para  $H > R_e$ .



**Figura 13.30** Parâmetros da Equação (13.11).

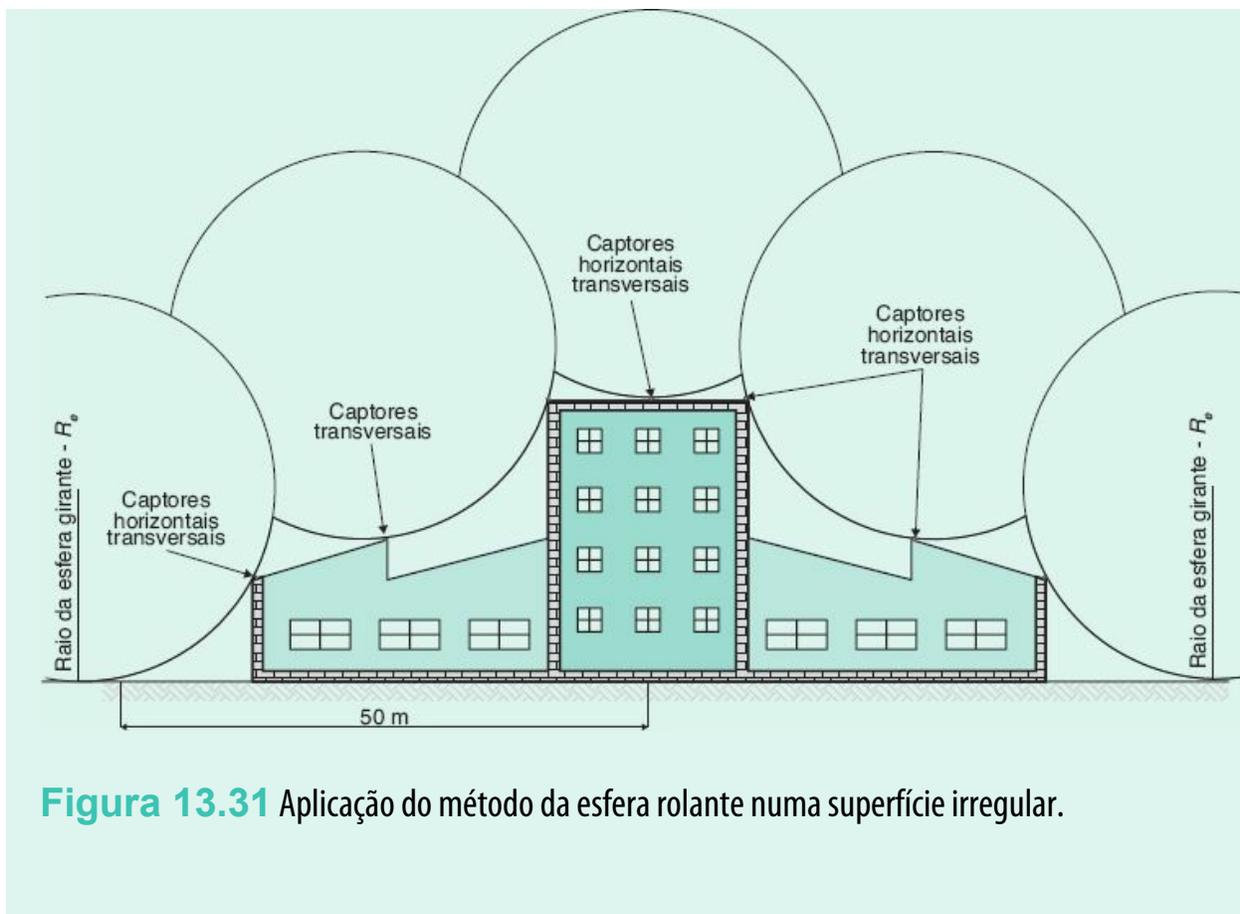
### Exemplo de aplicação (13.5)

Dimensionar um sistema SPDA para a proteção de uma indústria de manufaturados têxteis, cuja parte frontal está representada na Figura 13.31, utilizando o método da esfera rolante. Sabe-se que a estrutura foi classificada pelos estudos de risco no nível de proteção I.

Determinação do raio da esfera rolante

Com base na Tabela 13.40, observa-se que para o nível de proteção I o raio da esfera rolante é de  $R_e = 20$  m.

A esfera deve rolar por toda a superfície superior nas direções transversal e longitudinal da construção.



**Figura 13.31** Aplicação do método da esfera rolante numa superfície irregular.

### 13.6.4 Proteção de subestações de energia elétrica

As subestações podem ser protegidas utilizando-se quaisquer dos três métodos anteriormente estudados. A seleção do método de proteção de SPDA da subestação depende da forma como a mesma está instalada.

#### 13.6.4.1 Subestações abrigadas

São aquelas instaladas no interior de uma edificação, construída geralmente com paredes de alvenaria, pilares e lajes de concreto armado. Esse tipo de subestação foi amplamente estudado no Capítulo 12.

Tratando-se de uma subestação de energia elétrica, normalmente o risco tende a levar a classe do SPDA para o nível de proteção I ou II, a depender da importância que se dê na análise de risco  $R_1$ . O mais comum é utilizar o

método das malhas devido ao baixo custo que representa esse tipo de construção, pois a superfície superior da edificação é plana e com baixa inclinação.

Os procedimentos de cálculo são os mesmos adotados para a determinação do volume de proteção de edificações, conforme a Seção 13.6.2.

#### **13.6.4.2 Subestações exteriores**

São aquelas em que parte ou todos os seus equipamentos elétricos são instalados ao tempo.

O método de proteção contra descargas atmosféricas a ser utilizado depende das dimensões da subestação e do arranjo dos barramentos. Para subestações de 69 kV, por exemplo, com arranjo de barra dupla com disjuntor de transferência e barramentos superpostos, o método do ângulo de proteção normalmente é adotado por sua simplicidade e custo.

Para subestações de 69 kV e acima, em que o arranjo é de barra principal e disjuntor de transferência ou de barra dupla com disjuntor a quatro chaves e os barramentos dispostos no mesmo nível e fisicamente paralelos, deve-se aplicar o método da esfera rolante, utilizando-se cabos-guarda, já que o método do ângulo de proteção poderia requerer mastros de grandes dimensões.

Para subestações de 138 kV e acima, deve-se empregar exclusivamente o método da esfera rolante utilizando-se cabos-guarda e hastes captoras para proteção da parte superior das estruturas de concreto armado.

A seguir, será desenvolvido o Exemplo de aplicação (13.6), enfocando a proteção de uma subestação de 34,5 kV, construção ao tempo, com arranjo de barra principal e de transferência com barramentos superpostos. Na sequência, será desenvolvido o Exemplo de aplicação (13.7), destinado à proteção de uma subestação de 138 kV, utilizando-se o arranjo de barramento

simples.

### Exemplo de aplicação (13.6)

Considerando que a estrutura da Figura 13.32 representa a vista superior do barramento de uma subestação de 34,5 kV, de instalação exterior, determinar a altura da ponta do captor dos para-raios, de sorte que todos os barramentos e estruturas de concreto estejam cobertos pelo volume de proteção contra descargas atmosféricas. O SPDA foi considerado de classe II pela avaliação de risco  $R_1$ . Sabe-se que a altura útil dos postes que compõem a estrutura na qual serão instalados os para-raios é de 14 m. Utilizar para-raios de haste.

Considerando-se que todos os pontos do barramento devem ser protegidos, é necessário determinar a altura de instalação dos para-raios, primeiramente em relação à superfície de referência, que é o solo. Temos também que levar em conta uma segunda superfície de referência, admitindo um plano passando pela parte superior dos pórticos de concreto, utilizando-se uma esfera de raio de proteção  $R_e$ , cujos círculos sejam tangentes nos pontos centrais de cada módulo da estrutura, conforme a Figura 13.32.

#### a) Superfície de referência: solo

$$H_p = 14 \text{ m (altura útil do poste)}$$

Para determinarmos a altura do para-raios,  $H_c$ , devemos somar a altura do poste de concreto armado,  $H_p = 14$  m, com o comprimento de 2 metros da haste de ferro galvanizado (cantoneira em L), que está fixada no topo de cada poste de concreto armado anteriormente referido.

$$H_c = H_p + 2 = 14 + 2 = 16 \text{ m}$$

Para  $H_c = 16$  m, obtemos o ângulo de proteção no gráfico da Figura 13.16. Para o SPDA de classe II, o valor de  $\alpha = 44^\circ$ . Logo, o raio de proteção no solo vale:

$$R_{cs} = H_c \times \text{tg}44^\circ = 16 \times 0,96 = 15,3 \text{ m (raio da base do cone na superfície do solo)}$$

Assim, o volume formado pelo cone cuja base é o plano da superfície do solo fornece um raio de proteção de  $R_{cs} = 15,3$  m.

