

INAIL

LA PROTEZIONE DAI FULMINI DEI PARCHI AVVENTURA

2017

COLLANA **SALUTE E SICUREZZA**



INAIL

LA PROTEZIONE DAI FULMINI
DEI PARCHI AVVENTURA

2017

Pubblicazione realizzata da

Inail

Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e
Sicurezza degli Impianti Prodotti e Insediamenti Antropici

Autori

Giovanni Luca Amicucci¹
Fabio Fiamingo²
Silvana Pretola³

¹ INAIL - Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e Sicurezza degli Impianti, Prodotti e Insediamenti Antropici

² Università Campus Bio-Medico di Roma

³ Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca

per informazioni

Inail

Dipartimento Innovazione Tecnologica e Sicurezza degli Impianti,
Prodotti e Insediamenti Antropici

Via Roberto Ferruzzi, 38/40 - 00143 Roma

dit@inail.it

www.inail.it

© 2017 Inail

ISBN 978-88-7484-591-0

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nella pubblicazione, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Distribuita gratuitamente. Vietata la vendita e la riproduzione con qualsiasi mezzo.

È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

Prefazione

Secondo quanto definito dal Testo Unico sulla Sicurezza del lavoro (art. 80 del d.lgs. 81/08) è fatto obbligo al datore di lavoro di provvedere affinché i lavoratori nei luoghi di lavoro siano protetti dai rischi di natura elettrica ed in particolare dal rischio di fulminazione.

Allo scopo di eliminare o ridurre a livello accettabile i rischi, il datore di lavoro redige un documento di valutazione degli stessi sulla base del quale adotta i dispositivi di protezione collettivi e individuali necessari e predispone procedure lavorative adeguate.

Per quanto riguarda il rischio di fulminazione, ai sensi dell'art. 84 del Testo unico, si ritengono adeguate le misure di protezione adottate sulla base delle norme tecniche. Purtroppo, attualmente, le norme tecniche non forniscono indicazioni per la protezione dai fulmini di una realtà come quella dei parchi avventura.

In Italia i parchi avventura sono quasi 200, distribuiti su tutto il territorio nazionale. Nelle loro attività sono coinvolte imprese che progettano, realizzano e gestiscono tali strutture.

Con i termini *parchi avventura*, *percorsi acrobatici in altezza*, *percorsi su corde alte* e *percorsi vita sospesi* si definiscono strutture composte da percorsi aerei, tirolesi, ponti tibetani ed altri elementi, realizzati in legno, corda e cavi d'acciaio. Tali realizzazioni sono create per offrire ai visitatori la possibilità di testare le proprie capacità e l'attitudine agli sport di montagna, in modo divertente e sicuro.

Le strutture sono realizzate in genere in aree boschive, per favorire il contatto con la natura, elemento importante in questo tipo di realizzazioni, ma anche su elementi e travi artificiali, o in locali al coperto, per favorire la fruizione in ogni periodo dell'anno.

Per motivi di interesse pubblico, relativo alla tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori e dei visitatori dei parchi avventura, l'INAIL ha prodotto un contributo sul rischio di fulminazione e sulla protezione dal rischio di fulminazione in tali strutture.

Il contributo in questione, contenuto nel presente lavoro, è stato preparato dal Laboratorio Apparecchiature e Impianti Elettrici ed Elettronici del Dipartimento Innovazioni Tecnologiche dell'Istituto, in virtù della ventennale esperienza maturata nel campo della protezione dagli effetti delle scariche atmosferiche.

Tale lavoro rientra nell'ambito della ricerca obbligatoria svolta dal laboratorio stesso.

Il presente lavoro ha lo scopo di presentare:

- i possibili effetti dei fulmini sugli elementi costituenti le attrazioni;
- i possibili effetti della fulminazione sugli esseri umani;
- indicazioni per lo svolgimento della valutazione dei rischi;
- indicazioni per la scelta delle misure di protezione;
- indicazioni per la predisposizione di piani di sicurezza;
- codici comportamentali per visitatori e lavoratori in caso di temporale con fulmini;
- indicazioni di primo soccorso.

L'Inail continua a svolgere attività di ricerca e di formazione sull'argomento.

INDICE

1. Il fenomeno della fulminazione	7
1.1. Introduzione	7
1.2. Il fenomeno fisico	8
1.3. Formazione dei temporali	9
1.4. Parametri caratteristici dei fulmini	11
1.5. Cause e formazione	12
1.6. Tipi di fulmini al suolo	14
2. Danni causati dai fulmini	17
2.1. Pericolosità dei fulmini	17
2.2. Danni agli esseri umani	19
3. Effetti delle correnti di fulmine	23
3.1. Valori dei parametri delle correnti di fulmine da utilizzare per calcoli e prove	24
3.1.1. Impulso positivo	26
3.1.2. Colpo lungo	26
3.1.3. Primo impulso negativo	26
3.1.4. Impulsi susseguenti	27
3.2. Effetti termici delle correnti di fulmine	27
3.3. Danneggiamento termico nel punto d'impatto del fulmine	30
3.3.1. Il fenomeno del punto caldo in serbatoi e tubazioni	32
3.4. Scariche disruptive	33
3.4.1. Danni dovuti ad onda d'urto acustica	34
3.5. Effetti meccanici delle correnti di fulmine	34
3.5.1. Effetti degli sforzi elettrodinamici	36
3.5.2. Effetti combinati meccanici e termici	37
3.6. Tensioni indotte	37
3.7. Tensioni di contatto e passo	47
3.7.1. Tensioni di contatto	48
3.7.1.1. Misure di protezione contro le tensioni di contatto	49
3.7.2. Tensioni di passo	50
3.7.2.1. Misure di protezione contro le tensioni di passo	52
4. Protezione dai fulmini dei Parchi Avventura	55
4.1. Danni dovuti ai fulmini in un parco avventura	55
4.2. Una strategia adottabile per la protezione dai fulmini	56
4.3. Informazioni sull'approssimarsi di un temporale	58
4.4. Valutazione della necessità delle misure di protezione	59
4.5. Alcune considerazioni	62

5. Rifugi	65
5.1. Caratteristiche dei rifugi	66
5.2. Protezione contro i fulmini	68
5.3. Prevenzione delle tensioni di contatto	69
5.4. Prevenzione delle tensioni di passo	70
5.5. Rifugi metallici	70
6. Comportamenti	71
6.1. Comportamenti consigliati quando ci si trova in un rifugio o in un edificio chiuso	71
6.2. Comportamenti consigliati quando ci si trova in un campo aperto o al limitare di un bosco	72
6.3. Comportamenti consigliati quando ci si trova in montagna	73
6.4. Comportamenti consigliati quando ci si trova in un campo da golf o una radura	73
6.5. Comportamenti consigliati quando ci si trova al di sotto di una tettoia	74
6.6. Comportamenti consigliati quando ci si trova su un campo sportivo	74
6.7. Comportamenti consigliati quando ci si trova in acqua	74
6.8. Comportamenti consigliati quando ci si trova a pesca	74
6.9. Comportamenti consigliati quando ci si trova in automobile	75
6.10. Altri comportamenti consigliati	75
7. Prestare soccorso	77
7.1. Valutazione della scena	77
7.2. Valutazione dello stato di coscienza	78
7.3. Valutazione ABC	78
7.4. Rianimazione cardio-polmonare	80
7.5. Modifiche apportate alle procedure	82
7.6. La posizione laterale di sicurezza (PLS)	83
7.7. Uso del defibrillatore	84
8. Cenni di elettrofisiologia	85
8.1. Il comportamento delle cellule	85
8.2. Impedenza del corpo, tensione e corrente	86
8.3. Soglie di pericolosità	87
8.4. Effetti fisiologici	88
8.4.1. Contrazione muscolare, blocco respiratorio e fibrillazione cardiaca	88
8.4.2. Effetti termici	89
8.4.3. Effetti neurologici	89
8.4.4. Traumi da arco elettrico e traumi indiretti	89
9. Riferimenti	91

1. Il fenomeno della fulminazione

1.1. Introduzione

Il fulmine è un evento stocastico (casuale) di origine naturale.

Il suo comportamento non è ancora pienamente compreso.

Gli esseri umani hanno guardato ai fulmini sempre con timore reverenziale.

Tra le antiche civiltà la divinità in grado di controllare i fulmini è quasi sempre la più potente del pantheon (ad es.: *Enlil* tra i Sumeri, *Teshub* tra Urriti e Ittiti (figura 1), *Zeus* tra i Greci (figura 2), *Giove* tra i Romani, *Thor* tra i popoli norreni).

Sui fulmini sono stati condotti studi sin dai tempi antichi, ma anche in tempi più recenti (ad es. nel 1752 Benjamin Franklin scoprì la natura elettrica del fulmine).

In epoca moderna dagli studi sono stati ottenuti modelli fisici.



Figura 1: Teshub, IX sec. a.C., Museo Archeologico, Istanbul



Figura 2: Zeus di Smirne, 250 d.C., Museo del Louvre, Parigi (foto [36])

Le norme tecniche, messe a punto a partire da tali modelli e con le limitazioni dovute allo stato imperfetto della conoscenza attualmente posseduta, sono nate per la protezione di persone e proprietà all'interno o nei pressi di strutture ed edifici (figura 3).

Per tale motivo la loro applicazione a talune situazioni (ad es. centri ricreativi, aree sportive, aree per picnic, campi di golf) non è immediata e diretta, ma necessita di adattamenti e approfondimenti, anche se a partire dal 2000 sono allo studio integrazioni e modifiche delle norme (ad es. NFPA 780) per includere simili situazioni.

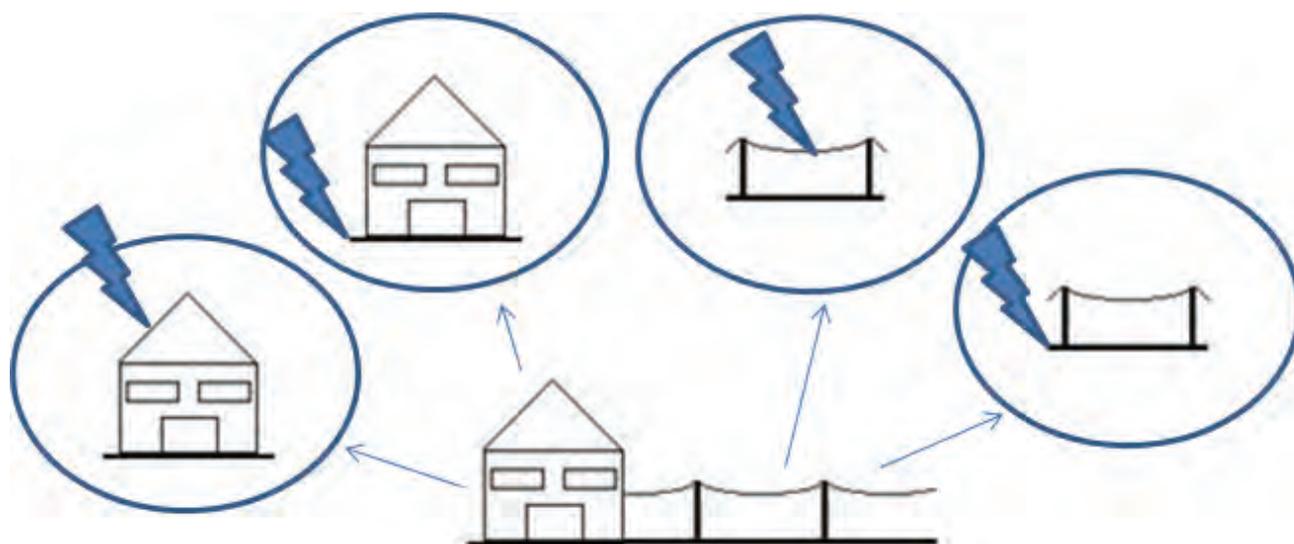


Figura 3: Classificazione delle cause di danno a seguito di fulminazione secondo le norme della serie IEC EN 62305 [6]

1.2. Il fenomeno fisico

I fulmini hanno origine dalle nubi temporalesche, che possono raggiungere dimensioni di diversi chilometri di diametro.

Le nuvole temporalesche sono attive per periodi che variano da circa 30 minuti a un'ora e mezza al massimo e durante questi periodi producono due/tre fulmini al minuto.

I fulmini possono essere tra nuvola e nuvola (quando hanno luogo tra nuvole diverse o tra parti diverse di una stessa nuvola) e tra nuvola e terra.

Generalmente i fulmini non sono costituiti da una singola scarica elettrica, ma da una rapida successione di scariche (talvolta fino a 20÷30 colpi successivi al primo – figura 4). L'intervallo di tempo tra una scarica e l'altra può oscillare tra i 5 e i 500 millisecondi, e la successione nel complesso può durare anche 1,5 secondi.

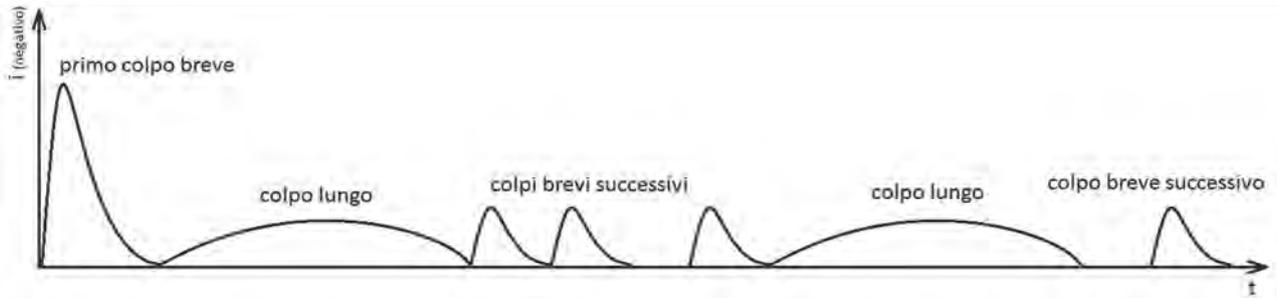


Figura 4: Esempificazione di un possibile andamento della corrente di fulmine: sono messi in evidenza il primo colpo ed i colpi successivi, oltre alla caratterizzazione in colpi brevi (impulsivi) e colpi lunghi (di durata sostenuta e intensità ridotta)

L'attività luminosa connessa al fulmine è detta lampo.

Il tuono, invece, è il rumore dovuto all'onda d'urto generata dall'espansione del canale ionizzato in seguito alla scarica.

Un osservatore distante vede il lampo prima di sentire il tuono, poiché il suono viaggia a una velocità molto inferiore (da 0,331 km/s, a 0°C, a 0,343 km/s, a 20°C) rispetto a quella della luce (300.000 km/s circa), corrispondente ad un ritardo di circa tre secondi per ogni chilometro di distanza (figura 5).

Se tra lampo e tuono passano meno di cinque secondi, il pericolo che la prossima scarica cada vicino è elevato. Se il tuono è udibile immediatamente dopo il lampo significa che il centro dell'attività temporalesca è vicinissimo, pertanto il pericolo è massimo.

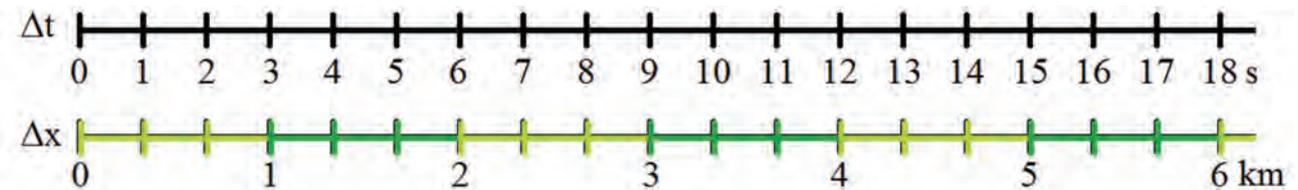


Figura 5: Calcolo approssimativo della distanza del punto di caduta di un fulmine

1.3. Formazione dei temporali

Trovarsi all'aperto durante un temporale può essere pericoloso. Per tale motivo è consigliabile, ogni tanto, dare un'occhiata al cielo.

I temporali non sono mai improvvisi: umidità e correnti di aria calda ascendente sono elementi ricorrenti. In pratica i temporali si formano quando masse d'aria umida presentano una stratificazione verticale instabile, con strati di aria calda in basso e strati di aria fredda in alto. In tali casi si forma una *colonna di aria calda ascendente*, che può essere resa tumultuosa grazie all'afflusso di vento.

A seconda del modo di formazione della corrente ascendente si hanno diversi tipi di temporali.

In Italia il tipo di temporale più diffuso è il *temporale frontale*, che si verifica quando, a causa di una perturbazione, un fronte di aria fredda giunge in un luogo dove si trova aria calda. L'aria fredda si insinua sotto quella calda spingendola a salire. Un altro tipo di temporale diffuso nella nostra penisola e favorito dalla presenza di catene montuose è il *temporale orografico*, in cui la corrente di aria calda ascendente si forma perché l'aria vicina al suolo è spinta dai venti contro terreni in salita, come i fianchi di una montagna.

Man mano che la corrente ascendente sale, la sua temperatura si abbassa ed il vapore acqueo si condensa formando una nuvola. Se l'umidità contenuta nell'aria è poca il fenomeno si esaurisce rapidamente con l'altezza, ma se l'umidità è molta allora si ha la formazione di cumuli stratificati, con uno spessore ed un diametro che possono raggiungere i 10÷12 km, ad un'altezza da terra di 2÷3 km.

Se poi la temperatura dell'aria scende al di sotto di 0°C, si ha la formazione di ghiaccio (a partire dalle goccioline d'acqua), da cui dipende lo sviluppo di grandi quantità di elettricità (come sarà chiarito nel prossimo paragrafo).

Pertanto, l'osservazione diretta permette di riconoscere alcuni segnali tipici di un temporale imminente, come nuvole cumuliformi (simili a zucchero filato), che possono evolvere in cumulonembi (figura 6). Altri segnali dell'avvicinarsi di un temporale sono:

- afa con insorgere di vento;
- tuoni o bagliori nel cielo;
- pressione atmosferica in caduta.

Nell'Italia settentrionale i temporali avvengono soprattutto d'estate; nell'Italia centrale esiste una modesta attività temporalesca praticamente tutto l'anno; nell'Italia meridionale i temporali avvengono prevalentemente in inverno [29].

Per quanto riguarda l'ora del giorno le statistiche indicano che la probabilità di temporale è più alta nel pomeriggio, quando gli strati d'aria vicini al suolo hanno raggiunto il massimo riscaldamento [29].

Tuttavia il riconoscimento dell'imminenza di un temporale (evidenza) può non essere sufficientemente tempestivo tanto da consentire di intraprendere azioni protettive, per tale motivo è utile agire preventivamente.

Tabella 1: Alcuni parametri caratteristici dei fulmini

grandezza fisica	Intervallo di valori
corrente elettrica	2÷200 kA (nella fase di scarica)
diametro della colonna di plasma	10÷50 cm
carica elettrica totale	5÷10 C (primo colpo)
differenza di potenziale	0,1÷1 × 10 ⁹ V

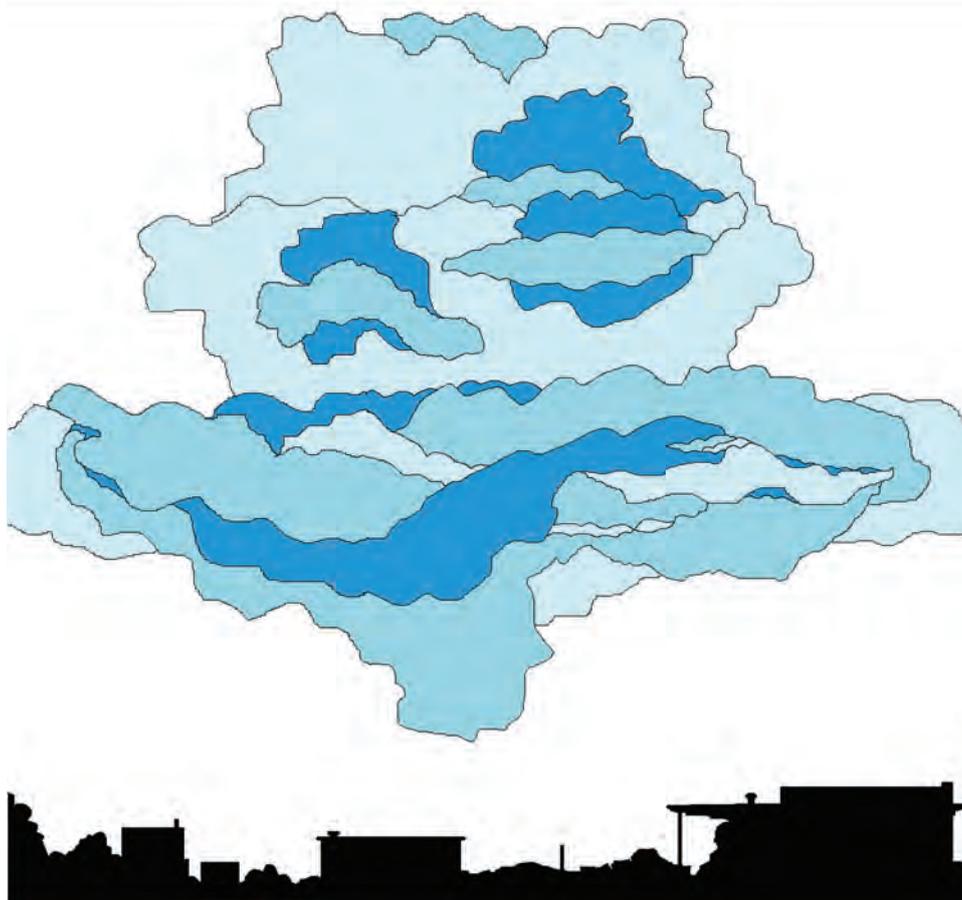


Figura 6: Rappresentazione artistica di un cumulonembo

1.4. Parametri caratteristici dei fulmini

La differenza di potenziale ai capi del fulmine dipende dalla sua lunghezza. Il potenziale di rottura dielettrica dell'aria pulita e asciutta è di 3000 V/mm, anche se poi l'umidità e il pulviscolo abbassano il valore a 400 V/mm. In tali condizioni un fulmine lungo 300 m sarà generato da una differenza di potenziale di $300 \text{ m} \times 1000 \text{ mm/m} \times 400 \text{ V/mm} = 1,2 \times 10^8 \approx 0,1 \times 10^9 \text{ V}$.

Tuttavia la pericolosità del fulmine è dovuta più che alla tensione, alla corrente che scorre nel canale d'aria ionizzata, infatti tale canale è un ottimo conduttore e permette il passaggio di correnti di migliaia di ampere (si ricordi che, tipicamente, correnti di 20 mA possono già essere sufficienti per causare danni fisiologici durante il passaggio attraverso il corpo umano).

Indicazioni dettagliate sulla distribuzione statistica dei parametri di fulmine e un gran numero di questi possono essere trovati nella norma [6]

1.5. Cause e formazione

La scarica di un fulmine a terra è un tipico fenomeno elettrostatico che avviene quando la differenza di potenziale tra nube e suolo supera la rigidità dielettrica dell'aria. Il fulmine colpisce anche vicino alla nube temporalesca, non necessariamente sotto, e anche se non piove.

Nella maggioranza dei casi, le cariche in una nube si dividono in cariche negative, trasportate nella parte bassa della nube, e cariche positive, trasportate nella parte alta. La divisione è dovuta all'elettrizzazione per strofinio, a causa degli urti tra particelle d'acqua e cristalli di ghiaccio nella nube stessa. Tuttavia, anche l'impatto di particelle cariche provenienti dal vento solare può provocare la separazione forzata delle cariche nelle parti alte della nube.

Differenze di temperatura, pressione e umidità generano venti che contribuiscono ad allontanare le cariche tra di loro. L'accumulo di carica negativa nella parte bassa di una nube induce al suolo una carica positiva (*modello a condensatore*).

Si consideri come esempio un *fulmine discendente negativo* (caso più diffuso).

La scarica non avviene in modo istantaneo ma progressivo.

Quando la differenza di potenziale supera un certo valore, dalla nuvola ha inizio un canale ionizzato (detto canale discendente o di *prescarica*) che avanza a tratti verso il suolo (figura 7), con avanzamenti rapidi dell'ordine dei 20÷50 metri e pause dell'ordine di 20÷50 microsecondi (la velocità media dell'avanzamento è di circa 1 metro/microsecondo).

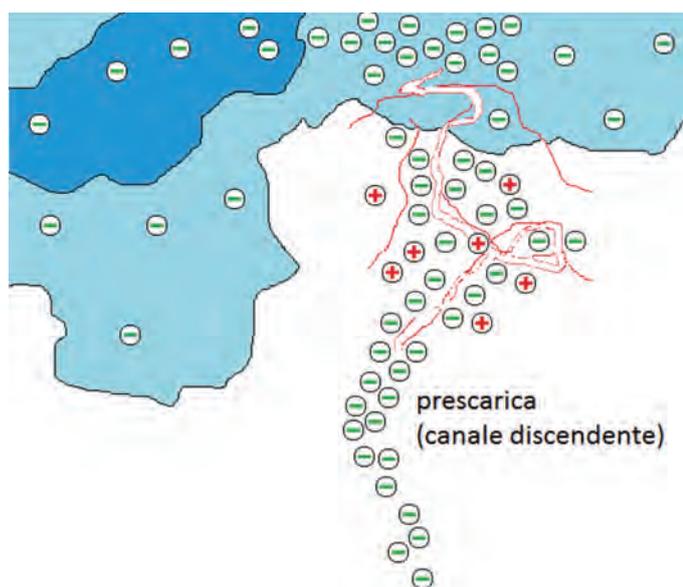


Figura 7: Formazione della prescarica

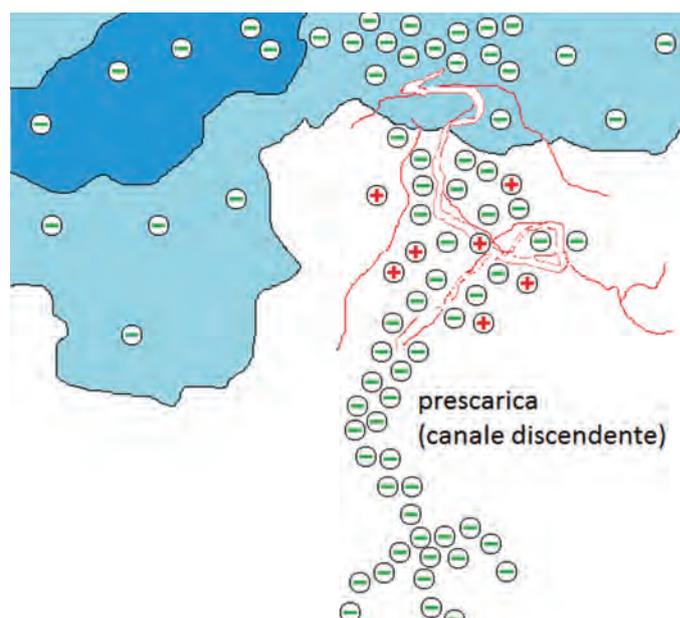


Figura 8: Formazione della controscarica

Quando il canale discendente raggiunge i 100 m di altezza dal suolo, in corrispondenza di strutture alte e snelle, si ha un fenomeno di effluvio (*effetto corona*), detto anche canale ascendente o *controscarica*, che si sviluppa dal basso verso l'alto (figura 8).

Quando il canale ionizzato discendente, che appare debolmente luminoso e presenta irregolarità di percorso e ramificazioni, raggiunge il canale ascendente (a circa 15÷50 m d'altezza), fluisce una corrente elevata (*primo colpo* – figura 9).

Il punto da cui è partita la controscarica è quello fulminato.

La corrente di fulmine che inizia a fluire è dovuta alla scarica quasi completa del canale ionizzato (*scarica di ritorno*), che inizia dal suolo e si propaga verso la nube (con una velocità massima che può raggiungere e superare il 10% di quella della luce), rendendo via via più luminoso il condotto del fulmine e le sue ramificazioni (figura 10).

La carica accumulata nella nuvola è di qualche migliaio di coulomb, mentre quella portata a terra dal primo colpo è di pochi coulomb. Ciò può dar luogo a *colpi*

successivi, a seguito della ricarica del canale di fulmine. Tali colpi avvengono senza scatti e con velocità più alta, poiché il vecchio canale è ancora ionizzato.

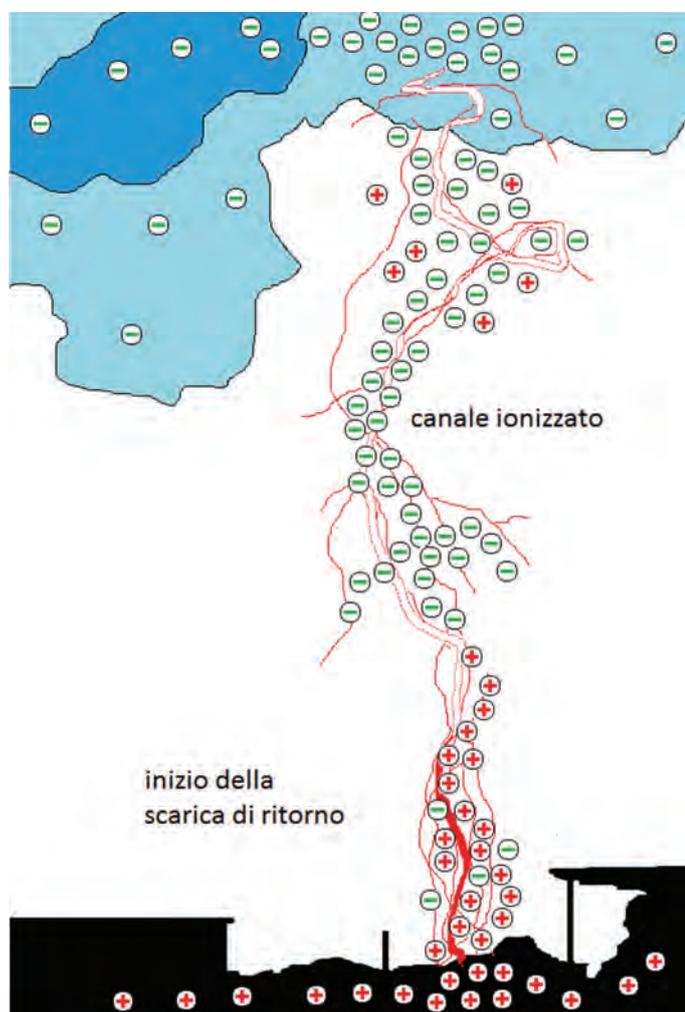


Figura 9: Inizio della scarica di ritorno

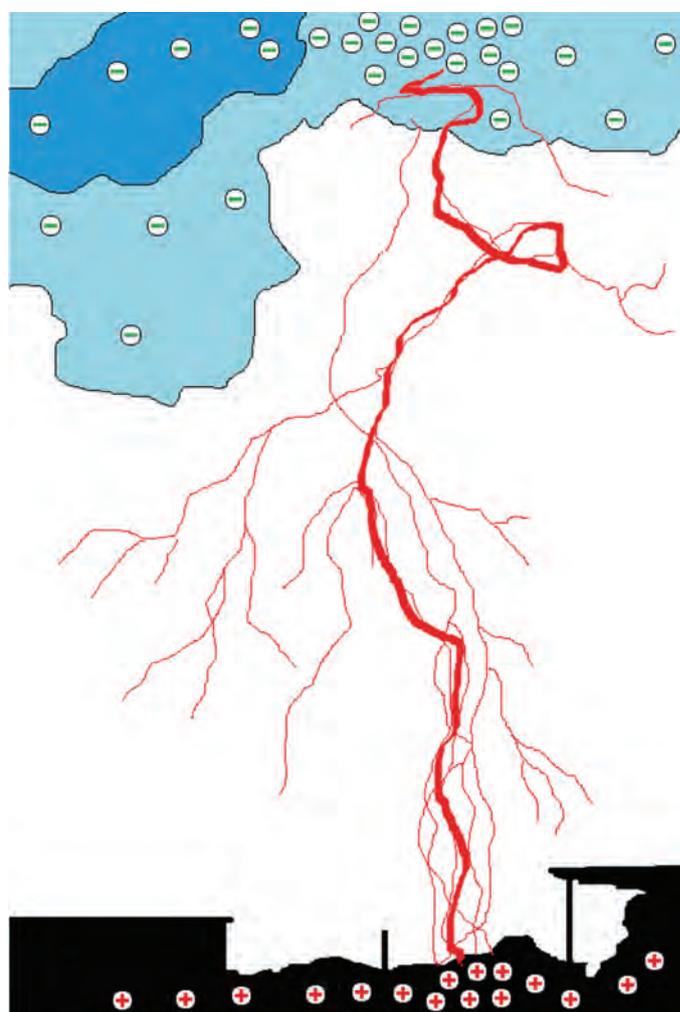


Figura 10: Scarica di ritorno

1.6. Tipi di fulmini al suolo

La polarità di un fulmine è, convenzionalmente, quella della carica posseduta dalla parte della nube con la quale avviene lo scambio di cariche.

Con tale convenzione il 90% circa dei fulmini ha polarità negativa, mentre il 10% ha polarità positiva.

La principale differenza tra fulmini positivi e negativi è dovuta al fatto che i fulmini negativi sono spesso costituiti da più colpi, mentre quelli positivi da un solo colpo. Infatti, poiché la carica positiva è di solito situata nella parte alta della nube, il canale ionizzato dei fulmini positivi ha sempre lunghezze notevoli e la scarica di ritorno impiega più tempo per neutralizzare la carica in esso depositata. Per tale motivo le parti più vecchie del canale si raffreddano, si deionizzano e viene meno la possibilità di formazione di colpi successivi.

I *fulmini discendenti* sono fulmini da nube a terra (figure 11 e 12), per i quali la formazione del canale ionizzato inizia dalla nuvola e si propaga verso il suolo. Questo tipo di fulmine si verifica per lo più su aree pianeggianti e in corrispondenza di costruzioni basse.

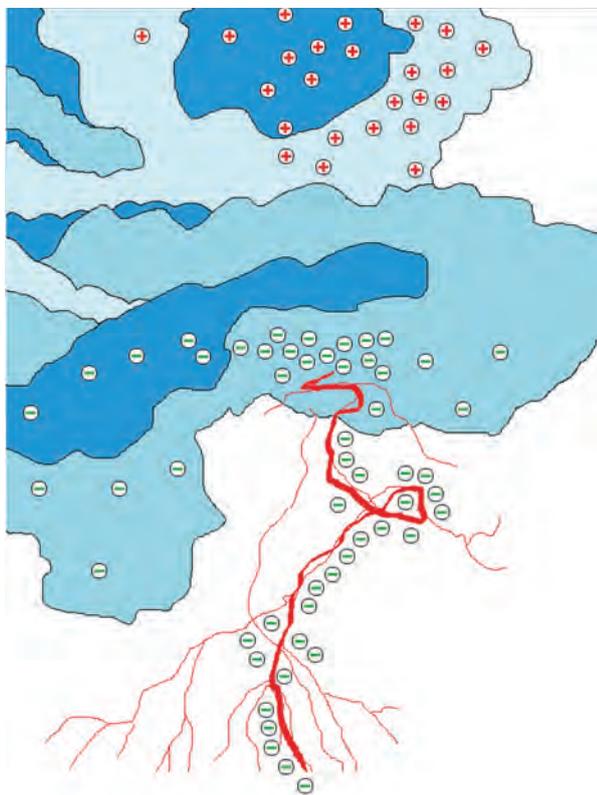


Figura 11: Fulmine negativo discendente

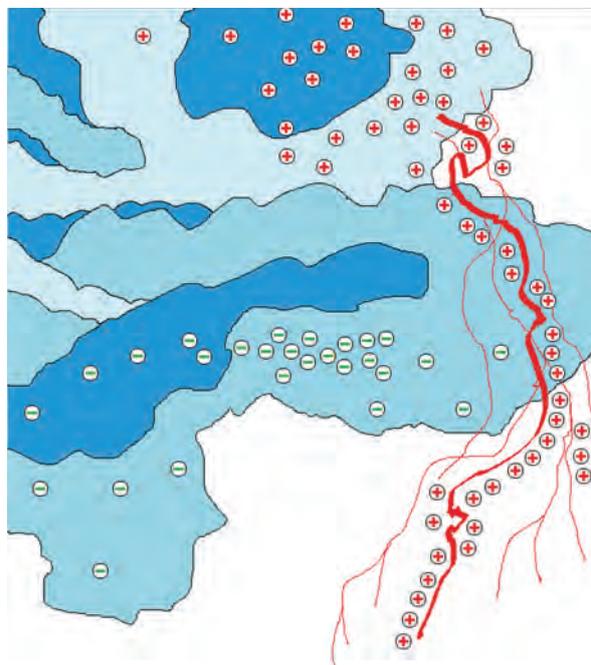


Figura 12: Fulmine positivo discendente

Nel caso dei fulmini ascendenti, cioè da terra a nube (figure 13 e 14), il canale ionizzato può avere origine in corrispondenza di oggetti al suolo, esposti e di altezza considerevole (superiore a 60÷80 m, come turbine eoliche, tralicci, antenne, torri per telecomunicazioni, campanili di chiese) o in corrispondenza delle vette di montagne.