**b) Superfície de referência: plano do topo das estruturas de concreto armado**

O valor do raio mínimo da base do cone de proteção, cuja superfície é o topo das estruturas de concreto, vale:

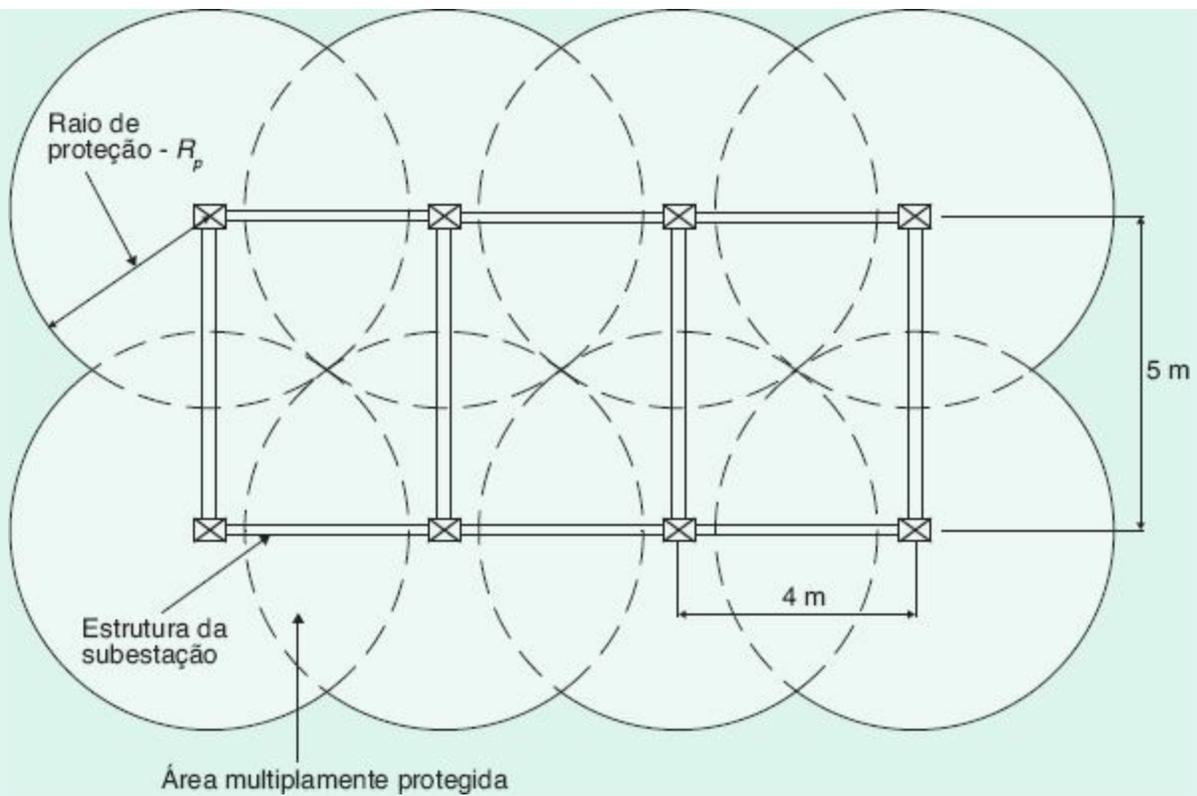
$$R_{te} = \frac{\sqrt{D}}{2} = \frac{\sqrt{5^2 + 4^2}}{2} = 3,2 \text{ m}$$

$D$  - diagonal do retângulo que caracteriza a vista superior de um módulo qualquer da estrutura do barramento, conforme a Figura 13.32.

Como os cabos do barramento e as chaves estão fixados nas vigas muito próximas ao topo dos postes de sustentação da estrutura, o ângulo de proteção é de  $\alpha_2 = 70^\circ$  (para uma haste de  $H_p = 2$  m, de acordo com o gráfico da Figura 13.16). Logo, o raio de proteção obtido vale:

$$R_c = H_c \times \text{tg}70^\circ = 2 \times 2,74 = 5,4 \text{ m} > 3,2 \text{ m (condição satisfeita)}$$

Assim, a haste de 2 m de comprimento protege toda a estrutura de concreto e os equipamentos e barramentos instalados logo abaixo, pois  $R_c > R_{te}$ .

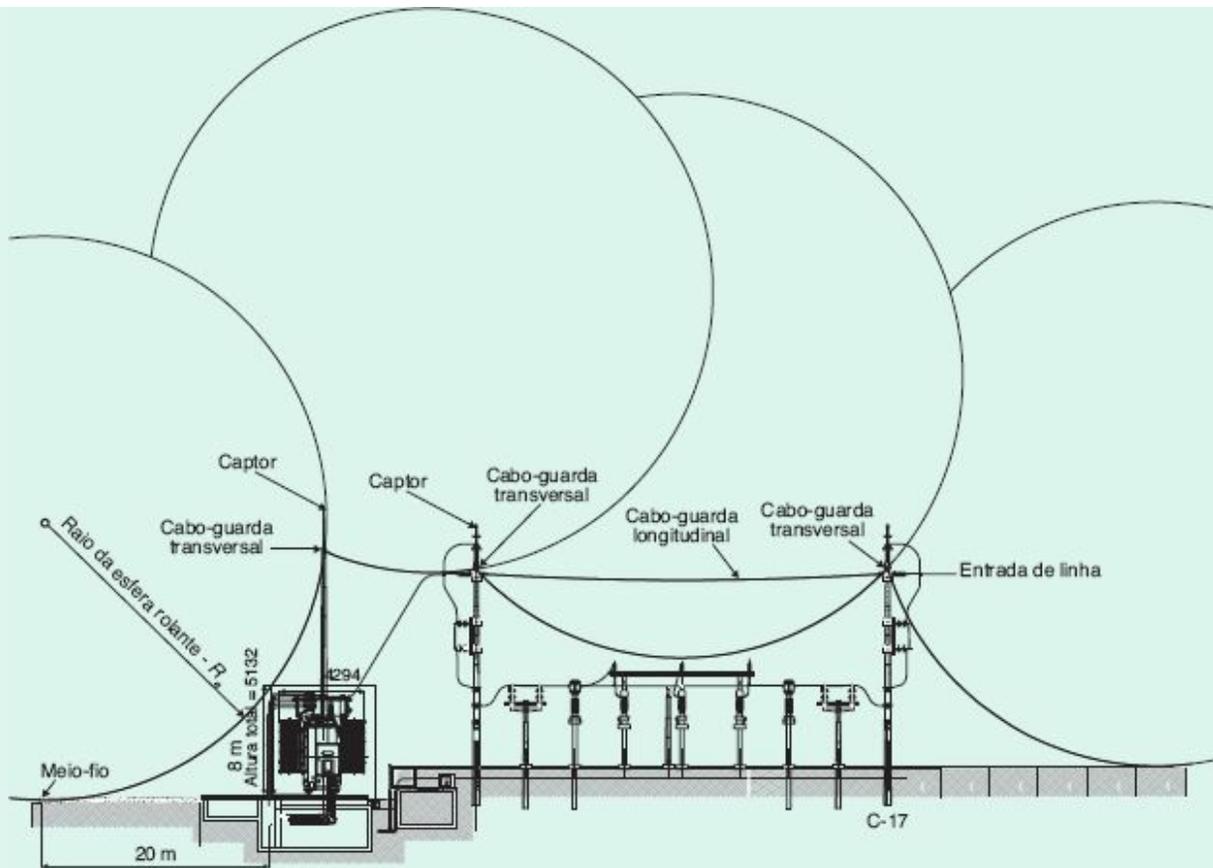


**Figura 13.32** Raio de proteção de uma estrutura de subestação de instalação exterior.

### Exemplo de aplicação (13.7)

Dimensionar um sistema SPDA para uma subestação de alta tensão, como mostra a Figura 13.33, utilizando o método da esfera rolante. Sabe-se que para a subestação de alta tensão o SPDA deve ser de classe I.

Determinação do raio da esfera rolante



**Figura 13.33** Sistema de captação de uma subestação de alta tensão pelo método da esfera girante.

Com base na Tabela 13.40, observa-se que, para o nível de proteção I, o raio da esfera rolante é de  $R_e = 20$  m.

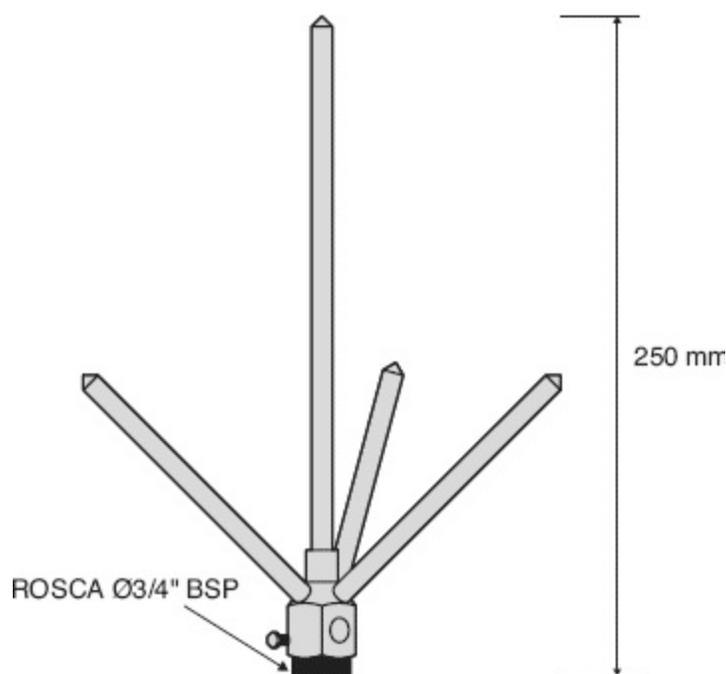
Observar na Figura 13.33 que os cabos-guarda, ou simplesmente os cabos para-raios, estão instalados tanto longitudinal como transversalmente ao comprimento da subestação. No caso, mostramos a aplicação do método da esfera rolante considerando os cabos-guarda instalados transversalmente ao comprimento da subestação. O mesmo procedimento deve ser realizado para os cabos-guarda instalados longitudinalmente à largura da subestação.

Como observamos, a esfera rolante forma um volume de proteção sobre todos os elementos da subestação. Como o topo das estruturas de concreto armado está fora desse volume de proteção, instalamos os para-raios de haste no topo dessas estruturas, que, além de

protegê-las, fornecem uma proteção adicional à subestação.

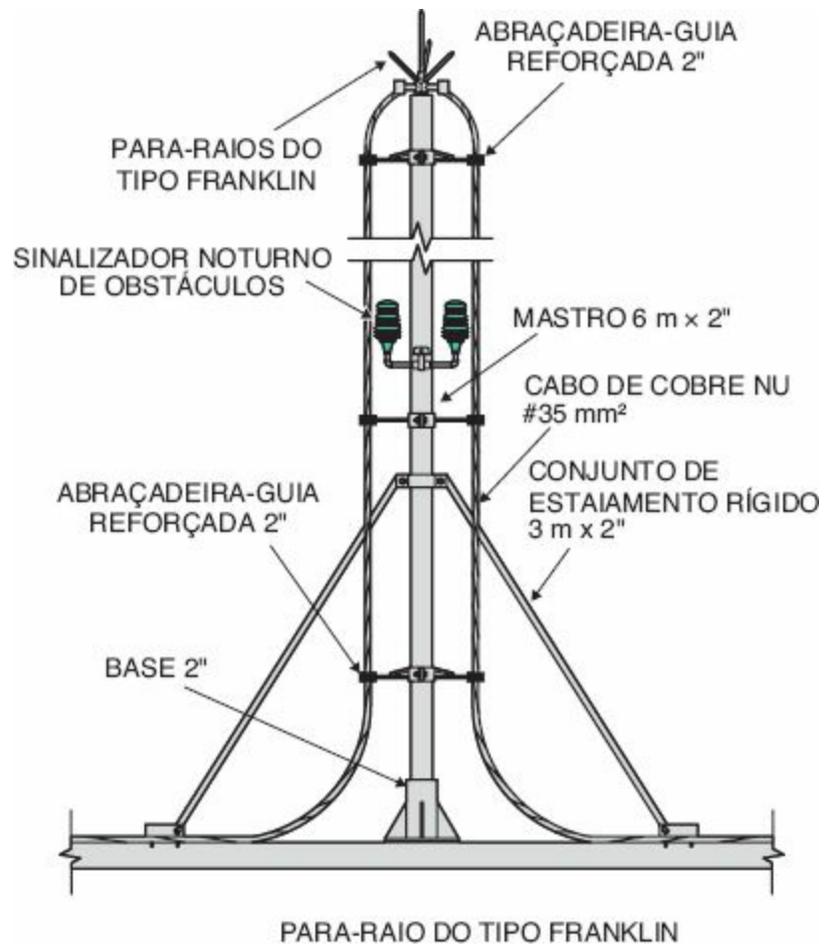
## 13.7 Acessórios e detalhes construtivos de um SPDA

a construção de um SPDA requer certa quantidade de peças acessórias disponibilizadas no mercado por fabricantes dedicados a essa atividade. A seguir, serão mostrados vários desenhos de peças mais utilizadas nos projetos de SPDA, abrangendo diferentes situações práticas. Esses conjuntos são fornecidos por diferentes fabricantes, sendo a Termotec a mais tradicional empresa do mercado nacional na fabricação e fornecimento de conjuntos completos de SPDA.

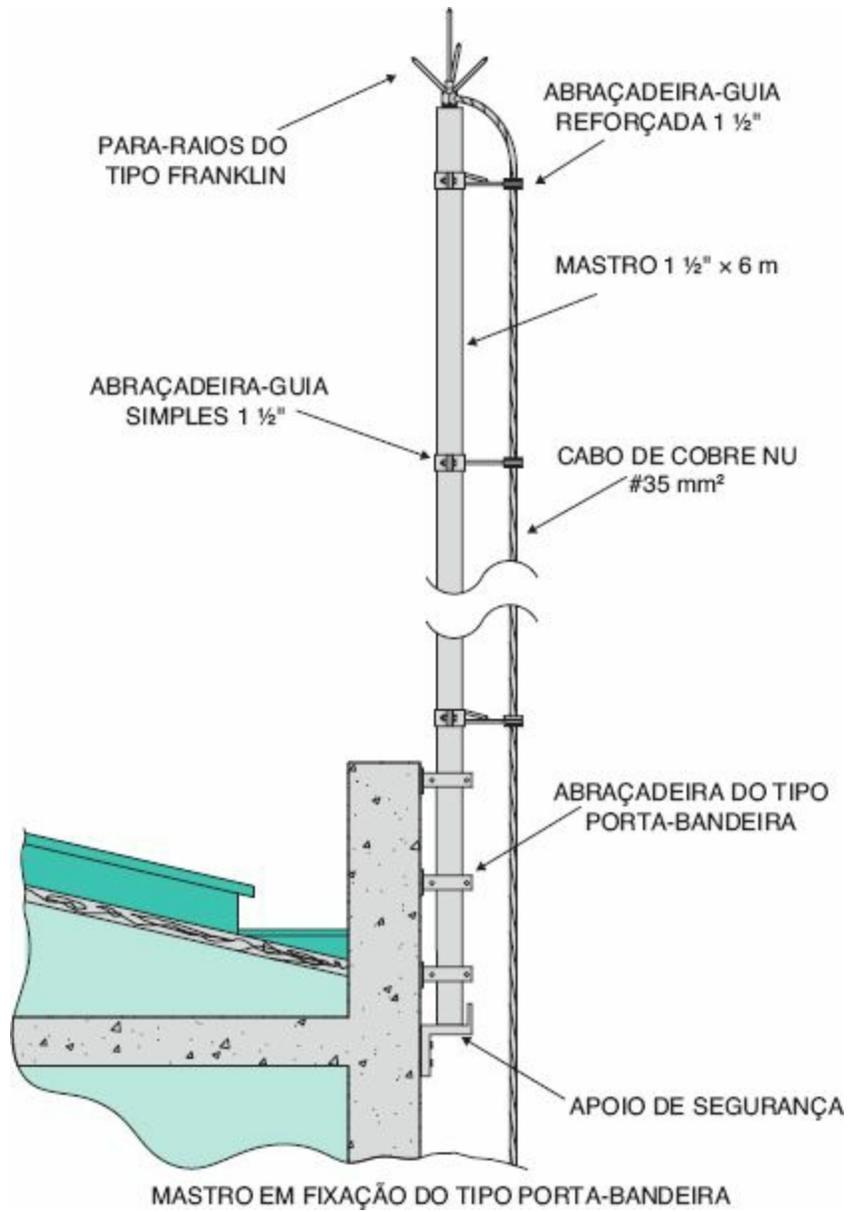


PARA-RAIOS FRANKLIN DE LATÃO CROMADO

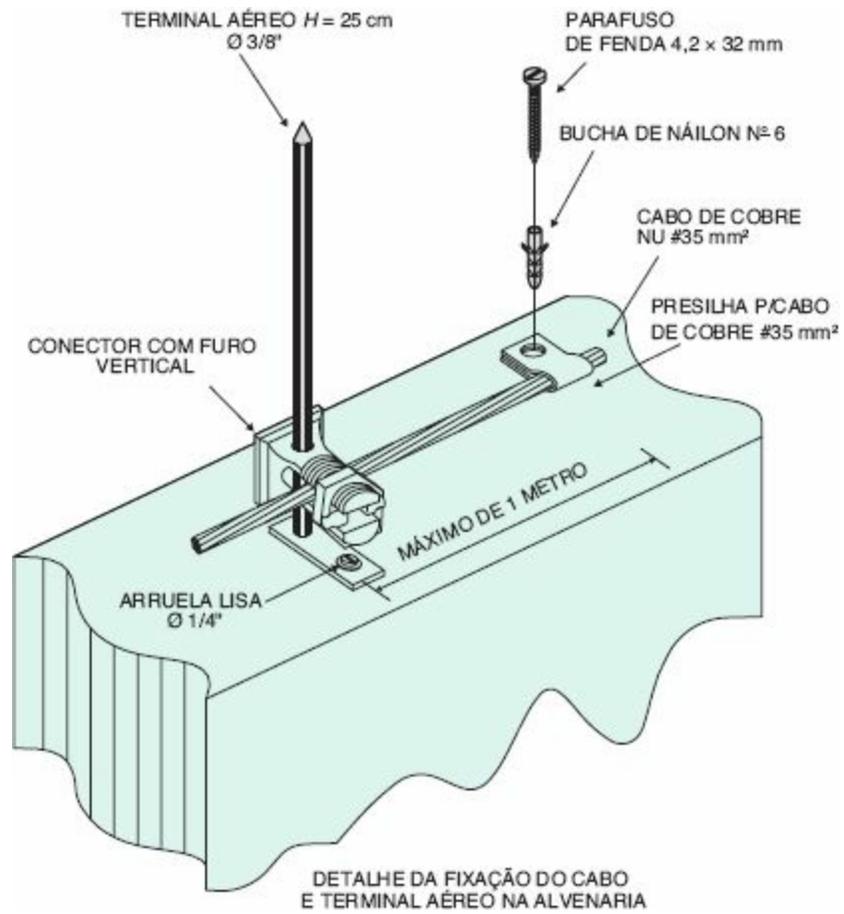
(1)



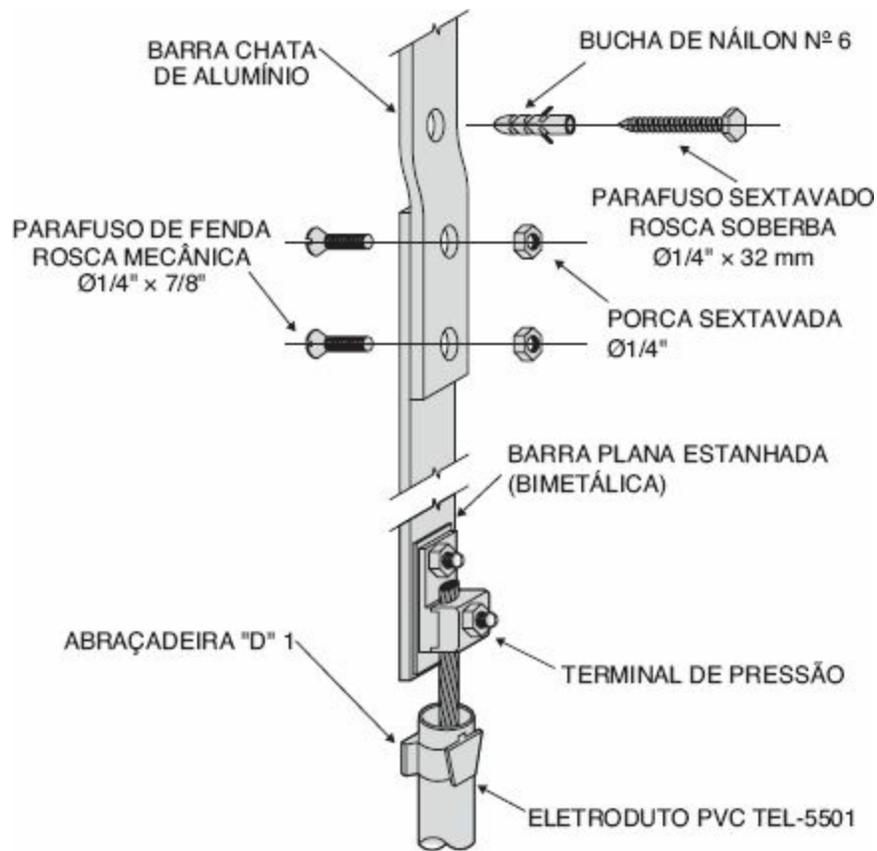
(2)