Infatti in presenza di nubi temporalesche, su tali strutture si verificano campi elettrici di intensità tale da superare la rigidità elettrica dell'aria.

Al canale ascendente, provocato dall'intenso campo al suolo, non sempre fa riscontro una controscarica dalla nube. Infatti le cariche nella nube sono immerse in un dielettrico (l'aria) e, pertanto, non hanno la mobilità che hanno in un mezzo conduttore (come il terreno). In tal caso le cariche si disperdono in aria (effluvio),

esaurendo il fenomeno in qualche decimo di secondo, con correnti di qualche kiloampere senza che si sia avuta una scarica di ritorno. Altre volte il canale ascendente incontra canali di scarica tra nubi o canali discendenti in formazione. In tali casi può avvenire la scarica di ritorno, con correnti dello stesso ordine di grandezza di quelle che si hanno nei fulmini discendenti.

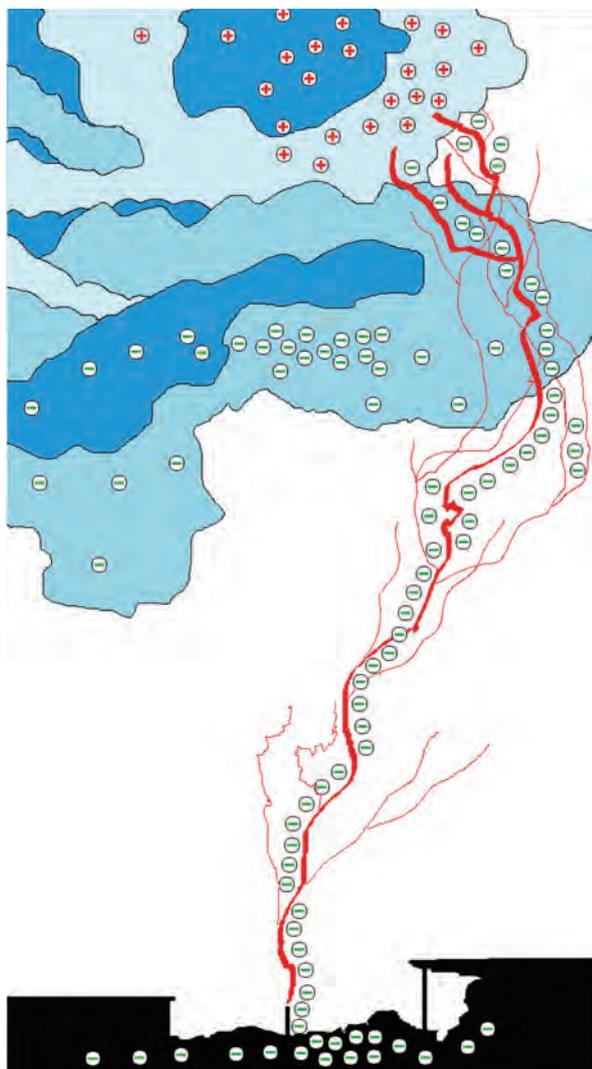


Figura 13: Fulmine positivo ascendente

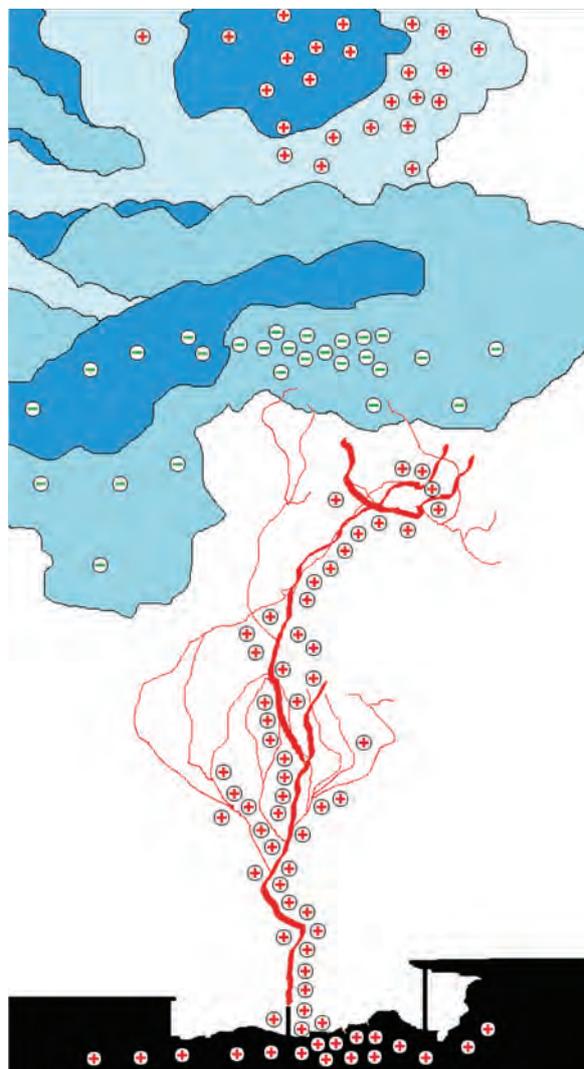


Figura 14: Fulmine negativo ascendente

2. Danni causati dai fulmini

2.1. Pericolosità dei fulmini

Un corpo colpito da un fulmine subisce riscaldamento a causa dell'effetto Joule dovuto al passaggio della corrente. L'intensità elevata della corrente in gioco può, a seconda dei casi, incendiarlo o fonderlo.



Figura 15: Folgoriti: strutture tubolari che si formano per fusione di sabbia silicea colpita dal fulmine

Se il fulmine si scarica su un albero, questo esplosione proiettando schegge, a causa dell'improvvisa vaporizzazione della linfa. I fulmini sugli alberi sono spesso causa di incendi. Anche quando il fulmine non distrugge completamente l'albero, bruciandolo o schiantandolo, questo può comunque morire in capo a pochi mesi.



Figura 16: Effetti dei fulmini sugli alberi

I fulmini sono attratti dai materiali conduttori, che presentano una più bassa impedenza al passaggio della corrente. Corde o altri materiali, anche se normalmente

isolanti, se bagnati possono comportarsi come conduttori. I rami, ancorché separati dalla pianta, se verdi presentano al loro interno soluzioni di acqua ed elettroliti in grado di condurre elettricità, se secchi, ma umidi o bagnati, possono comportarsi ugualmente come conduttori.

Inoltre, poiché il campo elettrico tende ad addensarsi in corrispondenza delle punte di un corpo, alberi isolati, aste, antenne, pali, tralicci, torri e edifici alti sono particolarmente soggetti a fulminazione.

La prossimità con tali elementi può essere fonte di rischio.

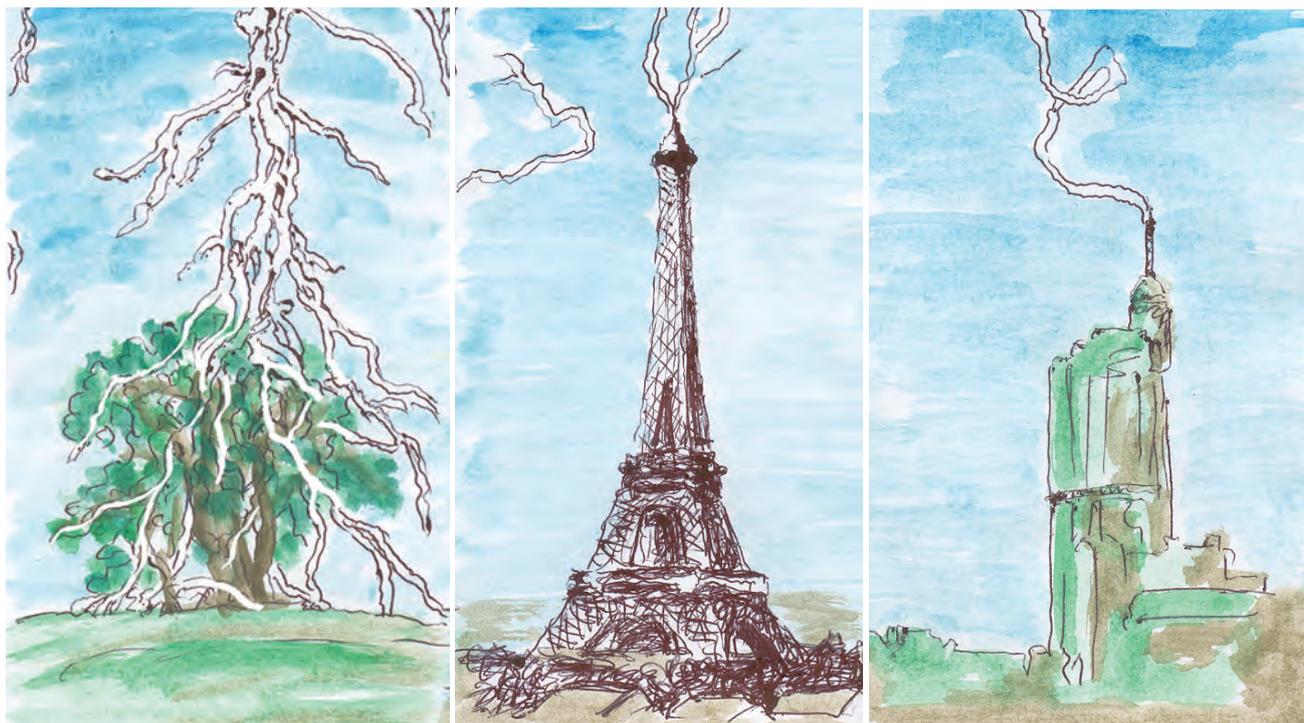


Figura 17: Fulmini su strutture alte



Figura 18: Effetti sul terreno di un campo da golf di una corrente di fulmine che si è scaricata in esso attraverso l'asta della bandierina di una buca

Anche il contatto con masse d'acqua, come il mare e i laghi, può essere fonte di rischio. Se il fulmine cade in acqua, questa può essere violentemente vaporizzata (al limite potrebbe aversi anche elettrolisi con scissione dell'acqua in idrogeno ed ossigeno, altamente infiammabili, ma comunque prodotti in quantità limitate). Inoltre, l'acqua, soprattutto quella salata, è un buon conduttore, ma neanche la conducibilità dell'acqua dolce è trascurabile, per non parlare poi del fatto che la presenza di un corpo, umano o animale, in acqua dolce fa in modo che elettroliti prodotti dall'attività biologica entrino in soluzione, un meccanismo che aumenta localmente la conducibilità intorno al corpo.



Figura 19: Fulmini in mare

Fulmini sono possibili anche durante le tempeste di neve.

2.2. Danni agli esseri umani

Se un fulmine colpisce un essere umano, si parla di *fulminazione* (il termine *folgorazione* è utilizzato per gli incidenti che vedono coinvolti gli esseri umani e gli impianti elettrici).

Si stima che in tutto il mondo, nell'arco di un anno, poco più di mille persone siano colpite dai fulmini.

Comunque un fulmine può provocare gravi danni anche se non colpisce direttamente una persona. Inoltre, l'onda d'urto può investire le persone vicine, spostandole e stordendole.

In tutto il mondo si è visto che le persone che vivono o lavorano all'aperto sono più esposte al rischio (il grado di esposizione si riduce se vi è la possibilità di trovare rifugio al coperto durante i temporali). Si sono registrati casi di fulminazione anche immediatamente dopo un temporale, quando le attività all'aperto erano riprese troppo poco tempo dopo il termine del temporale. Proprio in ragione dell'incremento del rischio che si registra quando aumenta il tempo trascorso all'aperto, le statistiche riportano un incremento degli incidenti a primavera ed in estate, che interessano in prevalenza persone tra i 20 e i 45 anni [33]. Tra le vittime la percentuale dei maschi è più alta, forse in ragione di una maggiore esposizione professionale (ad es.: agricoltori, allevatori) [33].

Tra le cause di danno per gli esseri umani vi sono:

- la fulminazione diretta (che avviene nel 5% circa dei fenomeni che coinvolgono persone);
- le ferite per tensioni di contatto (che avvengono quando la persona sta toccando un oggetto colpito dal fulmine);
- le ferite da arco laterale (che avvengono quando la persona è investita da una corrente che ha effettuato un salto da un oggetto vicino, come un albero, che è stato colpito da un fulmine, ciò avviene per circa un terzo dei fenomeni che coinvolgono persone);
- le ferite per tensioni di passo (dovute alle correnti che scorrono nel terreno nei pressi della persona, ciò avviene per quasi la metà dei fenomeni che coinvolgono le persone);
- i danni causati dal panico (ad es.: cadute, movimenti inconsulti, infarti);
- i danni causati da fenomeni termici (incendi, esplosioni, proiezione di materiali, ustioni) o meccanici (danni provocati dalla rottura di rami, materiali e componenti, cadute di rami, materiali e componenti).

Durante la fulminazione diretta un individuo può essere soggetto ad una corrente di fulmine compresa tra 30 e 110 kA, però, data la breve durata del fenomeno (tra i 10 e i 100 ms), è improbabile che possa aversi tetanizzazione muscolare come nei casi di folgorazione [33]. Tuttavia un fulmine può danneggiare il cervello e arrestare la respirazione o il battito cardiaco. Infatti, nei casi di morte immediata si registra l'arresto simultaneo del cuore e della respirazione. A volte si può avere anche fibrillazione ventricolare.

Se si sopravvive al colpo iniziale, raramente si giunge alla morte, tuttavia, poiché di solito il ritorno spontaneo della circolazione precede il recupero della funzionalità respiratoria, se la ventilazione non è supportata si può avere un secondo arresto cardiaco. Per tale motivo, in caso di primo soccorso prestato a vittime multiple di una stessa fulminazione, è consigliabile dare la precedenza a quei soggetti che non presentano segni vitali o respirazione [33]. I casi di morte per arresto cardiaco tra le vittime di fulminazione sono percentualmente meno numerosi rispetto ai casi di morte per arresto cardiaco tra la popolazione normale ed anche i casi di sopravvissuti senza alcun danno neurologico aumentano se la rianimazione è messa in atto immediatamente. Le tecniche di rianimazione di base e avanzate, che eventualmente includano anche il trattamento dei traumi, possono essere normalmente applicate (nel capitolo 7 è contenuta una sintesi delle tecniche di base).

Gli effetti della corrente di fulmine sul sistema cardiocircolatorio sono variabili: colpi diretti possono portare al collasso cardiocircolatorio, invece tensioni di contatto o passo danno luogo di solito a modifiche dei tracciati elettrocardiografici che nella maggior parte dei casi si risolvono entro tre giorni. Tuttavia sono possibili pericarditi o cardiomiopatie parecchi mesi dopo l'incidente iniziale e anche altri sintomi possono comparire con ritardo. Pressione bassa e instabilità cardiaca sono possibili e possono persistere per settimane o mesi [33].

Danni neurologici transitori o permanenti sono comuni tra le vittime di fulminazione [33]. Il trattamento è limitato ai soli danni permanenti, trattati con terapie neuro-riabilitative di lungo termine.

Tra i danni transitori vi sono: perdita di coscienza, convulsioni, mal di testa, parestesia, debolezza, confusione, perdita di memoria, paralisi transitoria (dovuta a sovrastimolazione del sistema nervoso autonomo con conseguente spasmo vascolare). Gli arti inferiori sono colpiti da paralisi transitoria con frequenza maggiore rispetto agli arti superiori. La paralisi transitoria di solito si risolve in poche ore, ma potrebbe simulare assenza di polso o traumi spinali, creando problemi durante le procedure di primo soccorso. Quando il problema persiste nel tempo, può indicare traumi più seri.

Tra i danni permanenti vi sono: encefalopatia da mancanza di ossigeno (dovuta ad arresto cardiopolmonare) ed emorragie intracraniali (che interessano i gangli basali o il tronco centrale del cervello), inoltre possono comparire (anche con ritardo) lesioni ai nervi periferici, infarto cerebrale e sindrome da perdita di sali cerebrali. Sono state riportate anche sindromi neurologiche ritardate, il cui nesso di causalità con la fulminazione non è ancora ben compreso, come: mielopatia progressiva (che porta a debolezza o perdita sensoria, da settimane a mesi dopo la fulminazione) e alta incidenza di danni nelle regioni cervicale e toracica del midollo spinale.

Parte della corrente scorre all'esterno del corpo (a causa delle alte frequenze contenute nell'impulso elettrico), lasciando segni conosciuti come figure di Lichtenberg (non sono ustioni, ma modificazioni della pigmentazione degli strati profondi della pelle, senza danni istologici, che possono comparire entro un'ora e restano visibili per almeno un giorno) o ustionando in modo particolare la pelle (punteggiature circolari a grappolo, causate dalla corrente che attraversa perpendicolarmente i tessuti, e ustioni più superficiali, causate dalla vaporizzazione del sudore o delle gocce di pioggia lungo il percorso della corrente). Non mancano, però, le ustioni profonde, con punto di ingresso e punto di uscita (ustioni del cranio, delle gambe o di parti della caviglia o del piede), oppure quelle da contatto dovute alla parziale fusione di oggetti in materiale sintetico o al riscaldamento di materiali metallici (per questo durante i temporali è consigliabile rimuovere orologi, bracciali, collane, fibbie, cinture e cinghie).

Danni agli occhi sono possibili (cataratta, spesso bilaterale, danni alla retina o danni al nervo ottico) a causa di passaggio di corrente o traumi.