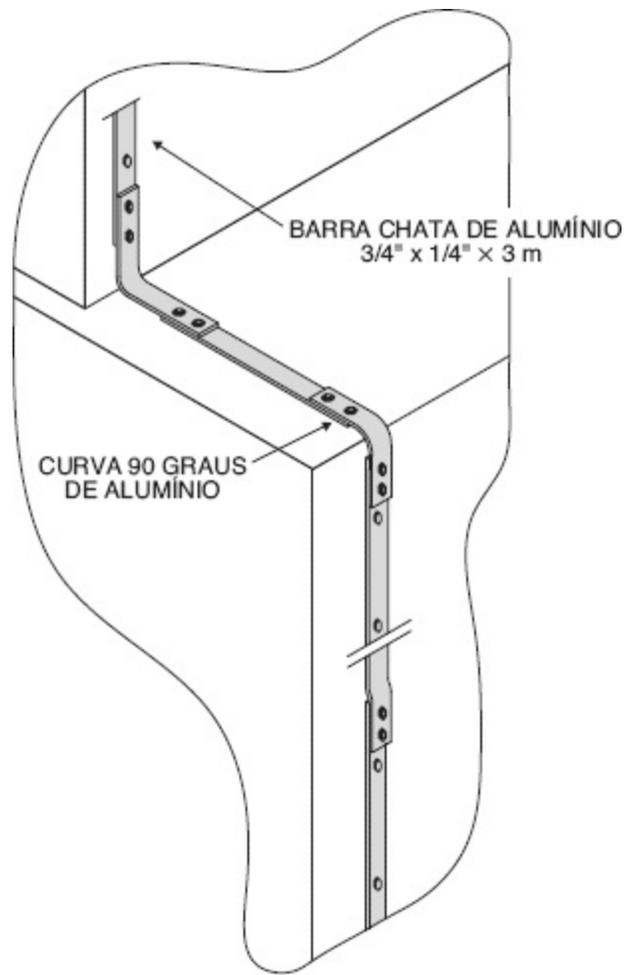
(3)



(4)

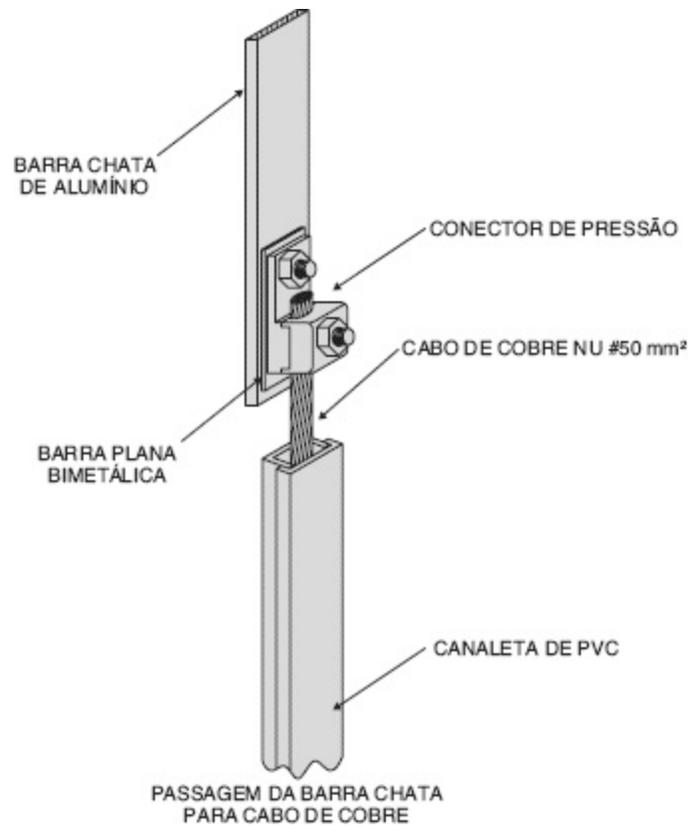


FIXAÇÃO DA BARRA CHATA DE ALUMÍNIO  
 E DERIVAÇÃO PARA CABO DE COBRE

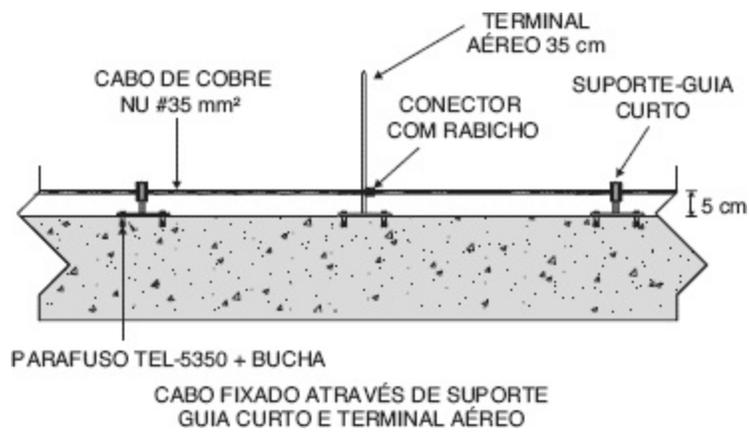


DESCIDA COM BARRA CHATA DE ALUMÍNIO

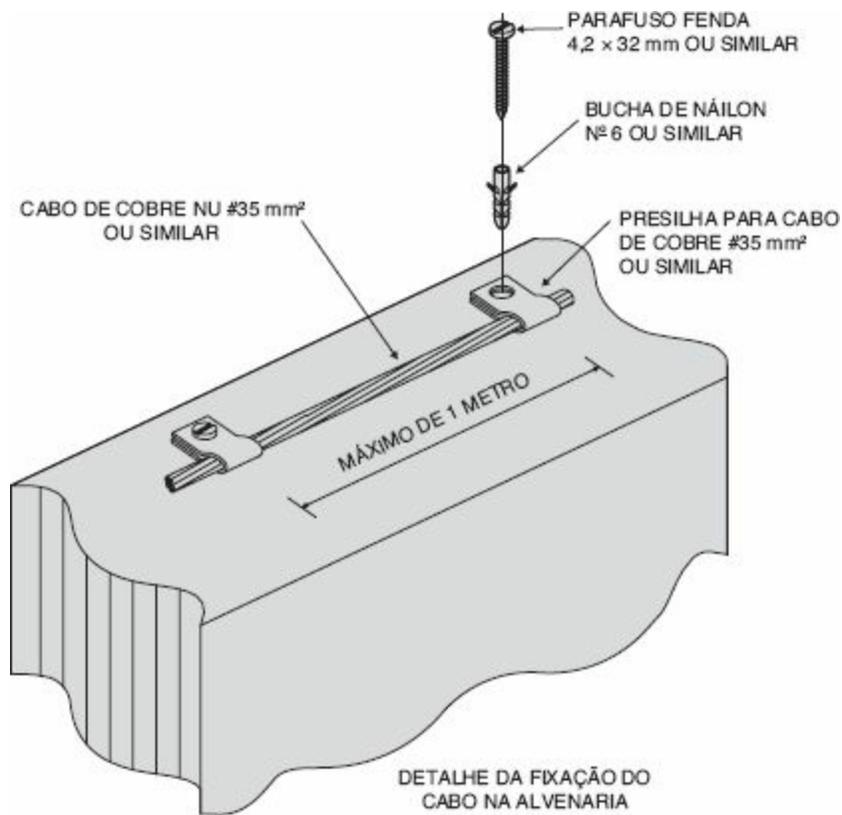
(6)



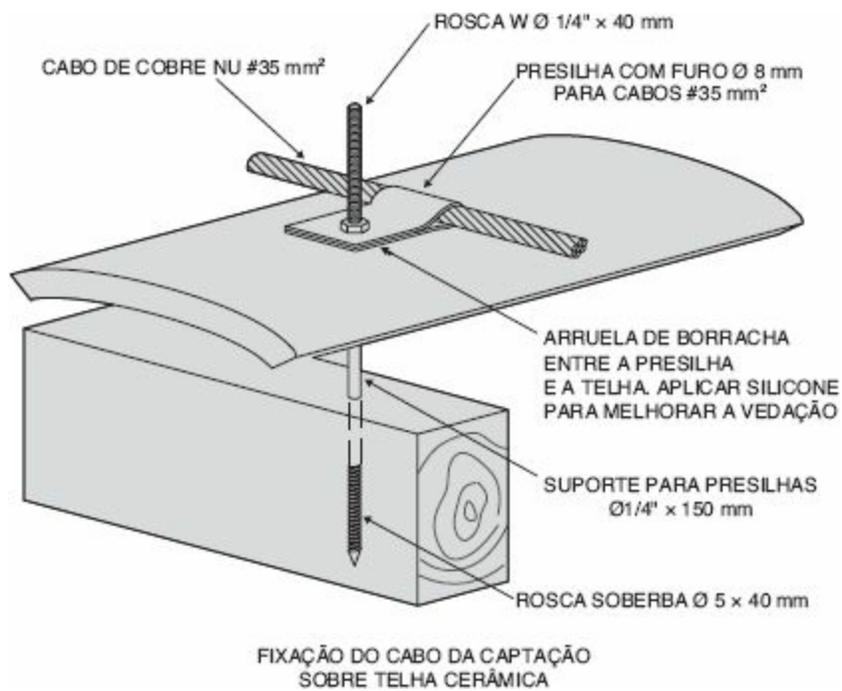
(7)