Danni alle orecchie sono possibili (rottura del timpano, otorrea, sordità, microemorragie e microfratture dell'osso temporale) a causa del passaggio di corrente o degli effetti di spostamenti d'aria o esplosioni.

Disfunzioni psichiatriche e cognitive possono svilupparsi dopo che le vittime tornano alla vita quotidiana. Le disfunzioni possono essere suddivise in funzionali e comportamentali: le funzionali riguardano anomalie della memoria o della concentrazione, mentre le comportamentali includono depressione, disturbi del sonno, labilità emotiva e comportamento aggressivo [33].

Incidenti che coinvolgono donne incinte sono rari e nel 50% dei casi comportano la morte del feto. Sono stati riportati casi di rottura dell'utero e di induzione al travaglio. Il rischio è minore se il feto ha meno di 20 settimane [33].



Figura 19: Figura di Lichtenberg [30]

3. Effetti delle correnti di fulmine

Le correnti di fulmine non dipendono dalle caratteristiche della struttura colpita, sia essa un'attrazione di un parco avventura, un palo, un traliccio, un albero, un riparo, un edificio o un sistema di captatori e calate per la protezione dai fulmini di un edificio o di un riparo. Infatti, nel caso di fulminazione di una struttura, il canale di fulmine ha un'impedenza d'onda molto superiore alla somma dell'impedenza propria della struttura colpita (R) e della sua impedenza verso terra (R_E).

I parametri della corrente di fulmine giocano un ruolo importante per l'integrità fisica dei componenti della struttura colpita. Ciascun parametro tende a prevalere in differenti meccanismi di danno, come sarà chiarito nel seguito.

Gli effetti termici causati dalle correnti di fulmine sono dovuti principalmente al fluire di forti correnti attraverso componenti realizzati con materiali conduttori (principalmente materiali metallici, ma anche materiali isolanti bagnati o umidi). Quando una frazione significativa della corrente di fulmine (o una forte corrente indotta, causata da un fulmine) percorre un componente resistivo, si verificano sovratemperature nel componente e pericolo d'incendio nelle sue vicinanze. Al fine di prevenire simili effetti, la minima sezione dei componenti deve essere sufficientemente elevata.

Effetti termici possono essere causati anche dal calore sviluppato alla radice dell'arco nel punto d'impatto e in tutte le parti conduttrici coinvolte dallo sviluppo di archi disruptivi.

Inoltre, i componenti metallici, nel punto di impatto o di sviluppo di un arco, possono subire anche alterazione ed erosione degli strati superficiali, tali da renderli soggetti a corrosione, soprattutto se successivamente rimangono esposti agli agenti atmosferici.

Il passaggio di corrente causa anche a sforzi meccanici, che potrebbero compromettere l'integrità dei componenti, con possibili conseguenze anche sulla stabilità meccanica delle strutture cui i componenti appartengono.

La valutazione del comportamento di un componente quando è colpito o attraversato da correnti causate dai fulmini diviene necessaria in ragione del fatto che possono sorgere problemi di rischio di danno alle persone oltre che di incendio ed esplosione.

Alla luce di quanto detto, durante una simile valutazione devono essere presi in considerazione:

- gli aspetti termici,
- gli aspetti relativi all'erosione di materiale e
- gli aspetti meccanici.

Gli effetti termici sono correlati all'energia specifica (W/R), quando si tratti di accoppiamento resistivo, ed alla carica (Q), quando si tratti dell'eventualità dello sviluppo di un arco disruptivo in un impianto. Gli effetti meccanici dei fulmini sono

connessi con i valori di picco della corrente (I) e con l'energia specifica (W/R). Sovratensioni e scariche pericolose, causate da accoppiamenti induttivi, sono correlate con la pendenza media ($\Delta i/\Delta t$) del fronte d'onda delle correnti di fulmine.

3.1. Valori dei parametri delle correnti di fulmine da utilizzare per calcoli e prove

Valutazioni degli effetti dei fulmini ed eventuali prove di laboratorio per testare l'adeguatezza dei materiali e dei componenti possono essere effettuate scegliendo valori significativi dei parametri delle correnti di fulmine, scelti per rappresentare il reale meccanismo di guasto di un componente.

Le forme d'onda delle correnti dei fulmini hanno un andamento impulsivo, ma sono possibili anche colpi lunghi, di ampiezza pressoché costante per tempi dell'ordine di alcune centinaia di millisecondi. Tenendo conto delle distribuzioni di probabilità del fenomeno e dei comportamenti dei fulmini positivi e negativi, è possibile ricondursi a considerare quattro tipi principali di forme d'onda: primo impulso positivo, primo impulso negativo, impulsi negativi successivi e colpi lunghi.

I primi tre tipi (impulsi) possono essere rappresentati dalla relazione (figura 20):

$$i(t) = \frac{I}{k} \cdot \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}$$

dove:

I è il valore di picco;

k è il fattore di correzione del valore di picco;

t è il tempo;

T_1 è la costante di tempo del fronte di salita dell'impulso;

T_2 è la costante di tempo della coda dell'impulso.

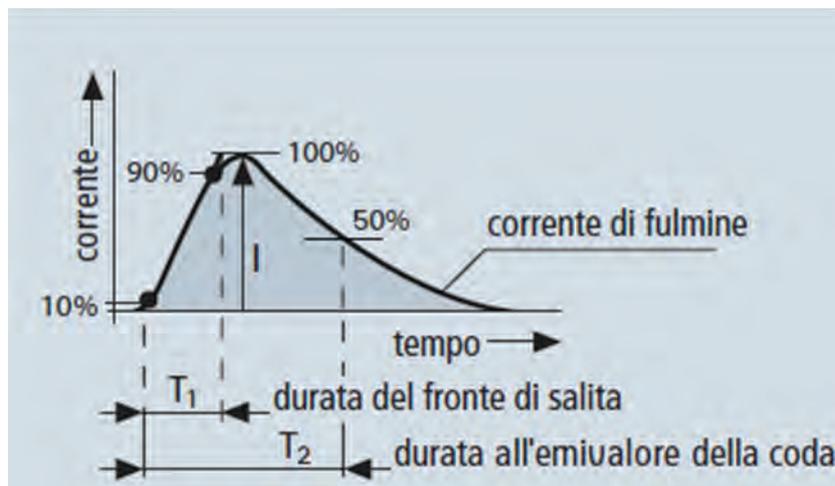


Figura 20: Funzione approssimante le correnti di fulmine impulsive

I valori dei parametri da inserire nella relazione precedente, per le forme d'onda delle correnti del primo impulso positivo, del primo impulso negativo e degli impulsi negativi successivi quando si devono effettuare prove severe su materiali e componenti, sono riportati nella tabella 2. Valori utilizzabili per calcoli semplificati sono riportati nei paragrafi 3.1.1, 3.1.3 e 3.1.4.

Nella realtà i valori dei parametri delle correnti di fulmine seguono una distribuzione statistica. Nel campo della protezione dai fulmini si fa riferimento ad una serie di valori sulla base dell'uso che si dovrà poi fare del componente testato con i valori scelti. In pratica sono stabilite delle classi per il livello di protezione che il componente potrà fornire quando sarà associato ad altre misure scelte durante la fase di valutazione dei rischi. I livelli di protezione (LPL) sono quattro, da I a IV, dove le misure di protezione di livello I sono quelle in grado di resistere ai fulmini con valori dei parametri di corrente che si trovano nell'estremo superiore della distribuzione statistica (sono, cioè, più pericolosi, ma si presentano con una frequenza minore), mentre le misure di livello IV sono in grado di resistere a fulmini con valori medio-bassi dei parametri (che si presentano con una frequenza maggiore).

Tabella 2: Valori dei parametri per gli impulsi delle correnti di fulmine (per livello di protezione I) [6]

	primo impulso positivo ($T_1/T_2 = 10/350 \mu s$)	primo impulso negativo ($T_1/T_2 = 1/200 \mu s$)	impulsi negativi successivi ($T_1/T_2 = 0,25/100 \mu s$)
I [kA]	200	100	50
k	0,93	0,986	0,993
T_1 [μs]	19	1,82	0,454
T_2 [μs]	485	285	143

I colpi lunghi possono essere descritti con forme d'onda rettangolari aventi una corrente media $i_{COLPO\ LUNGO}$ ed una durata media $T_{COLPO\ LUNGO}$. (figura 21), i valori per le prove più severe sono, come si chiarirà meglio nel paragrafo 3.1.2, $i_{COLPO\ LUNGO} = 400\ A$ e $T_{COLPO\ LUNGO} = 0,5\ s$. Nello stesso paragrafo sono riportati anche i valori di altri parametri utilizzabili per calcoli.

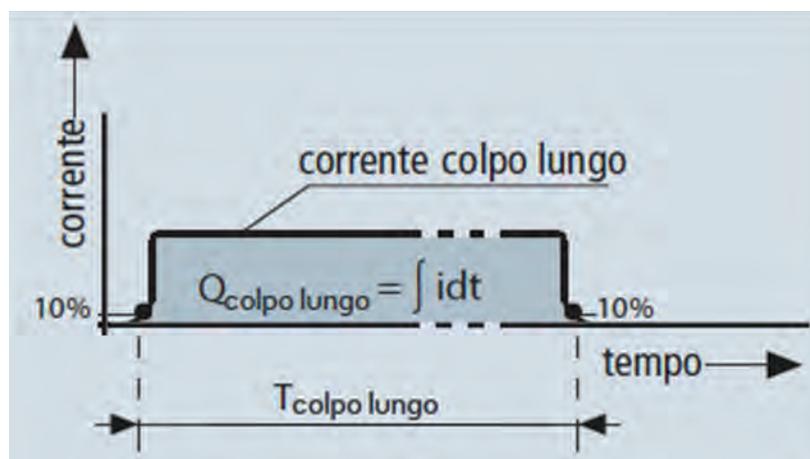


Figura 21: Funzione approssimante le correnti di fulmine dei colpi lunghi

3.1.1. Impulso positivo

I valori I , Q e W/R connessi con gli effetti meccanici e termici sono derivati dai fulmini positivi (che, in media, hanno per tali parametri valori più alti).

I valori che seguono sono superati solo dal 10% dei fulmini positivi:

$$\begin{aligned} I &= 200 \text{ kA} \\ Q_{\text{FULMINE}} &= 300 \text{ C} \\ Q_{\text{COLPO BREVE}} &= 100 \text{ C} \\ W/R &= 10 \text{ MJ}/\Omega \\ \Delta i/\Delta t &= 20 \text{ kA}/\mu\text{s} \end{aligned}$$

Per il primo impulso positivo, questi valori consentono una prima approssimazione del tempo alla cresta:

$$T_1 = I / (\Delta i/\Delta t) = 10 \mu\text{s}$$

Per un colpo avente un decremento esponenziale, le seguenti formule determinano approssimativamente la carica e l'energia ($T_1 \ll T_2$):

$$\begin{aligned} Q_{\text{COLPO BREVE}} &= (1/0,7) \cdot I \cdot T_2 \\ W/R &= (1/2) \cdot (1/0,7) \cdot I^2 \cdot T_2 \end{aligned}$$

Queste formule, unitamente ai valori sopra riportati, consentono la determinazione approssimata del tempo all'emivalore:

$$T_2 = 350 \mu\text{s}$$

3.1.2. Colpo lungo

Per i colpi lunghi, la carica può essere approssimativamente calcolata come segue:

$$Q_{\text{COLPO LUNGO}} = Q_{\text{FULMINE}} - Q_{\text{COLPO BREVE}} = 200 \text{ C}$$

La durata ha una stima media, in base ai dati sperimentali, pari a:

$$T_{\text{COLPO LUNGO}} = 0,5 \text{ s}$$

Un parametro importante è la corrente quasi continua:

$$i_{\text{COLPO LUNGO}} = Q_{\text{COLPO LUNGO}}/T_{\text{COLPO LUNGO}} = 400 \text{ A} = 0,4 \text{ kA}$$

e, assumendo per il fronte di salita una durata $\Delta t = 10 \mu\text{s}$, si ha un valore massimo di $\Delta i/\Delta t = 0,04 \text{ kA}/\mu\text{s}$, che poi si riduce quasi a zero durante il tempo in cui si ha un valore quasi costante per la corrente di fulmine.

3.1.3. Primo impulso negativo

Per alcuni effetti di accoppiamento induttivo il primo impulso negativo dà origine ad elevate sovratensioni indotte.

I valori che seguono sono superati solo dal 1% dei fulmini negativi:

$$I = 100 \text{ kA}$$
$$\Delta i / \Delta t = 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

Per un primo impulso negativo questi valori danno in prima approssimazione un tempo alla cresta di:

$$T_1 = I / (\Delta i / \Delta t) = 1,0 \mu\text{s}$$

Per un primo colpo negativo avente un decremento esponenziale, poiché $T_1 \ll T_2$, la durata all'emivalore può essere stimata approssimativamente pari a:

$$T_2 = 200 \mu\text{s}$$

3.1.4. Impulsi susseguenti

I massimi valori della pendenza media $\Delta i / \Delta t$, connessi con le scariche pericolose dovute all'accoppiamento induttivo, sono determinati dagli impulsi successivi dei fulmini negativi.

I valori che seguono sono superati solo dall'1% dei fulmini:

$$I = 50 \text{ kA}$$
$$\Delta i / \Delta t = 200 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

Per un impulso susseguente, questi valori danno in prima approssimazione un tempo alla cresta pari a:

$$T_1 = I / (\Delta i / \Delta t) = 0,25 \mu\text{s}$$

La durata all'emivalore può essere stimata approssimativamente pari a:

$$T_2 = 100 \mu\text{s}$$

3.2. Effetti termici delle correnti di fulmine

Il calore sviluppato per *effetto joule* dal passaggio della corrente di fulmine (espresso in joule [J] o watt-secondo [W·s]) è proporzionale alla resistenza propria, R , della struttura attraversata dalla corrente (per semplicità è stato assunto che la resistenza di un eventuale dispersore di terra fosse inclusa in R):

$$W = R \int i^2 dt$$

Dall'analisi di tale espressione si comprende che, per evitare pericoli di surriscaldamento o di incendio, occorre offrire al fulmine un percorso fino alla terra che abbia la più bassa resistenza possibile e, eventualmente, sia alternativo al percorso fornito dalla struttura, questo è uno dei motivi per cui sono realizzati sistemi di protezione dai fulmini costituiti da captatori e calate connessi al dispersore di terra.

L'energia specifica W/R di un colpo di fulmine è l'energia che il colpo trasferisce ad una resistenza del valore di 1Ω . Tale energia corrisponde all'integrale del quadrato della corrente del colpo per un tempo pari alla sua durata:

$$W/R = \int i^2 dt$$

Il valore di W/R è utile per determinare il riscaldamento dei conduttori attraversati dalla corrente di fulmine, e per valutare gli effetti elettrodinamici (forze esercitate sui conduttori). L'energia specifica è legata all'energia W , dissipata su un conduttore con resistenza R qualsiasi, dalla relazione:

$$W = R \int i^2 dt = R \cdot (W/R)$$

La valutazione del riscaldamento (sovratemperatura) di conduttori dovuto al fluire delle correnti di fulmine è possibile grazie ad un approccio analitico basato sulle considerazioni che seguono [6].

Si assume che non vi sia scambio termico rilevabile con l'ambiente circostante a causa della breve durata del processo (processo adiabatico), questo perché in una scarica di fulmine le correnti, caratterizzate da un'elevata energia specifica, presentano durate troppo brevi per consentire una significativa dispersione del calore.

La sovratemperatura di un componente conduttore può, quindi, essere calcolata con la seguente relazione:

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} (e^x - 1)$$

dove:

$$x = \frac{W}{R} \frac{\alpha \rho_0}{q^2 \gamma C_w}$$

I valori caratteristici dei parametri fisici di alcuni materiali, da utilizzare nella formula precedente sono riportati nella tabella 3, dove:

$\theta - \theta_0$ è la sovratemperatura del conduttore [K],

α è il coefficiente di temperatura della resistenza [1/K],

W/R è l'energia specifica dell'impulso di corrente [J/ Ω],

ρ_0 è la resistenza specifica del conduttore a temperatura ambiente [Ω m],

q è la sezione del conduttore [mm²],

γ è la densità del materiale [kg/m³],

C_w è il calore specifico [J/(kg·K)],

C_s è il calore latente di fusione [J/kg],

θ_s è la temperatura di fusione [°C].

La tabella 4 riporta, come esempi di applicazione della precedente formula, le sovratemperature di diversi materiali in funzione di W/R e della sezione del conduttore.

Tabella 3: Caratteristiche fisiche di alcuni materiali [6]

Parametro → Materiale ↓	ρ_0 [Ωm]	α [1/K]	γ [kg/m ³]	θ_s [°C]	C_s [J/kg]	C_w [J/(kg·K)]
Alluminio	29×10^{-9}	$4,0 \times 10^{-3}$	2700	658	397×10^3	908
Acciaio dolce	120×10^{-9}	$6,5 \times 10^{-3}$	7700	1530	272×10^3	469
Rame	$17,8 \times 10^{-9}$	$3,92 \times 10^{-3}$	8920	1080	209×10^3	385
Acciaio inox austenico non magnetico	700×10^{-9}	$0,8 \times 10^{-3}$	8000	1500	290×10^3 (*)	500
(*) Valore interpolato sulla base del valore dell'acciaio dolce						

Un tipico impulso di corrente dovuto ad un fulmine è caratterizzato da una corrente di breve durata (ad esempio il tempo all'emivalore di un colpo successivo è di circa 100 μs) e da un elevato valore di picco. In tali condizioni dovrebbe essere considerato anche l'effetto pelle. Tuttavia, nella maggior parte dei casi reali le caratteristiche dinamiche dei materiali (permeabilità magnetica dinamica) e le configurazioni geometriche (sezione dei conduttori) riducono a livelli trascurabili il contributo dell'effetto pelle al riscaldamento del componente.

Tabella 4: Incrementi di temperatura [in gradi kelvin] dovuti al passaggio di impulsi di corrente con diversa energia specifica attraverso conduttori di quattro materiali, al variare delle sezioni degli stessi [6]

Materiale ↓	Sezione q [mm ²] →	4	10	16	25	50	100
	W/R [MJ/ Ω] ↓						
Alluminio	2.5		564	146	52	12	3
	5.6			454	132	28	7
	10				283	52	12
Acciaio dolce	2.5			1120	211	37	9
	5.6				913	96	20
	10					211	37
Rame	2.5		169	56	22	5	1
	5.6		542	143	51	12	3
	10			309	98	22	5
Acciaio inox austenico non magnetico	2.5				940	190	45
	5.6					460	100
	10					940	190

3.3. Danneggiamento termico nel punto d'impatto del fulmine

Effetti termici possono essere causati dal calore sviluppato alla radice dell'arco nel punto d'impatto. Il riscaldamento, in tal caso, è dovuto principalmente alla corrente del primo colpo, tuttavia anche i colpi lunghi hanno effetti rilevanti.

Il danneggiamento termico del punto d'impatto può essere osservato su tutti i componenti su cui si sviluppa un arco, (ad esempio, nel caso di un sistema di protezione dai fulmini, sui captatori e negli spinterometri).

La fusione e l'erosione di materiale che si verifica nel punto di impatto (area della radice dell'arco) sono causati, infatti, dall'accumulo di una grande quantità di energia termica, dovuto principalmente al calore generato per effetto joule dall'elevata densità di corrente. Tale calore è maggiore di quello che può essere assorbito per conduzione dal materiale e l'eccesso, oltre a produrre la fusione e la vaporizzazione del materiale, è parzialmente irradiato nell'ambiente. La severità del fenomeno è correlata con l'ampiezza e la durata della corrente.

Sono stati sviluppati molteplici modelli teorici per la valutazione degli effetti termici nel punto d'impatto di un canale di fulmine su una superficie metallica. La norma [6], per semplicità, fa riferimento solamente al modello della *caduta di tensione catodica o anodica*. Tale modello si applica efficacemente al caso di lamiere metalliche di spessore estremamente ridotto e conduce a risultati cautelativi in quanto assume che tutta l'energia iniettata nel punto d'impatto del fulmine sia utilizzata per fondere o vaporizzare il materiale (processo adiabatico), ignorando la diffusione di calore nel metallo.

L'energia W nella radice d'arco è data da:

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

dove:

$u_{a,c}$ è la caduta di tensione anodica o catodica e
 $i(t)$ è la corrente di fulmine.

Poiché $u_{a,c}$, caratterizzata da valori di poche decine di volt, può essere ritenuta costante nel campo di variazione di corrente considerato, si vede che la causa principale della conversione di energia nella radice d'arco è la carica Q trasportata dalla corrente di fulmine:

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

L'approccio semplificato assume che tutta l'energia sviluppata dalla corrente di fulmine sia utilizzata solo per la fusione di materiale nella radice dell'arco. Tale ipotesi conduce ad una sovrastima del volume del materiale fuso, data dalla formula seguente:

$$V = \frac{u_{a,c} \cdot Q}{\gamma} \cdot \frac{1}{C_w \cdot (\theta_s - \theta_u) + C_s}$$

dove:

V è il volume di materiale fuso [m^3],

$u_{a,c}$ è la caduta di tensione catodica o anodica (assunta costante),

Q è la carica trasportata dalla corrente di fulmine [C],

γ è la densità del materiale [kg/m^3],

C_w è il calore specifico [$J/(kg \cdot K)$],

C_s è il calore latente di fusione [J/kg],

θ_s è la temperatura di fusione [$^{\circ}C$],

θ_u è la temperatura ambiente [$^{\circ}C$].

I valori caratteristici dei parametri fisici nella formula precedente, per diversi tipi di materiali, sono stati già riportati nella Tabella 3.

Fondamentalmente, la carica da considerare è la somma della carica portata dai colpi impulsivi e della carica portata dalla corrente continuativa del colpo lungo. L'esperienza di laboratorio ha evidenziato come gli effetti dei colpi impulsivi siano trascurabili rispetto agli effetti dei colpi lunghi.

Infatti, data la disposizione sperimentale illustrata in figura 22, per prove su lamiere metalliche di spessore ridotto, risultati di prove con correnti impulsive sono riportati nella figura 23 [27], mentre risultati di prove con correnti continuative di colpo lungo sono riportati nella figura 24 [27].

È soprattutto la carica dei colpi lunghi a fondere e vaporizzare grandi volumi di materiale, in quanto l'arco elettrico dura più a lungo.

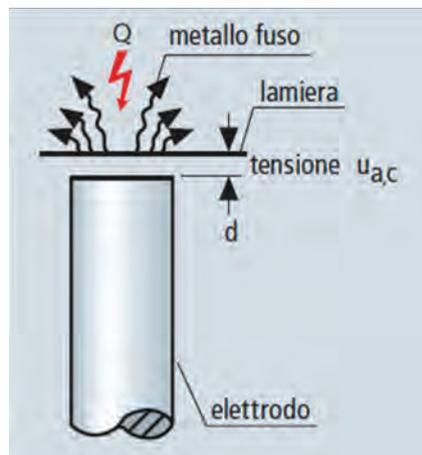


Figura 22: Disposizione sperimentale per prove su lamiere metalliche di spessore ridotto [27]

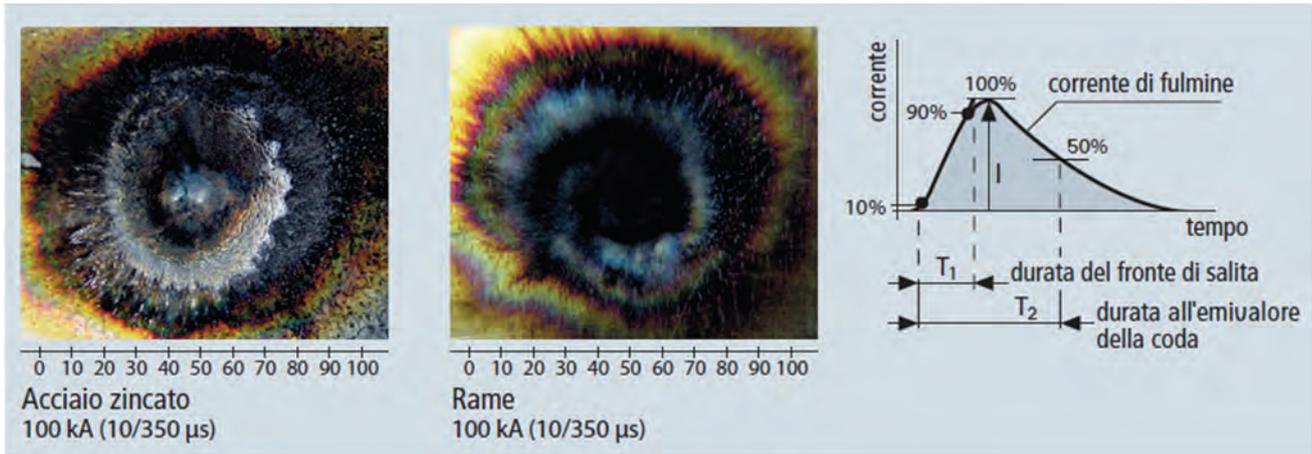


Figura 23: Prove con correnti impulsive su lamiere metalliche di spessore ridotto [27]

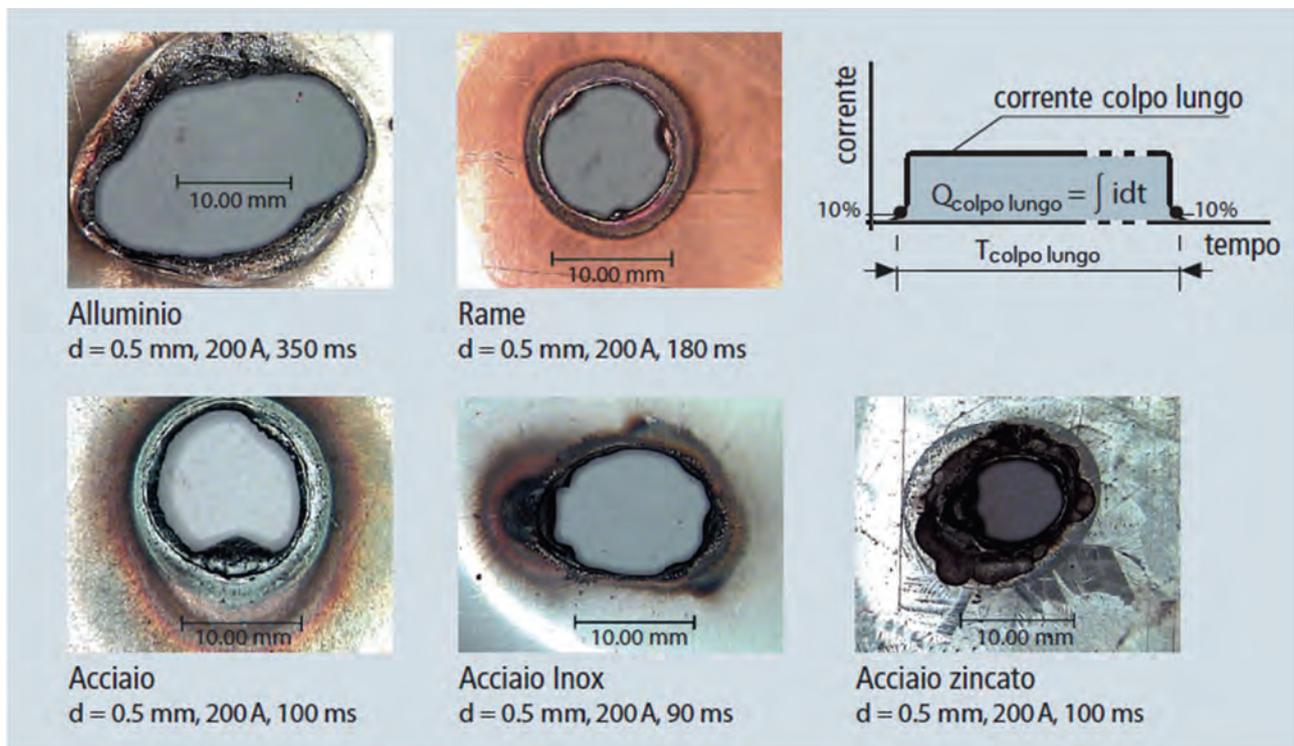


Figura 24: Prove con correnti continuative di colpo lungo su lamiere metalliche di spessore ridotto [27]

3.3.1. Il fenomeno del punto caldo in serbatoi e tubazioni

La fusione del metallo nel punto d'impatto del fulmine può giungere fino alla perforazione, se lo spessore della parete metallica non è sufficiente. Ma anche se lo spessore fosse sufficiente ad evitare la perforazione della parete, la temperatura raggiunta dalla superficie interna potrebbe innescare incendi o esplosioni se il *punto caldo* si trova a contatto con sostanze o miscele facilmente infiammabili o esplosive. È questo il caso, ad esempio, di serbatoi o tubazioni per l'immagazzinamento e il trasporto di simili sostanze. Nel caso dei parchi avventura, quando non vi sono serbatoi di sostanze infiammabili o esplosive, possono esservi parti lignee a contatto con componenti metallici. L'improvviso aumento di temperatura e i valori di

temperatura raggiunti potrebbero portare all'ignizione del legno o alla vaporizzazione di sostanze liquide in esso contenute, con possibile proiezione di schegge.

Nella norma [8] sono riportate le temperature massime che si raggiungono sulla superficie interna di pareti metalliche in corrispondenza del punto di impatto, al variare del materiale e dello spessore della parete stessa. Tali temperature sono riportate nella tabella 5 per LPL I ($Q = 200$ C) e nella tabella 6 per LPL III-IV ($Q = 100$ C).

La protezione della superficie interna della parete metallica con un rivestimento isolante riduce notevolmente la temperatura che essa può raggiungere qualora sia colpita da un fulmine. Ad esempio, nel caso di LPL I ($Q = 200$ C), se la superficie interna di una parete metallica di 4 mm di spessore (indipendentemente dal materiale utilizzato) fosse ricoperta con un rivestimento isolante (teflon o gomma con 2 mm di spessore), la temperatura su di essa non supererebbe 200 °C.

Tabella 5: Temperatura massima θ_{max} sulla superficie interna di una parete metallica per LPL I ($Q = 200$ C)

Materiale ↓	Spessore [mm]→	4	5	6	7
Rame		910	690	540	450
Alluminio		650	610	540	460
Acciaio		1100	850	680	540
Acciaio inox		960	640	430	310

Tabella 6: Temperatura massima θ_{max} sulla superficie interna di una parete metallica per LPL III-IV ($Q = 100$ C)

Materiale ↓	Spessore [mm]→	4	5	6	7
Rame		535	390	310	270
Alluminio		600	500	410	370
Acciaio		825	595	450	300
Acciaio inox		630	390	265	180

3.4 Scariche disruptive

In generale le scariche disruptive sono importanti solo in ambienti infiammabile o in presenza di materiali combustibili.

Possono verificarsi due diversi tipi di scariche. Le scariche del primo tipo si verificano quando una corrente molto elevata è costretta ad attraversare uno spazio isolante interposto tra materiali conduttori. La maggior parte di questo tipo si verifica in

prossimità degli spigoli all'interno di giunzioni se la pressione dei morsetti è troppo bassa; ciò è dovuto principalmente ad un'elevata densità di corrente ed ad una pressione dei morsetti non adeguata. L'intensità di tali scariche dipende dall'energia specifica e, conseguentemente, la condizione più critica è associata al primo colpo di fulmine. Le scariche del secondo tipo si verificano quando si ha una tensione indotta tra due tratti adiacenti di uno stesso conduttore, se la tensione indotta tra i due tratti supera la rigidità dielettrica dell'aria. La tensione indotta è proporzionale all'autoinduttanza moltiplicata per la pendenza della corrente di fulmine. La componente di fulmine più critica per tali scariche è quindi il colpo negativo successivo.

3.4.1. Danni dovuti ad onda d'urto acustica

Quando una corrente di fulmine fluisce in un arco si verifica un'onda d'urto. La gravosità dell'evento dipende dal valore di picco della corrente e dalla velocità del suo incremento.

In generale i danni dovuti all'onda acustica impulsiva sono insignificanti per gli elementi metallici, ma possono causare danneggiamenti sui componenti che sono nelle vicinanze e sulle persone.

3.5. Effetti meccanici delle correnti di fulmine

Gli effetti meccanici causati dalle correnti di fulmine, detti *sforzi elettrodinamici*, dipendono dall'ampiezza, dalla durata e dalla forma d'onda della corrente, dalla configurazione geometrica del circuito e dalle caratteristiche di elasticità delle strutture meccaniche interessate, oltre che dalle eventuali forze di attrito tra i componenti.

Infatti, forze magnetiche si verificano quando due conduttori sono percorsi da corrente o nel caso in cui un solo conduttore percorso da corrente formi un angolo, un'ansa, un cappio o una spira (figure 26, 27, 28).

Lo sforzo elettrodinamico F , che si scambiano due tratti di conduttore di lunghezza l , distanti d e percorsi dalle correnti i_1 e i_2 , si può approssimativamente calcolare con la formula (figura 25):

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{l}{d} \cdot i_1 i_2$$

dove:

F è la forza elettrodinamica [N],

i_1 e i_2 sono le correnti [A] nei due tratti di conduttore paralleli,

μ_0 è la permeabilità magnetica dell'aria [$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m],

l è la lunghezza dei due tratti di conduttore [m],

d è la distanza tra i due tratti di conduttore [m].

L'effetto della forza sui conduttori è attrattivo in caso di direzione concorde della corrente, mentre è repulsivo in caso di direzione discorde (figura 25). Inoltre, l'effetto

è direttamente proporzionale al prodotto delle correnti nei conduttori ed è inversamente proporzionale alla distanza tra i conduttori.

A seconda delle proprietà meccaniche dei tratti di conduttore (elasticità/plasticità), gli sforzi elettrodinamici possono causare deformazioni reversibili (elastiche) o irreversibili (plastiche).

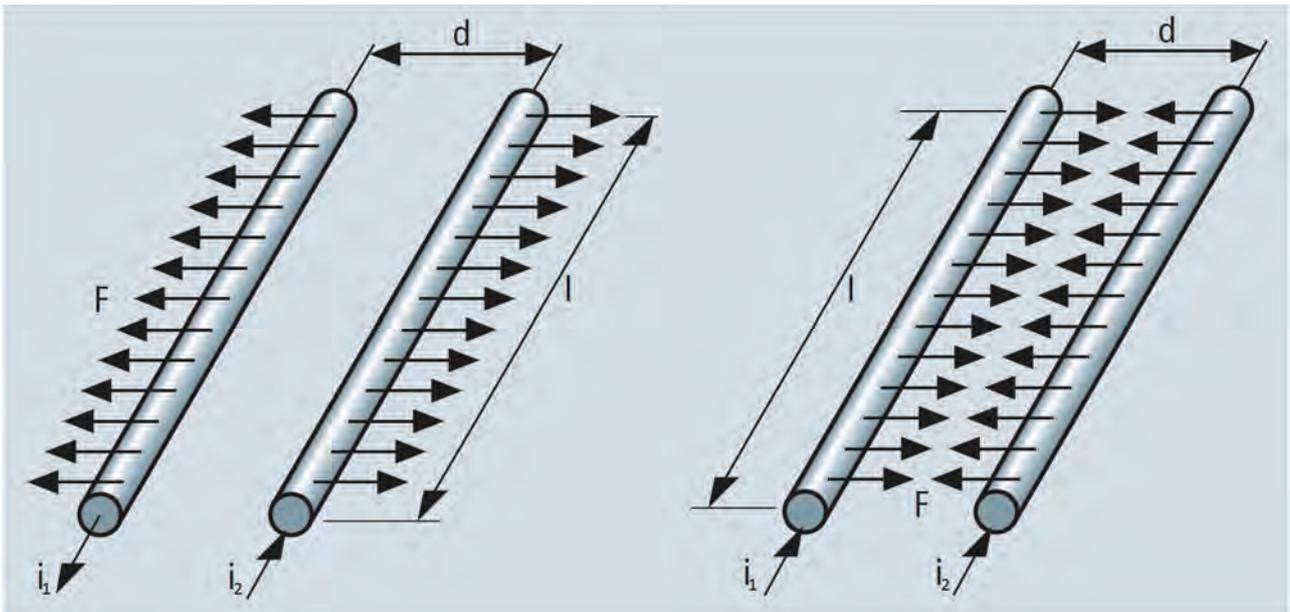


Figura 25: Forza elettrodinamica tra conduttori paralleli

Nel caso di un unico conduttore piegato su se stesso, lo sforzo elettrodinamico sui suoi tratti paralleli è proporzionale al quadrato della corrente che lo percorre, ovvero, chiamando i tale corrente e usando le stesse notazioni della formula precedente:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{l}{d} \cdot i^2$$

Nelle figure 26, 27, 28 sono illustrati rispettivamente i casi di forze tra tratti paralleli di un'ansa di conduttore, forze tra tratti paralleli di un coppia di conduttore e forze tra tratti ortogonali di uno stesso conduttore.