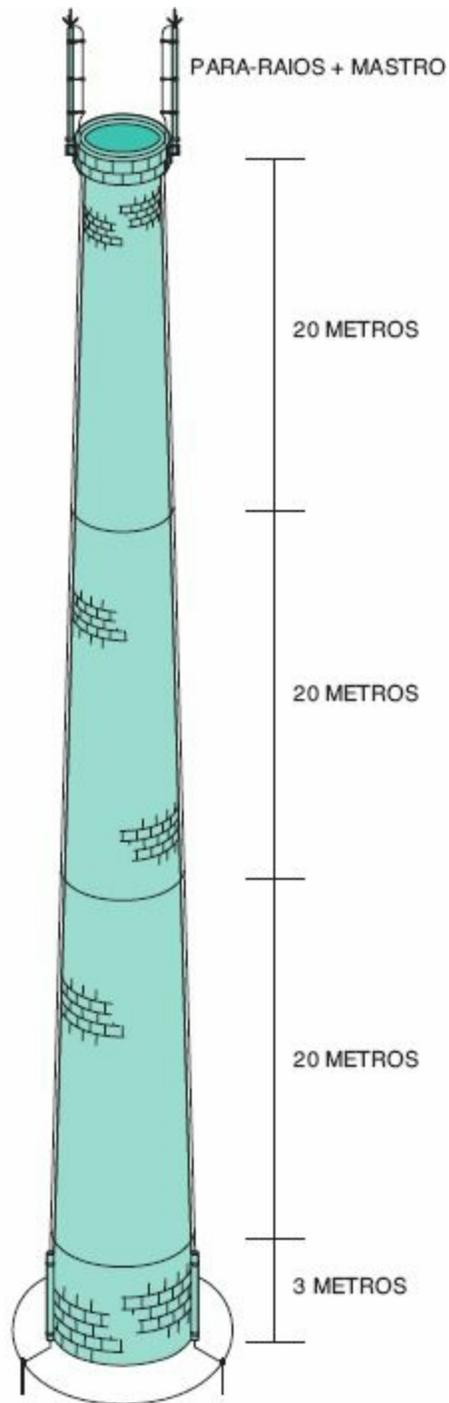
(8)



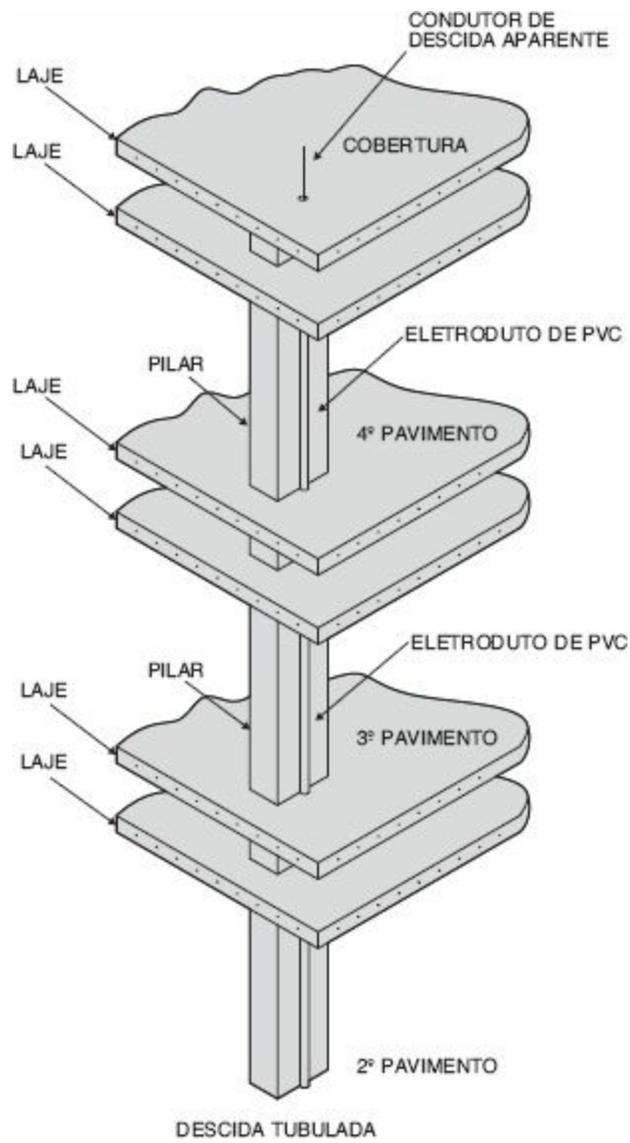
(9)



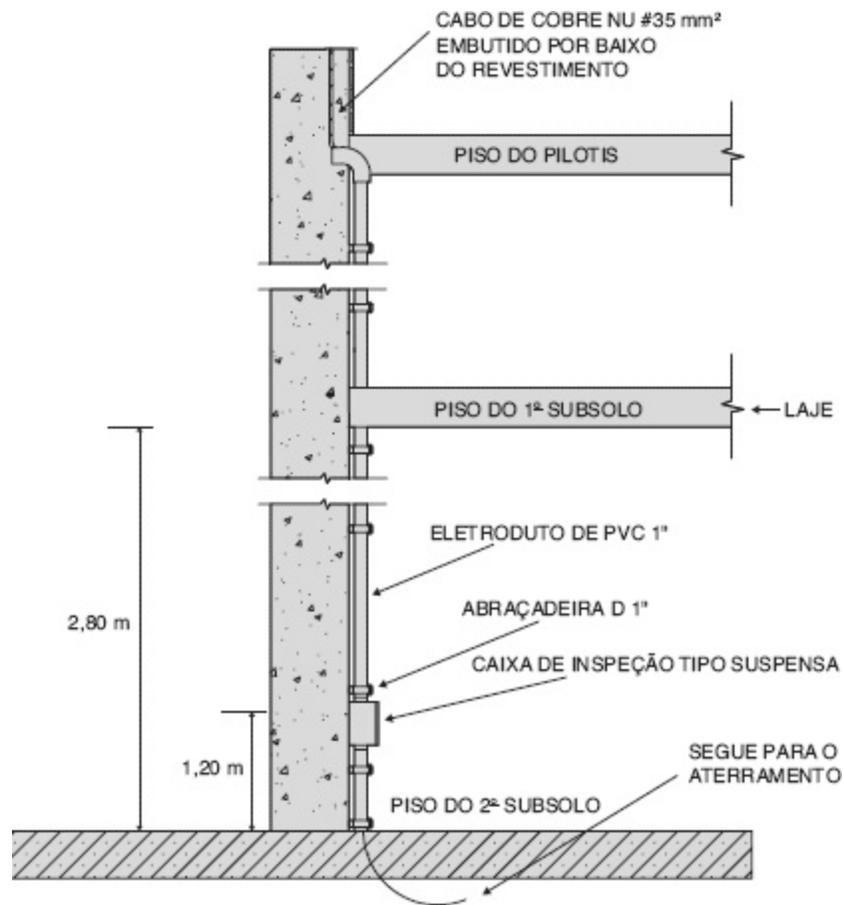
(10)



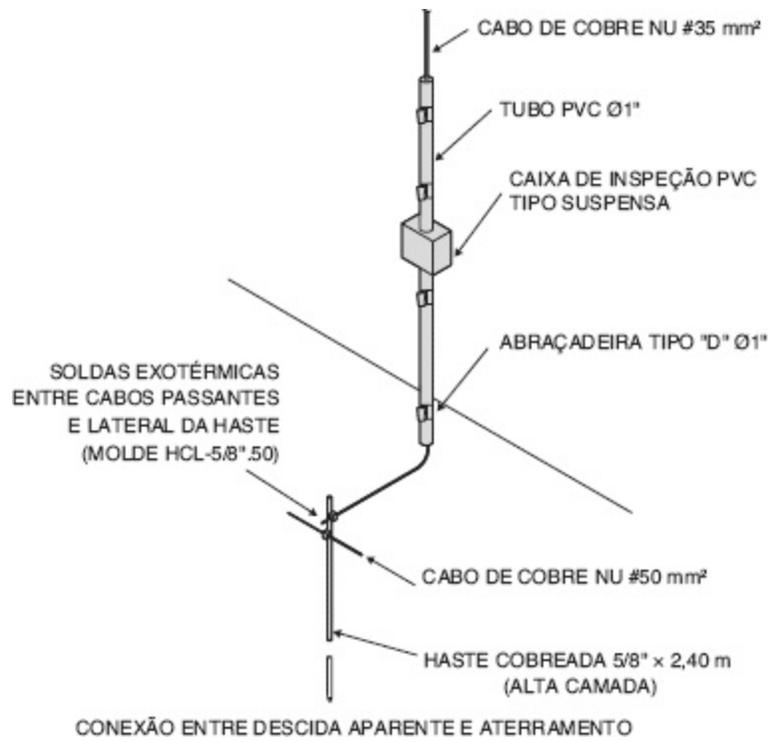
DETALHE GENÉRICO DE UMA INSTALAÇÃO EM CHAMINÉ



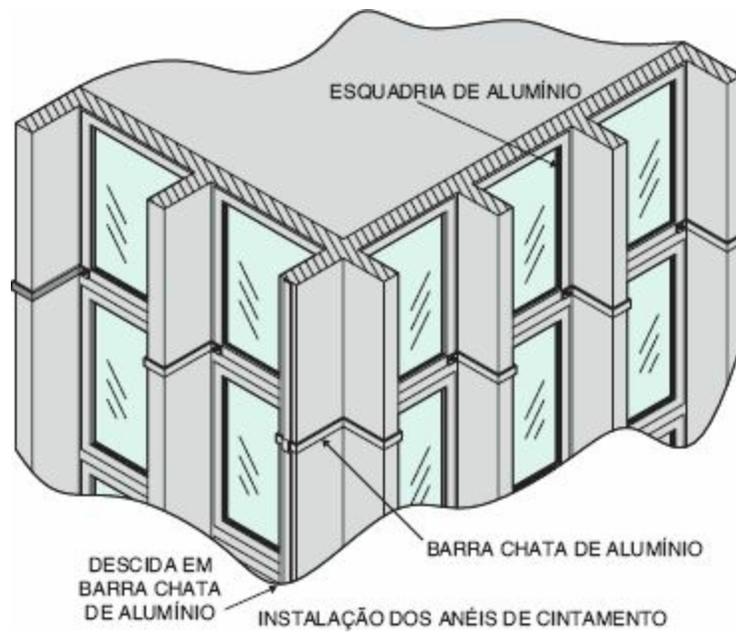
(12)



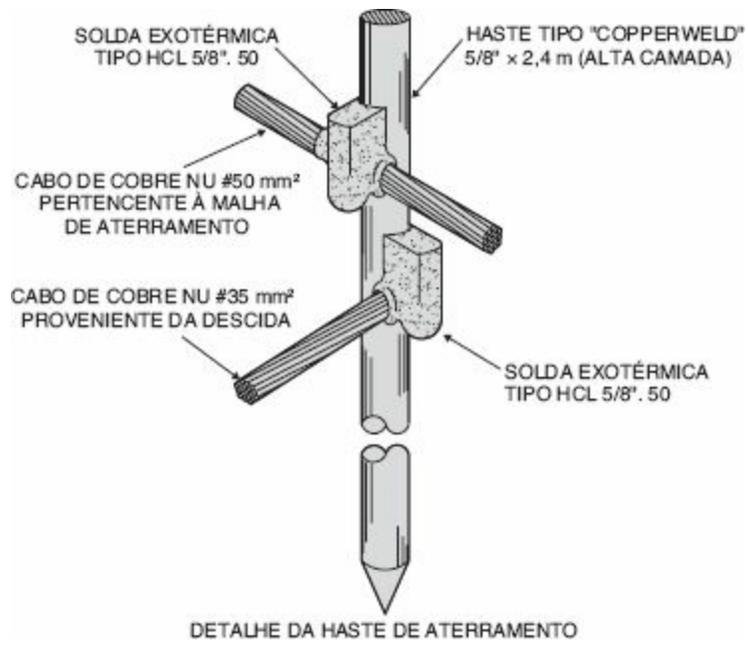
ENCAMINHAMENTO DO CABO DE DESCIDA  
 EMBUTIDO DESDE O PILOTIS ATÉ O SUBSOLO



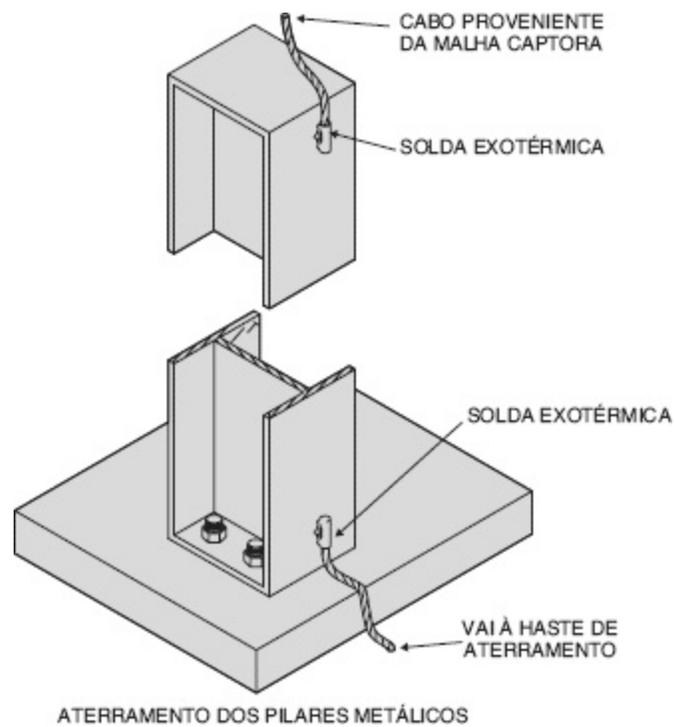
(14)



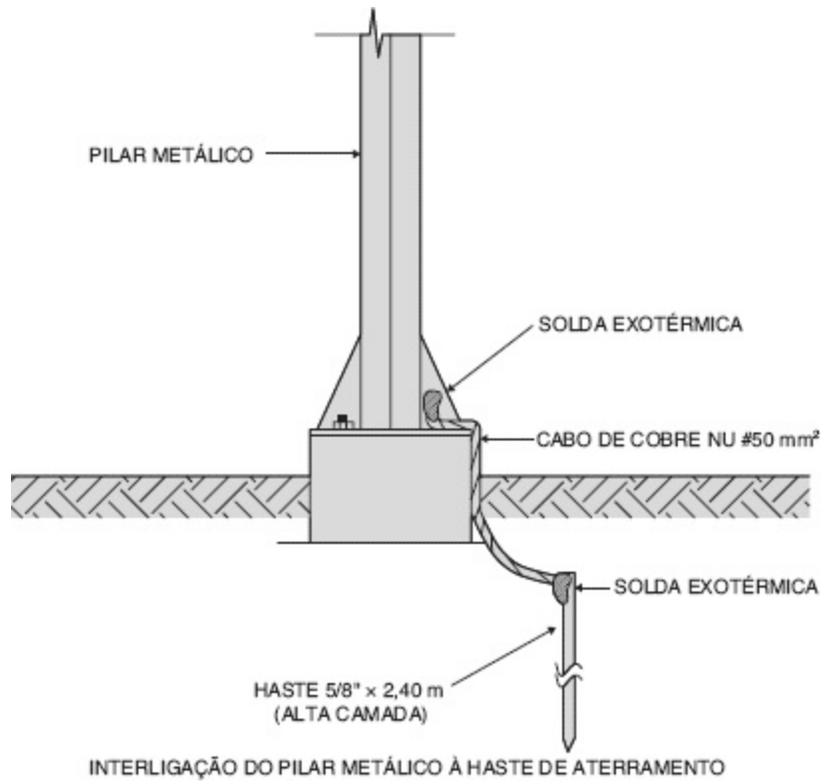
(15)



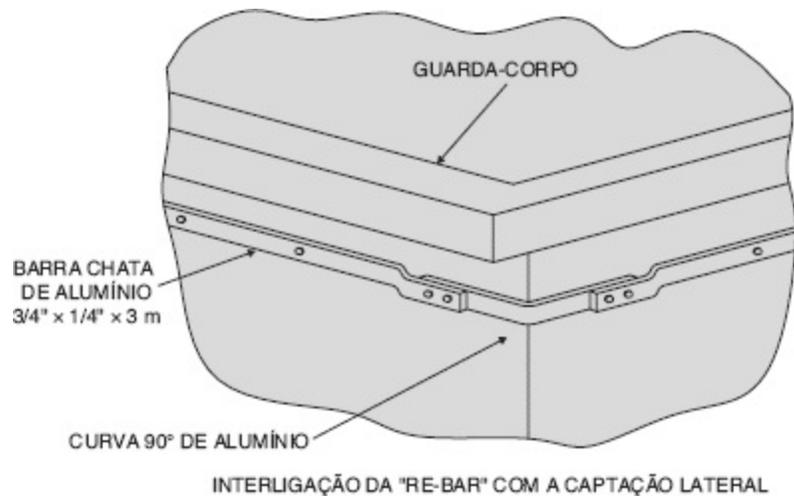
(16)



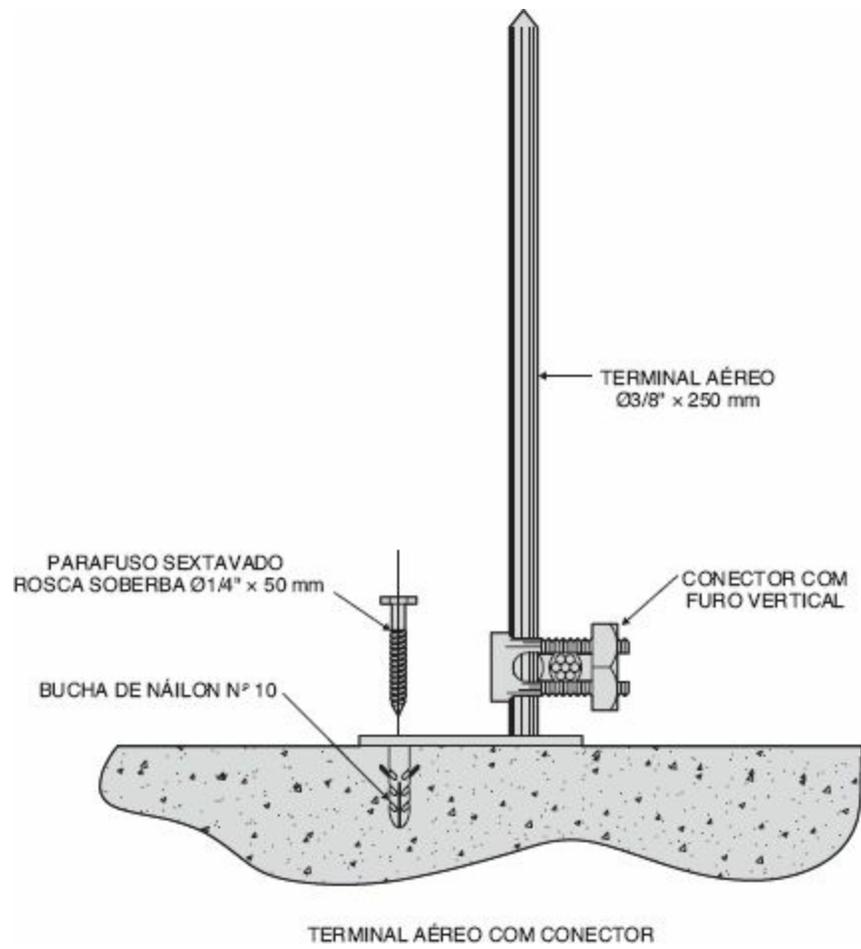
(17)