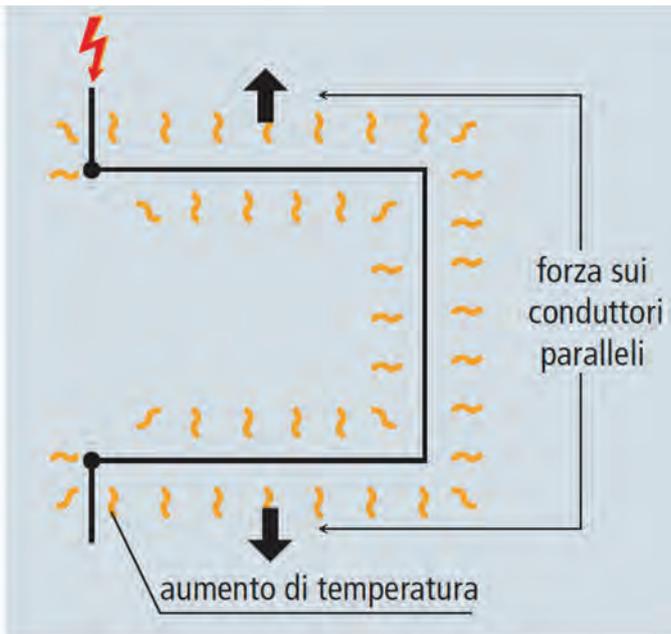


Figura 26: Forza elettrodinamica tra tratti paralleli di un'ansa di conduttore

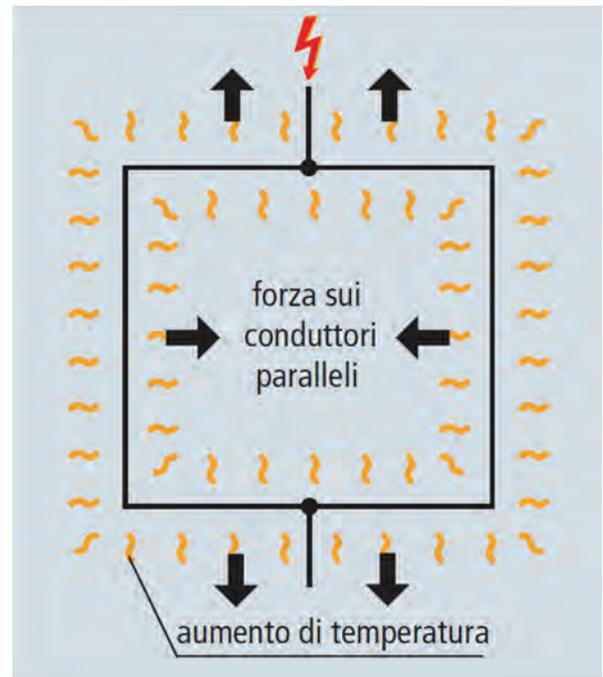


Figura 27: Forza elettrodinamica tra tratti paralleli di un paio di conduttore

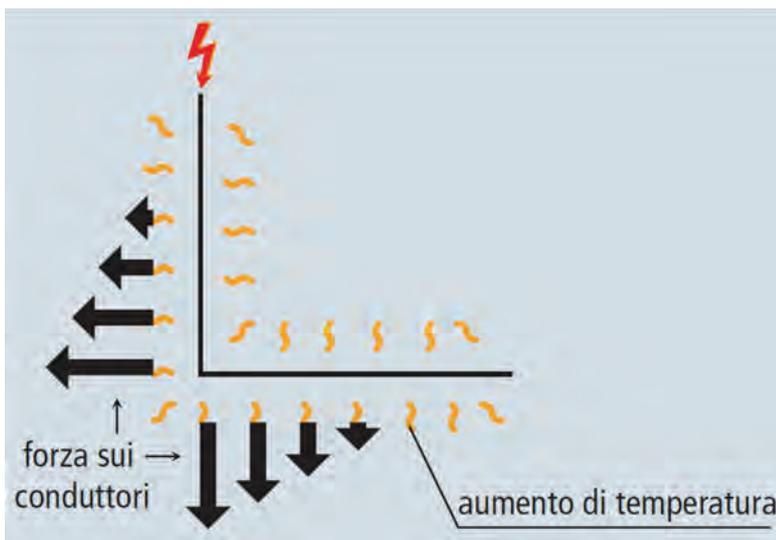


Figura 28: Forza elettrodinamica tra tratti ortogonali di conduttore

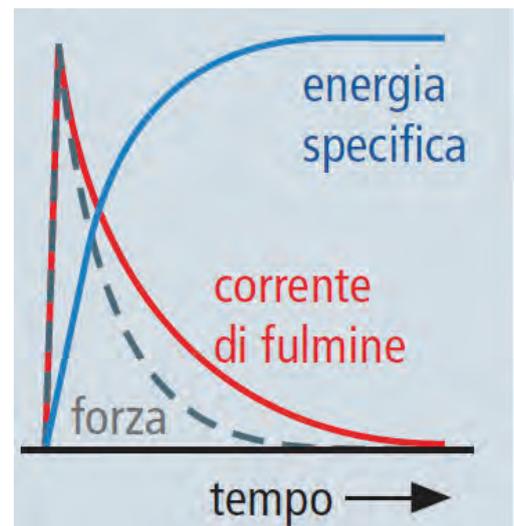


Figura 29: Andamenti della corrente di fulmine, dell'energia specifica e della forza elettrodinamica [27]

3.5.1. Effetti degli sforzi elettrodinamici

Gli sforzi elettromeccanici, proporzionali al quadrato della corrente, sono in grado di sollecitare le strutture metalliche (sia quelle percorse dalla corrente di fulmine diretta, che quelle percorse dalla corrente indotta). Possono essere sollecitate sia le attrazioni metalliche dei parchi giochi, che eventuali tralicci, scale e ringhiere metalliche, nonché le strutture meccaniche di eventuali LPS (lightning protection system – sistema di protezione dai fulmini). Devono essere considerati due effetti: la frequenza meccanica naturale, connessa con il comportamento elastico della struttura, e la deformazione

permanente della struttura, connessa con il suo comportamento plastico. Gli sforzi elettromeccanici possono essere combinati con la sollecitazione elastica (espressa dal prodotto della deformazione elastica $\delta(t)$ per la costante elastica k della struttura) e con gli attriti, per dar luogo ad un'equazione differenziale da cui è possibile ricavare l'ampiezza delle vibrazioni della struttura elastica prodotte dalla corrente di fulmine.

Il rapporto tra la durata dell'impulso di corrente ed il periodo naturale di oscillazione della struttura è un fattore chiave per la comprensione di quello che succede. Se i periodi di oscillazione naturali della struttura sono molto più lunghi rispetto alla forza applicata (durata degli impulsi della corrente di fulmine), allora la massima sollecitazione si verifica dopo la cessazione dell'impulso di corrente e presenta un valore di picco inferiore a quello della forza applicata. In alcuni casi la massima sollecitazione meccanica può essere addirittura trascurata.

La deformazione plastica si verifica quando la sollecitazione supera il limite elastico del materiale. Se il materiale con cui è realizzata la struttura, come ad es. l'alluminio o il rame ricotto, gli sforzi elettrodinamici possono deformare i tratti percorsi da corrente negli angoli e nei cappi. Tali elementi devono quindi essere progettati per resistere a simili sforzi e presentare un comportamento essenzialmente elastico.

La condizione più critica è associata al primo colpo di fulmine.

Anche gli elementi di connessione tra elementi conduttori adiacenti costituiscono possibili punti di debolezza meccanica e termica dove possono aversi sollecitazioni elevate.

Nel caso di connettori installati in modo da consentire ai conduttori la formazione di angoli retti, l'effetto principale della sollecitazione è connesso con gli sforzi elettrodinamici che tendono, vincendo le forze di attrito, a raddrizzare i conduttori e ad aprire la connessione. È perciò possibile la formazione di un arco tra i punti di contatto delle diverse parti. Inoltre l'effetto di riscaldamento causato dalla concentrazione di corrente in una piccola superficie di contatto produce effetti non trascurabili.

3.5.2. Effetti combinati meccanici e termici

In pratica gli effetti termici e quelli meccanici si verificano simultaneamente. Se il riscaldamento è sufficiente a rammollire il materiale (conduttori, morsetti), possono verificarsi danneggiamenti notevoli. In casi estremi il metallo può fondere esplosivamente e provocare considerevoli danni alle strutture adiacenti. Per tale motivo la sezione del metallo deve essere tale da sopportare in modo sicuro tali sollecitazioni.

3.6. Tensioni indotte

In una spira conduttrice aperta, che si trovi nelle vicinanze di un conduttore attraversato dalla corrente di fulmine (o nelle vicinanze di un tratto rettilineo del percorso in aria della corrente di fulmine), si determina una tensione indotta. Se la spira è chiusa si determina una corrente indotta. Più precisamente, una corrente $i(t)$ in un conduttore rettilineo genera a distanza r da questo, un campo di induzione

magnetica B di valore approssimativamente pari a (la formula è approssimata per valori finiti della lunghezza del conduttore rettilineo):

$$B = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}$$

dove:

$\mu = \mu_r \mu_0$ è la permeabilità magnetica del mezzo,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m è la permeabilità magnetica del vuoto e

μ_r è la permeabilità magnetica relativa del mezzo, che nell'aria vale all'incirca 1.

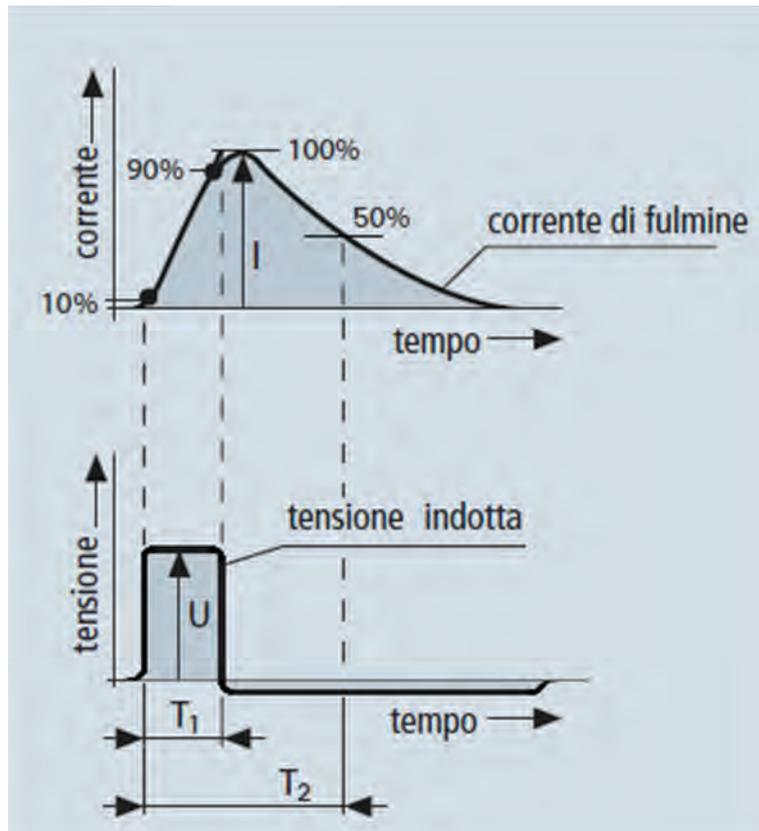


Figura 30: Corrente impulsiva e forma d'onda della tensione indotta

Nel caso dei fulmini la corrente $i(t)$ varia nel tempo (figura 30), e ciò è responsabile della variazione del flusso Φ del vettore induzione magnetica concatenato con una spira che si trovi nelle vicinanze del conduttore rettilineo. Tale variazione $\Delta\Phi$, nell'intervallo di tempo Δt , in base alla legge di Faraday-Neumann-Lenz, determina ai capi della spira, se è aperta, una tensione indotta U di intensità:

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Nel caso in esame, introducendo la mutua induttanza M tra il conduttore rettilineo (o il percorso della corrente di fulmine) e la spira si ha:

$$\Phi = M \cdot i(t)$$

per cui si può scrivere:

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

da cui si vede che a generare la tensione indotta U (figura 30) contribuisce in modo determinante la pendenza $\Delta i/\Delta t$ della corrente di fulmine.

Al fine di determinare le massime sollecitazioni cui possono essere sottoposti i materiali e i componenti che realizzano le attrazioni dei parchi avventura, in modo da poterne valutare l'adeguatezza, e per poter decidere quali misure di protezione adottare per la protezione dagli effetti indotti dai fulmini, è necessario avere una stima del valore massimo che può essere raggiunto dalla tensione U :

$$U_{max} = \max |U| = M \cdot \max \left| \frac{\Delta i}{\Delta t} \right|$$

Dallo studio del fenomeno del fulmine e dall'analisi della funzione del paragrafo 3.1 si vede che una buona approssimazione della massima pendenza $\Delta i/\Delta t$ è raggiunta durante il fronte di salita della corrente di fulmine ed è pari a:

$$\max \left| \frac{\Delta i}{\Delta t} \right| \cong \frac{I}{T_1}$$

dove:

I è il valore di cresta dell'impulso $i(t)$ e

T_1 è all'incirca l'intervallo di tempo impiegato per raggiungere il valore di cresta.

In pratica, introducendo l'impedenza convenzionale $Z_M = M/T_1$, si può formalmente scrivere:

$$U_{max} \cong \frac{M}{T_1} \cdot I = Z_M \cdot I$$

Da tale relazione si può vedere che, a parità di altre condizioni, le impedenze Z_M nel caso dei colpi successivi sono potenzialmente in grado di dar luogo a tensioni indotte con valori più alti per kA di corrente di fulmine. Nel caso dei colpi successivi, per il tempo di salita si può assumere il valore $T_1 = 0,25 \mu s$, circa un ordine di grandezza al di sotto dei valori dei primi colpi, mentre per la corrente di cresta si hanno valori massimi che sono circa la metà di quelli dei primi colpi, per cui a parità di M i colpi successivi danno luogo a valori di U_{max} che sono circa cinque volte più grandi dei valori di U_{max} dei primi colpi.

La mutua induttanza M è una costante che dipende dalla geometria del problema e dalle caratteristiche del mezzo (in quanto contiene μ al suo interno). Si consideri il caso di figura 31 in cui si ha una spira rettangolare di larghezza a e altezza b , che dista r da un conduttore rettilineo percorso dalla corrente di fulmine.

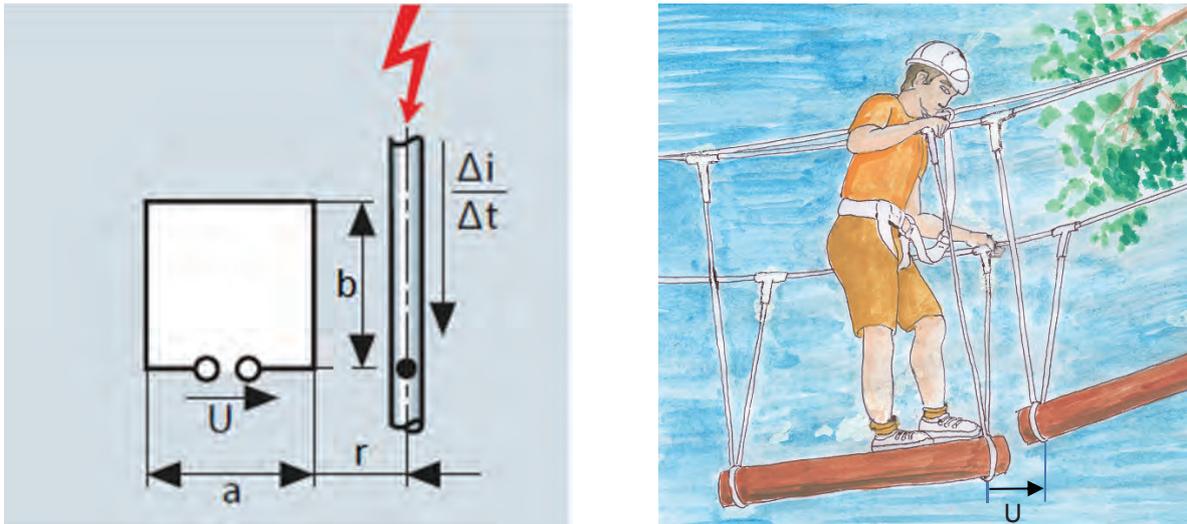


Figura 31: Corrente variabile che induce una tensione ai capi di una spira rettangolare (con un esempio)

Si ha la seguente espressione per la mutua induttanza in tale caso ($\mu \approx \mu_0$ e $\mu_0/2\pi = 2 \cdot 10^{-7} \text{ H/m} = 0,2 \cdot \mu\text{H/m}$):

$$M = \frac{\mu}{2\pi} \cdot b \cdot \ln\left(1 + \frac{a}{r}\right) = 0,2 \cdot b \cdot \ln\left(1 + \frac{a}{r}\right) \quad [\mu\text{H}]$$

dove le lunghezze a , b ed r sono espresse in m.

Nelle figure 32 sono riportati i valori di M al variare della distanza r tra la spira e il percorso della corrente, per diversi valori dei due parametri a e b , che potrebbero essere di interesse nel caso di attrazioni dei parchi avventura. Si vede che più la spira è vicina al percorso della corrente di fulmine e più è lungo il tratto parallelo con tale percorso, e più è alta la mutua induttanza e quindi la tensione indotta.

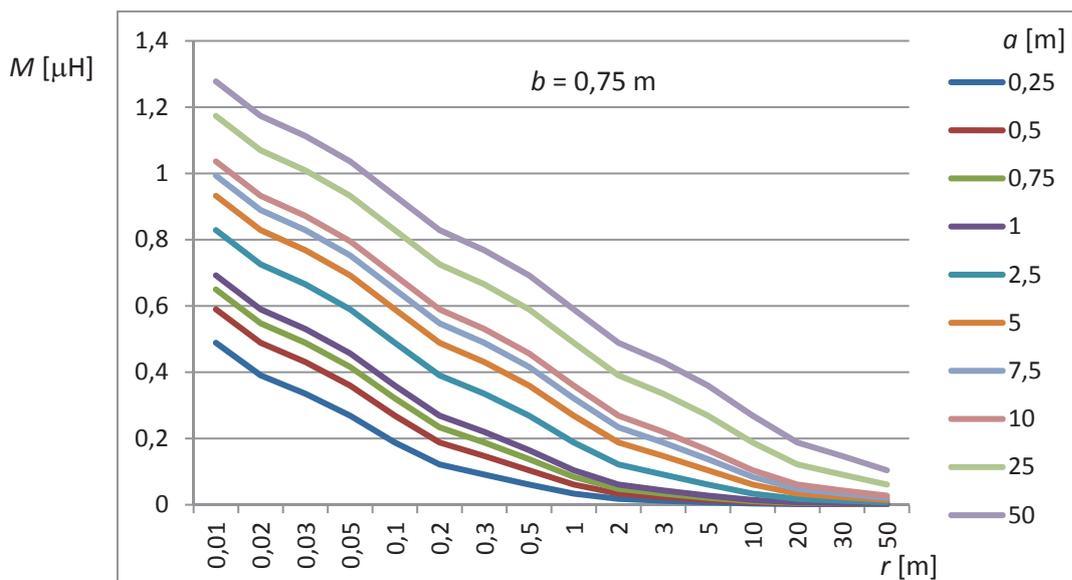


Figura 32a: Valori di M al variare della distanza r tra spira e corrente, parametrizzati per a , per $b = 0,75 \text{ m}$

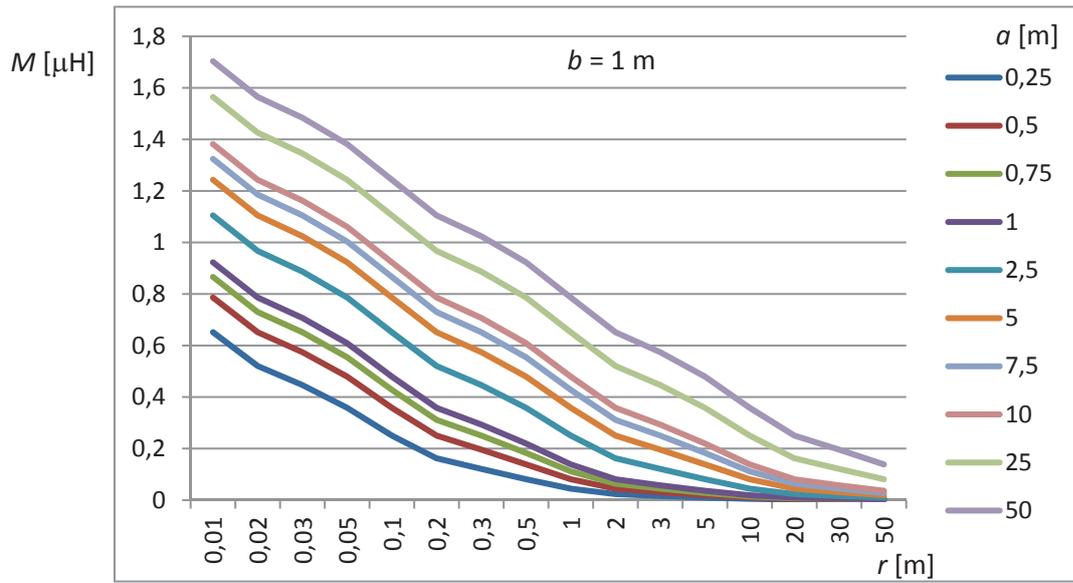


Figura 32b: Valori di M al variare della distanza r tra spira e corrente, parametrizzati per a , per $b = 1$ m

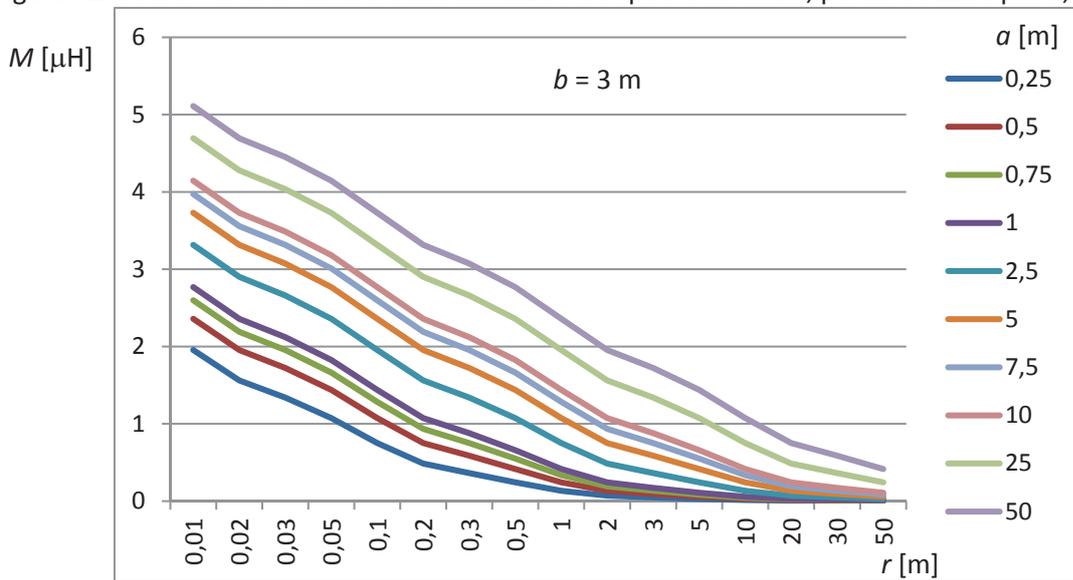


Figura 32c: Valori di M al variare della distanza r tra spira e corrente, parametrizzati per a , per $b = 3$ m

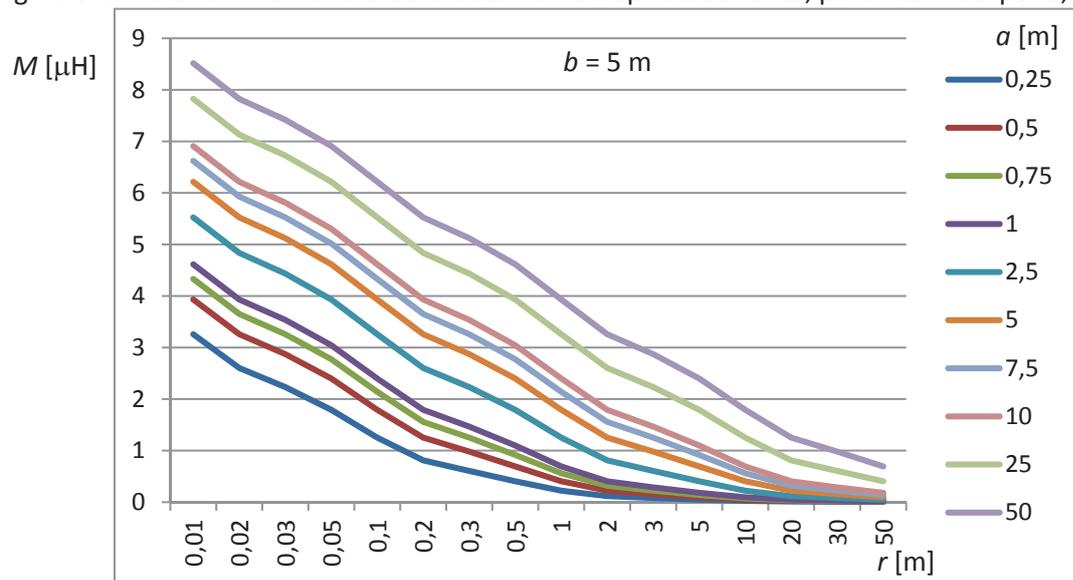


Figura 32d: Valori di M al variare della distanza r tra spira e corrente, parametrizzati per a , per $b = 5$ m

Se la spira fa parte del circuito percorso dalla corrente che genera il campo, come in figura 33, si parla di autoinduttanza L . In tal caso, introducendo l'impedenza convenzionale $Z_L=L/T_1$, si può formalmente scrivere:

$$U_{max} \cong \frac{L}{T_1} \cdot I = Z_L \cdot I$$

Anche l'autoinduttanza è una costante che dipende dalla geometria del problema e dalle caratteristiche del mezzo. Si consideri il caso di figura 33 in cui si ha una spira rettangolare di larghezza a e altezza b e il conduttore rettilineo percorso dalla corrente di fulmine ha raggio r .

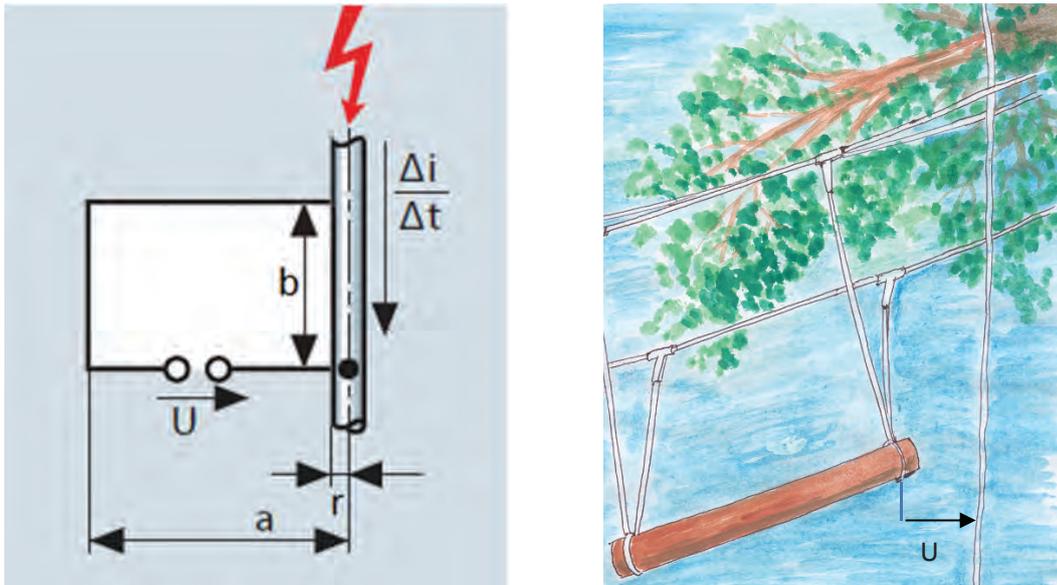


Figura 33: Tensione indotta in una spira che è parte del circuito percorso dalla corrente (con un esempio)

Si ha la seguente espressione per l'autoinduttanza in tale caso ($\mu \cong \mu_0$ e $\mu_0/\pi=4 \cdot 10^{-7}$ H/m= $0,4 \cdot \mu\text{H/m}$):

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot b \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right) = 0,4 \cdot b \cdot \ln\left(\frac{a}{r}\right) \quad [\mu\text{H}]$$

dove le lunghezze a , b ed r sono espresse in m.

Nelle figure 34 sono riportati i valori di L al variare di r e dei due parametri a e b , che potrebbero essere di interesse nel caso di attrazioni dei parchi avventura.

Si può vedere che se il conduttore su cui passa la corrente di fulmine è uno dei lati della spira, allora le tensioni indotte sono più elevate. Inoltre, per analogia col caso precedente le tensioni indotte dai colpi successivi sono più alte di quelle indotte dai primi colpi, e le tensioni indotte in spire con lunghi tratti paralleli al percorso della corrente di fulmine sono più alte.

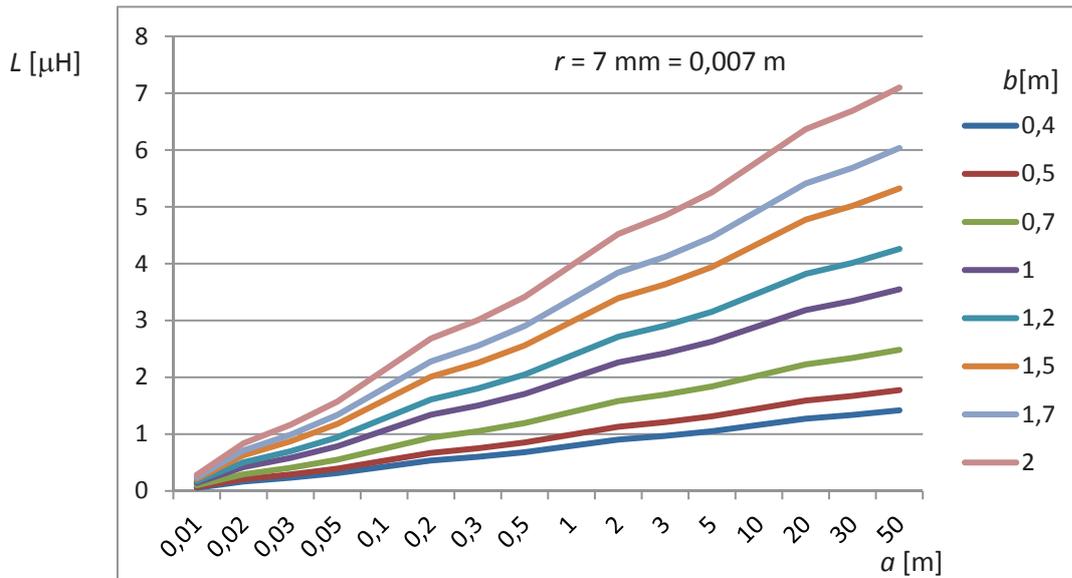


Figura 34a: Valori di L al variare di a , parametrizzati per b , per $r = 0,007 \text{ m}$

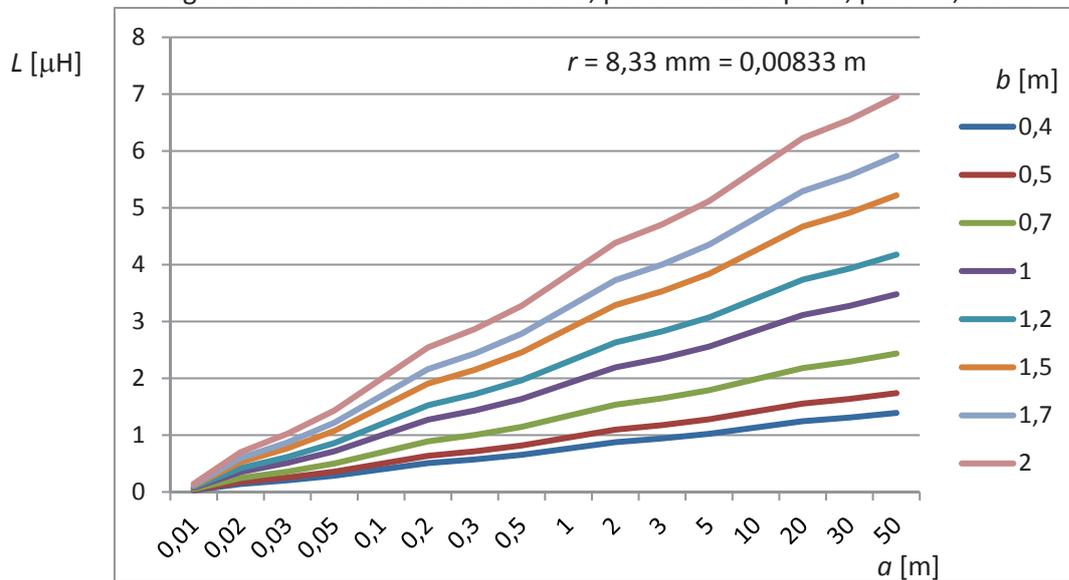


Figura 34b: Valori di L al variare di a , parametrizzati per b , per $r = 0,00833 \text{ m}$

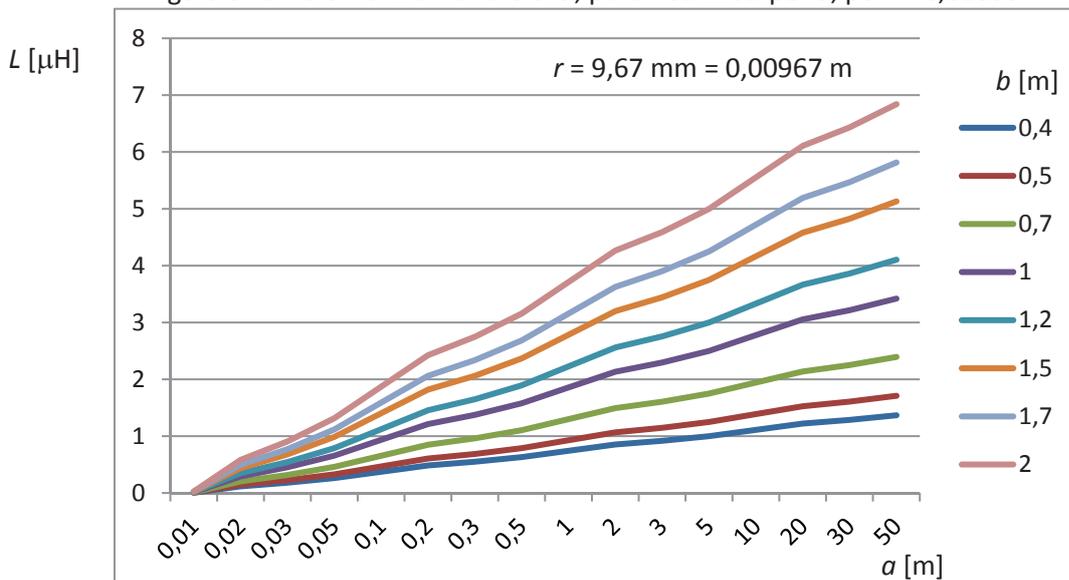


Figura 34c: Valori di L al variare di a , parametrizzati per b , per $r = 0,00967 \text{ m}$

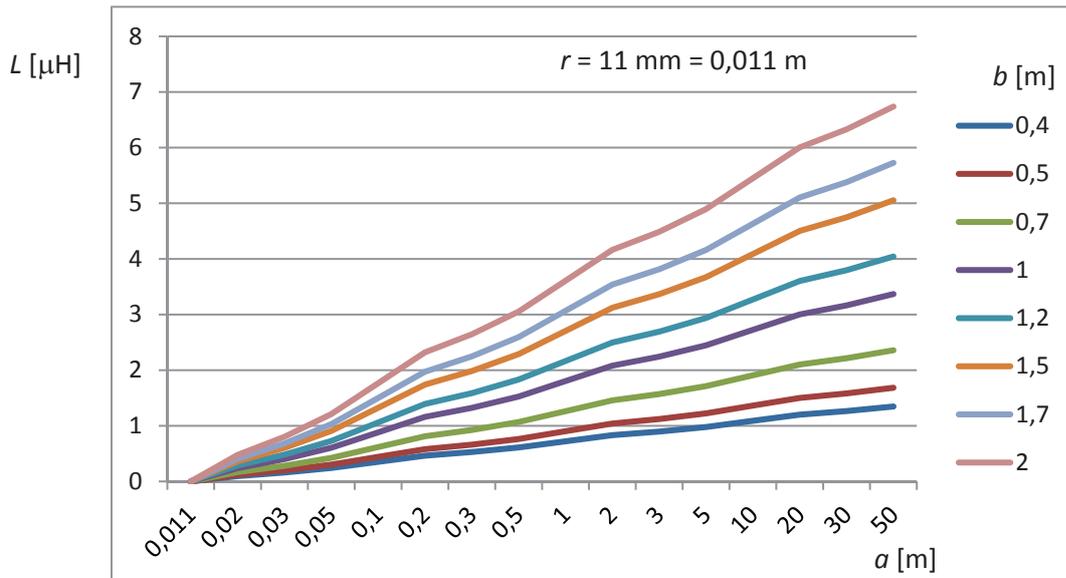


Figura 34d: Valori di L al variare di a , parametrizzati per b , per $r=0,011$ m

Le tensioni massime U_{max} indotte in una spira possono essere tali da superare la tensione di scarica in aria alla distanza s_i tra i capi della spira, ad esempio nelle situazioni illustrate nelle figure 35.