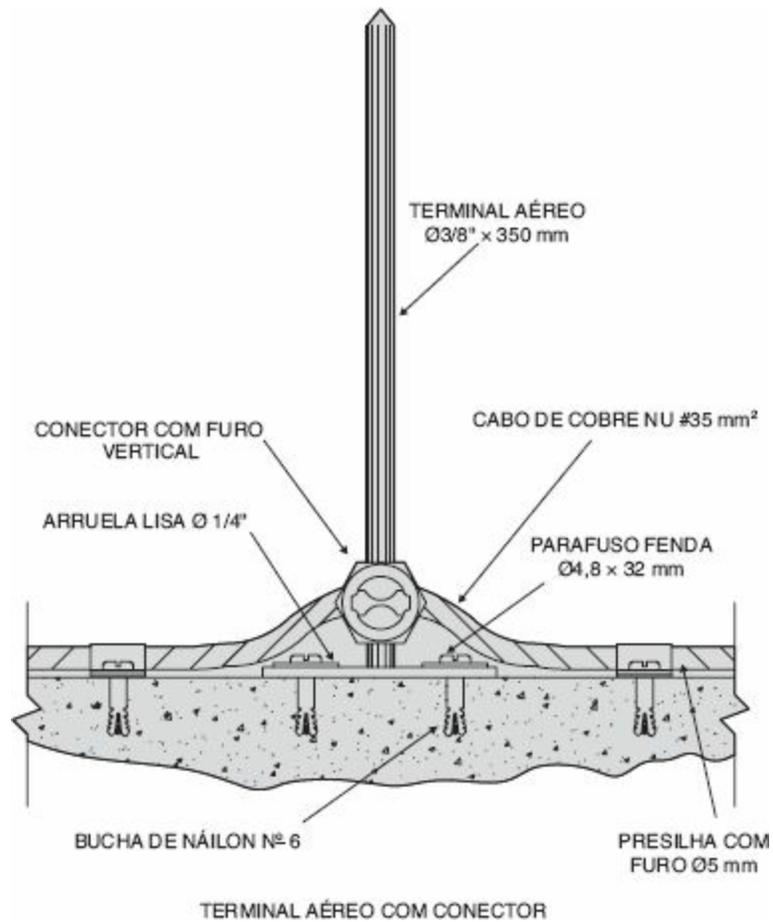
(18)



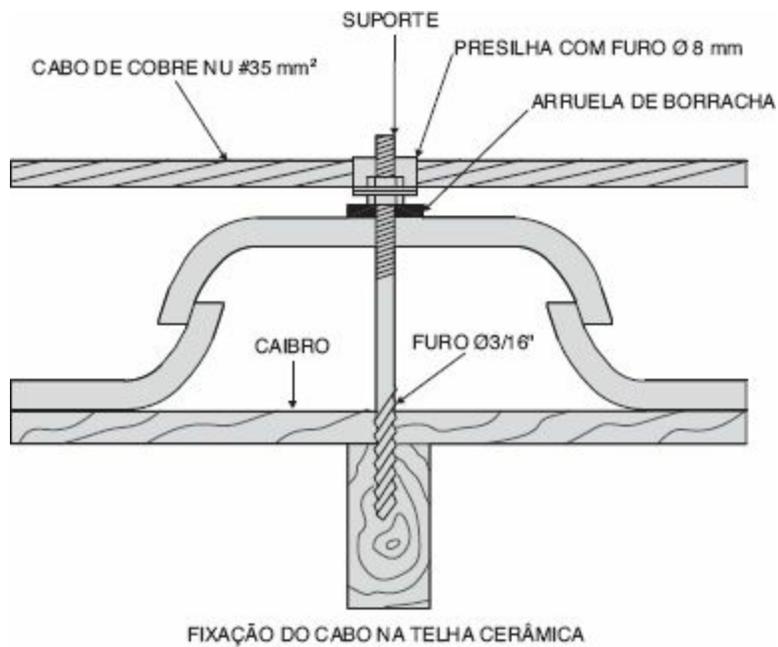
(19)



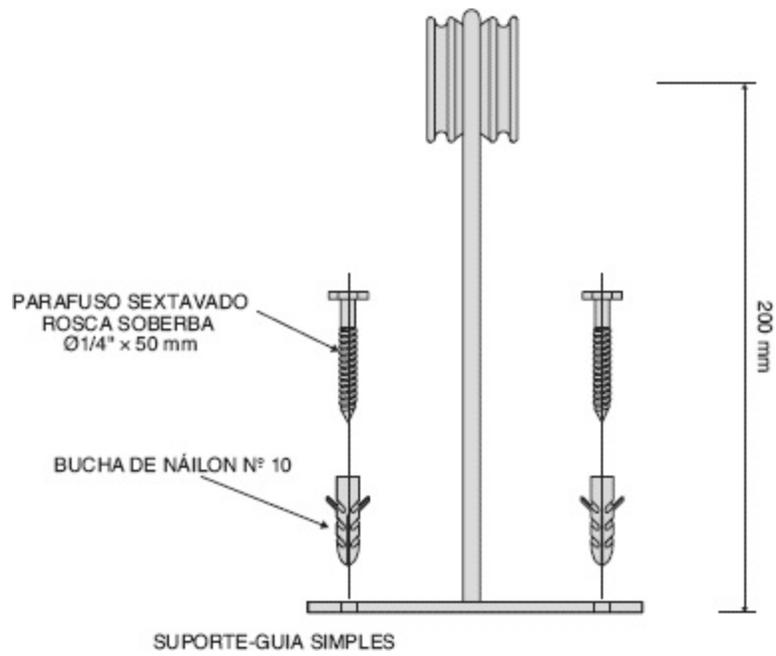
(20)



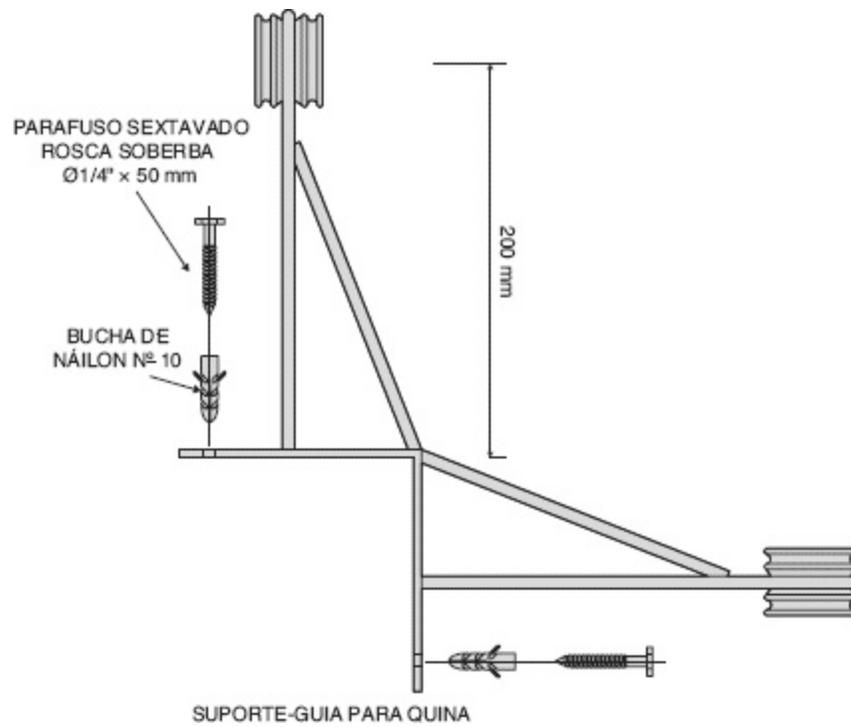
(21)



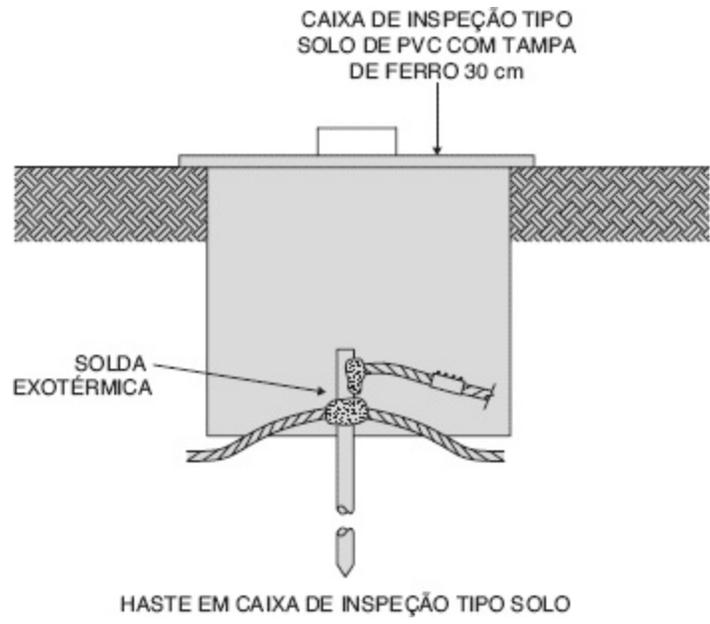
(22)



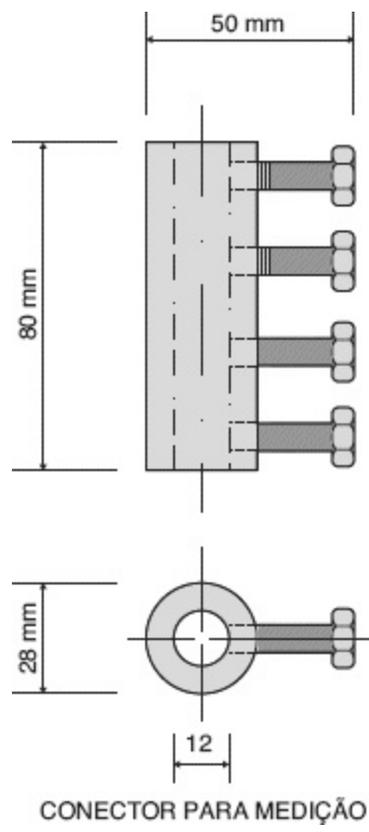
(23)



(24)



(25)

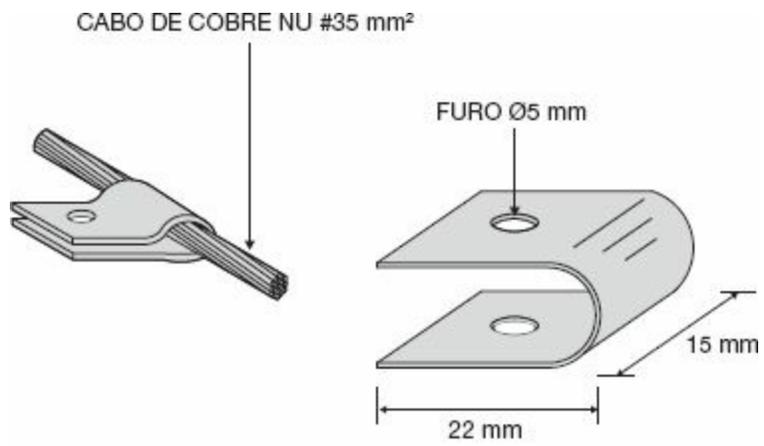


(26)



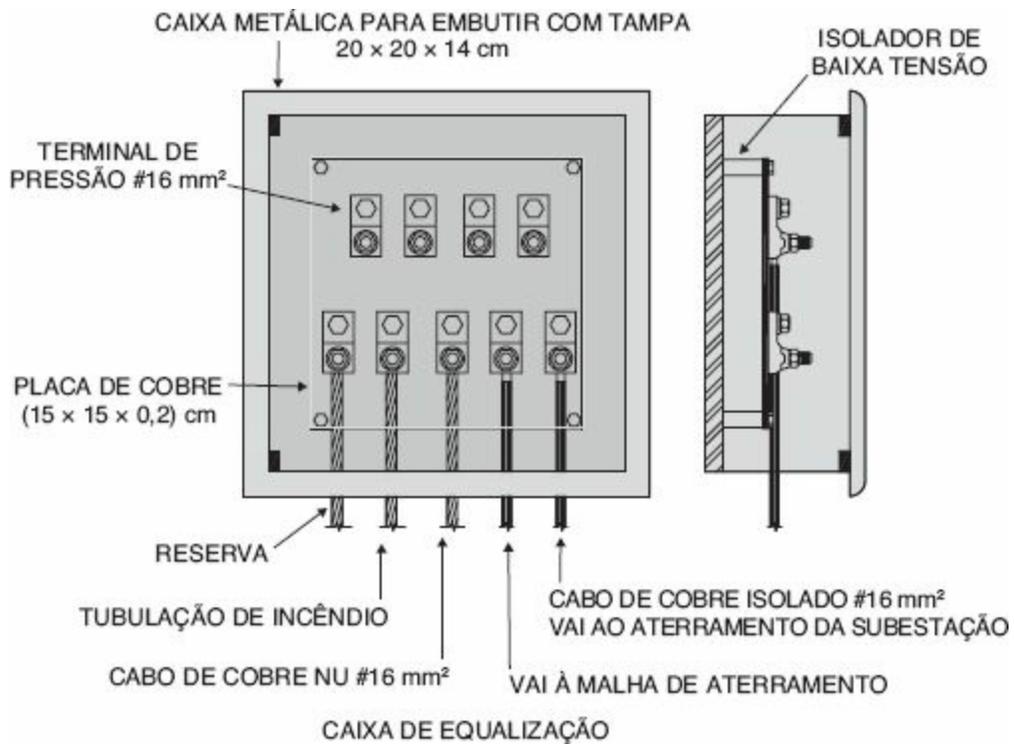
CONECTOR CABO/HASTE EMLATÃO

(27)

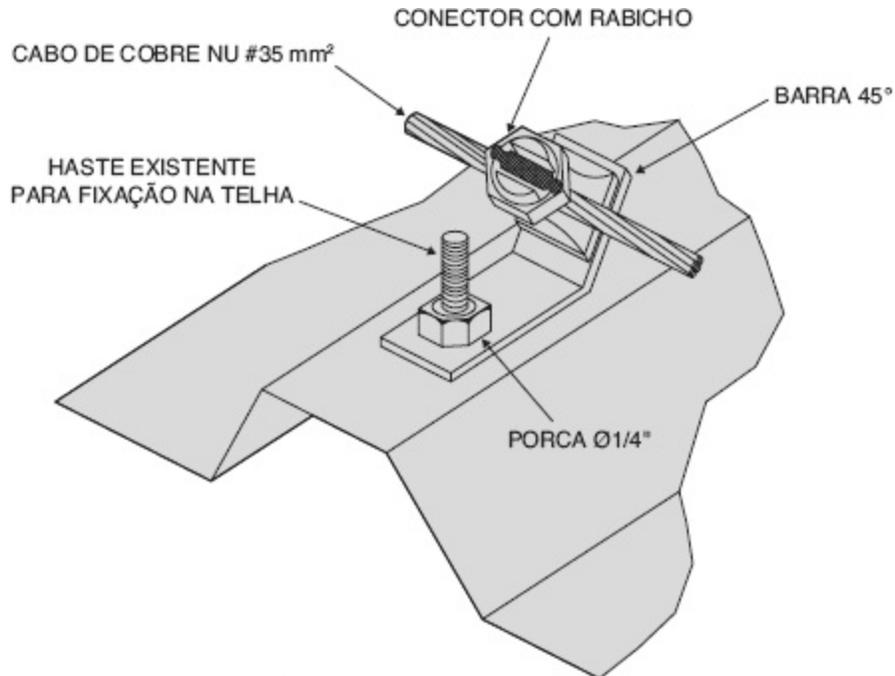


PRESILHA EM LATÃO COM FURO Ø5 mm

(28)

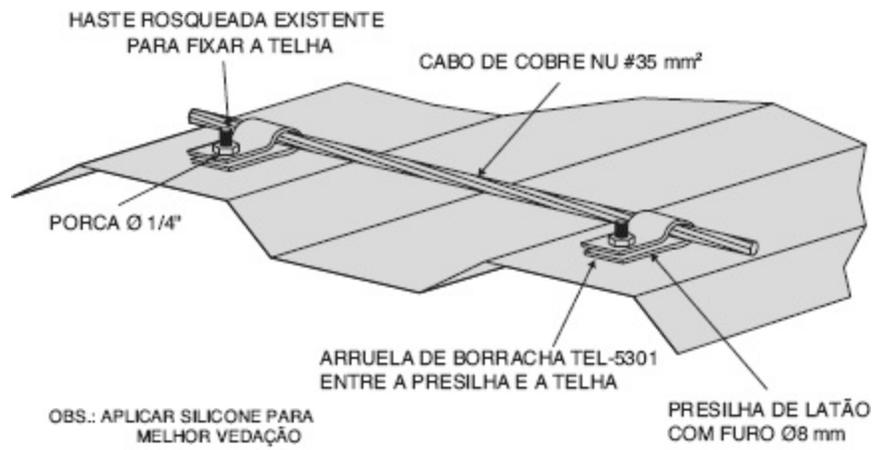


(29)



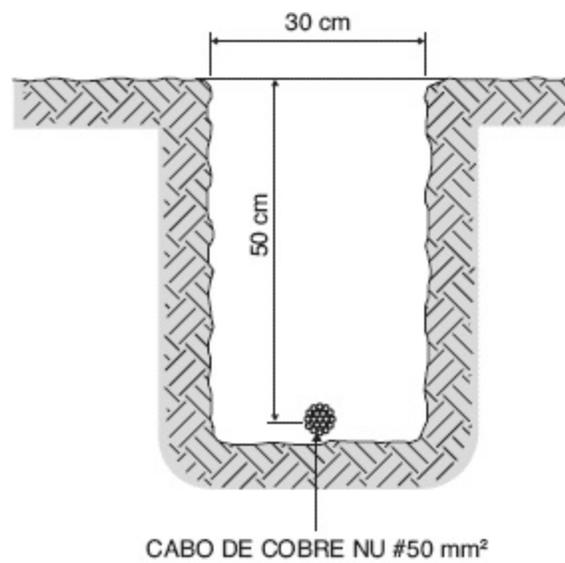
FIXAÇÃO DO CABO DE CAPTAÇÃO SOBRE  
TELHAS ATRAVÉS DA BARRA 45° E CONECTOR

(30)



FIXAÇÃO DO CABO NA TELHA METÁLICA OU DE FIBROCEMENTO  
ATRAVÉS DAS HASTES DE FIXAÇÃO DA PRÓPRIA TELHA

(31)



VALA DA MALHA DE ATERRAMENTO

(32)