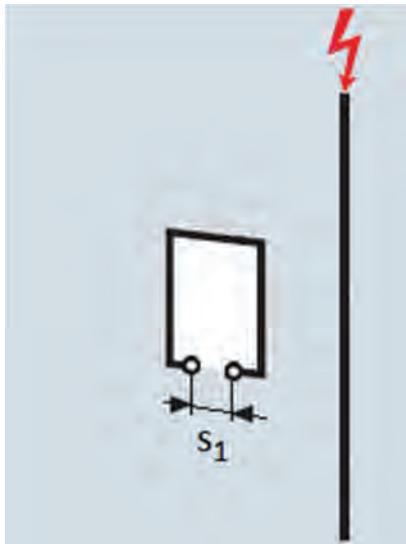


Figura 35a: Spira indotta

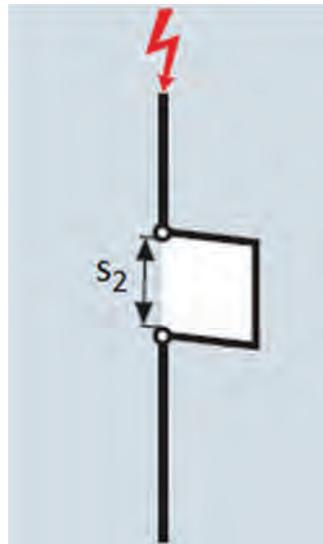


Figura 35b: Ansa in conduttore



Figura 35c: Spira indotta

Come già ricordato, il potenziale di rottura dielettrica dell'aria pulita e asciutta a pressione atmosferica è di 3000 V/mm, anche se poi l'umidità e il pulviscolo possono abbassare il valore di tale parametro fino a 400 V/mm. Il materiale conduttore con cui sono fatti i capi della spira influenza marginalmente il fenomeno. Invece la presenza di materiali interposti nello spazio tra i capi della spira può innalzare o abbassare il potenziale di rottura, a seconda del comportamento del materiale nelle condizioni di campo che si vengono a creare.

Quando lo spessore s_i dello strato isolante si riduce ad alcuni millesimi di millimetro, anche tensioni U_{max} relativamente basse possono dare origine a campi elettrici elevati

che superano il valore di rigidità dielettrica. Le scariche possono dar luogo a emissione di energia luminosa (ultravioletti), energia sonora, spostamento d'aria, schizzi di materiale conduttore fuso, fumi e, se ricorrono le condizioni, innescare incendi o esplosioni.

Nel caso di figura 31 (35a) è possibile avere un'idea della corrente indotta nella spira nei primi istanti del fenomeno. In particolare, in tali primi istanti si può scrivere:

$$U = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a$$

dove

L_a è l'autoinduttanza della spira,

R_a è la resistenza della spira,

i_a è la corrente indotta nella spira.

Sostituendo in tale espressione quella di U e trascurando il termine $R_a i_a$, poiché $R_a i_a < L_a (di_a/dt)$, si ha:

$$M \frac{di}{dt} \cong L_a \frac{di_a}{dt}$$

da cui:

$$i_a \cong \frac{M}{L_a} i$$

dove i è la corrente inducente.

Un'espressione per la spira di figura 31, non valida in bassa frequenza, è la seguente, dove x è il raggio del conduttore con cui è fatta la spira:

$$L_a = \frac{\mu}{\pi} \left[a \ln \left(\frac{2a}{x} \right) + b \ln \left(\frac{2b}{x} \right) - 2(a+b) + 2\sqrt{a^2 + b^2} - a \operatorname{arsinh} \left(\frac{a}{b} \right) - b \operatorname{arsinh} \left(\frac{b}{a} \right) \right]$$

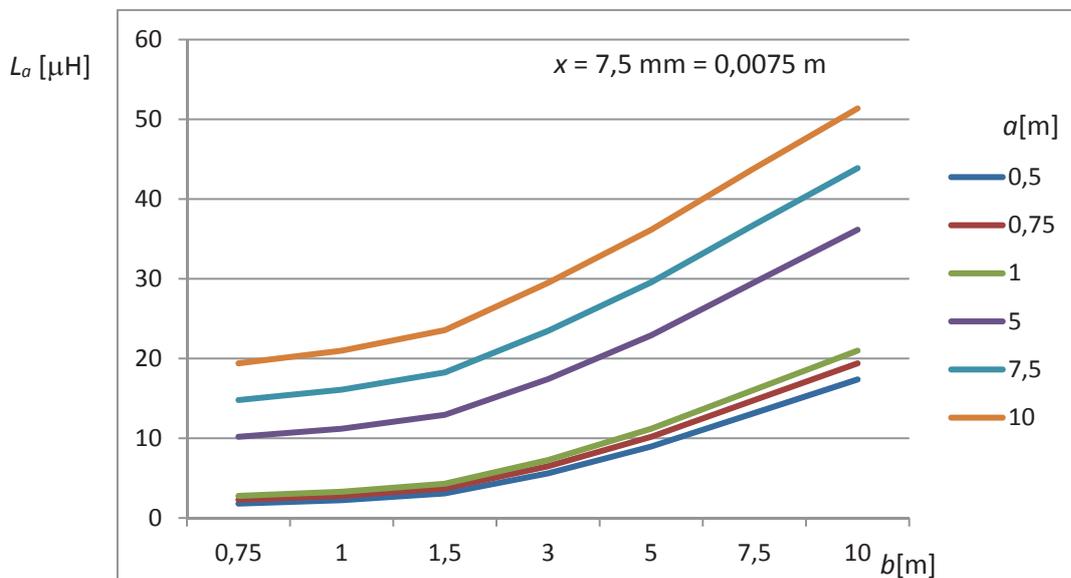


Figura 36: Valori di L_a al variare di b , parametrizzati per a , per $x = 0,0075$ m

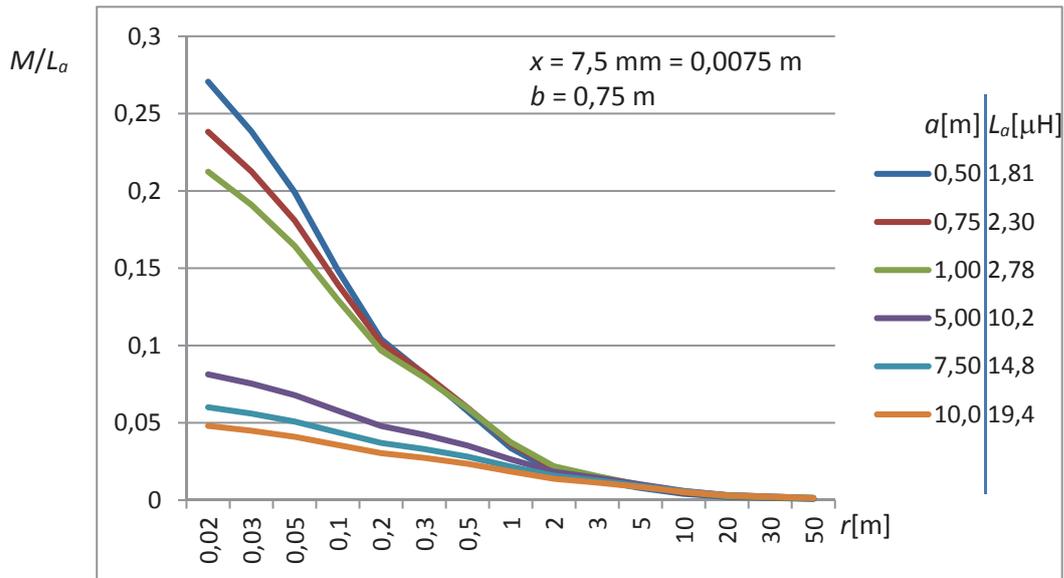


Figura 37a: Valori di M/L_a al variare di r , parametrizzati per a , per $x=0,0075 \text{ m}$ e $b=0,75 \text{ m}$

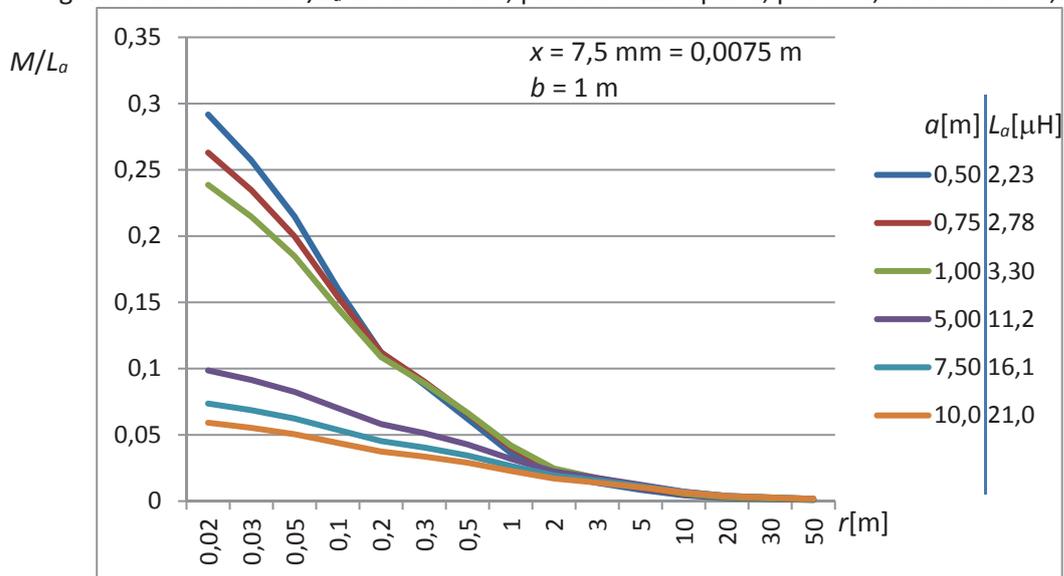


Figura 37b: Valori di M/L_a al variare di r , parametrizzati per a , per $x=0,0075 \text{ m}$ e $b=1 \text{ m}$

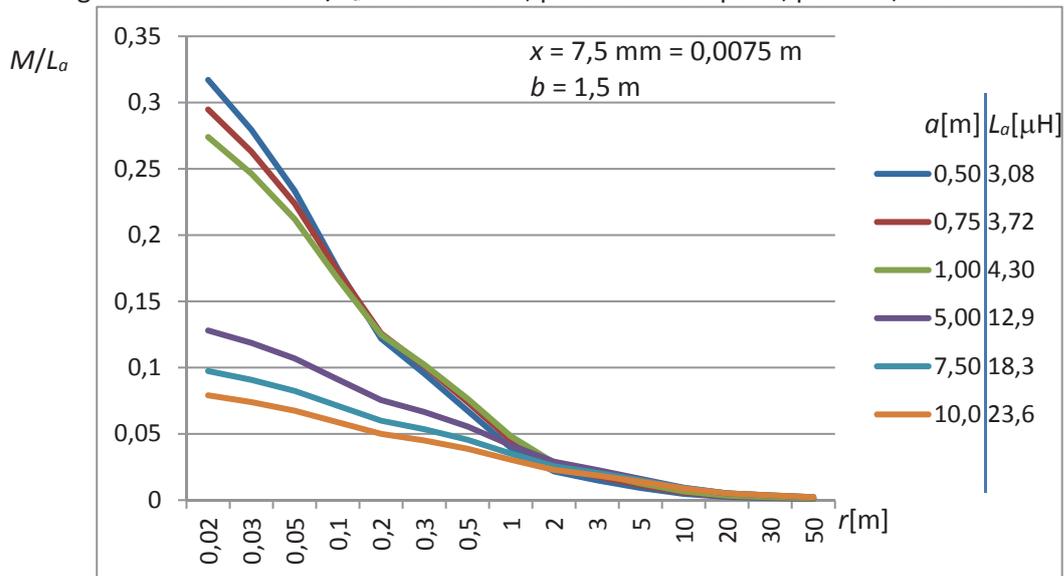


Figura 37c: Valori di M/L_a al variare di r , parametrizzati per a , per $x=0,0075 \text{ m}$ e $b=1,5 \text{ m}$

3.7. Tensioni di contatto e passo

Spesso si possono avere oggetti conduttori infissi nel suolo (nel caso dei parchi avventura possono essere fatti rientrare nella definizione di oggetti conduttori anche i tronchi degli alberi nel momento in cui sono attraversati dalla corrente di fulmine), e tramite tali oggetti una corrente elettrica è dispersa nel terreno. In senso lato simili oggetti sono definiti *dispersori* e l'effetto delle correnti che si disperdono attraverso di essi è quello di innalzare il potenziale elettrico nel terreno che si trova nei pressi del dispersore rispetto al potenziale che si ha a distanza maggiore. Le *tensioni di contatto e passo* sono tensioni cui possono essere soggetti gli esseri viventi nel momento in cui giungono a contatto con l'oggetto conduttore e con il suolo o nel momento in cui si trovano nella zona del gradiente di potenziale, con gli arti disposti tra due punti a potenziale diverso.

L'effetto di tali tensioni è quello di indurre un passaggio di corrente attraverso il corpo degli esseri viventi, che, a sua volta, può generare diversi effetti fisiologici, alcuni dei quali dannosi e, nei casi più gravi, può condurre fino alla morte. Gli effetti sono particolarmente gravi quando il passaggio della corrente interessa l'area cardiaca di un essere vivente.

Si parla in generale di esseri viventi perché le tensioni di contatto e passo, oltre che per gli esseri umani, sono pericolose anche per il bestiame.

In particolare, per quanto riguarda le tensioni di passo, la probabilità che il percorso della corrente nel passaggio attraverso il corpo, da un arto all'altro, possa raggiungere il cuore è inferiore nel caso di esseri viventi bipedi (inclusi gli esseri umani) rispetto al caso di esseri viventi quadrupedi. Ciò dà luogo ad una statistica delle lesioni riscontrate diversa nei due casi (ad es.: nel caso di quadrupedi è molto facile che una fulminazione nel terreno nei pressi di un branco possa portare alla morte di molti capi per arresto cardiaco o fibrillazione ventricolare, figura 38).

Fattori di rischio specifici per il bestiame, in caso di fulminazione, possono essere:

- l'entità del valore della resistenza del corpo del particolare capo (ad esempio un tronco grande e con organi interni ricchi di liquidi può dar luogo ad una resistenza del corpo bassa e quindi ad essere attraversati da una corrente più alta a parità di tensione),
- l'essere riuniti in branchi, con tendenza a imitare i comportamenti di altri membri del branco (ad esempio addossandosi a recinzioni metalliche).

Ovviamente, vi sono comportamenti prudenti che possono essere insegnati agli esseri umani, ma che sono più difficili da seguire per gli animali, come:

- indossare calzature isolanti, e
- rimanere su suolo isolante e lontano da oggetti che potrebbero disperdere corrente nel terreno.



Figura 38: Morte di 300 renne in Norvegia per un fulmine (29-08-2016; foto [37])

3.7.1. Tensioni di contatto

Quando la corrente $i(t)$ impressa dal fulmine fluisce nel terreno attraverso un oggetto (o un dispersore, o il tratto terminale del percorso della corrente di fulmine) produce una caduta di tensione

$$U_E = R_E \cdot i(t)$$

che dipende dall'ampiezza della corrente di fulmine (i) e dalla resistenza di terra (R_E) dell'oggetto o del tratto di terreno attraversato dalla corrente. La tensione U_E è detta tensione totale di terra (figura 39).

Con riferimento alla figura 39, una persona in prossimità dell'oggetto, si trova in un punto del terreno a potenziale diverso da zero. Tale potenziale è schematizzato in figura come dovuto alla resistenza R_2 ed alla resistenza R_{EB} . La resistenza R_2 è una parte di R_E , mentre la resistenza R_{EB} è la resistenza del terreno tra i piedi della persona e la parte di oggetto (o di dispersore, o di tratto di percorso della corrente di fulmine) conficcata nel terreno. Più la persona si trova distante dalla parte di oggetto conficcata nel terreno e più il suo potenziale si avvicina a zero (cioè si riduce il valore di R_2). Si noti che la resistenza ($R_B + R_{EB}$) non si trova in parallelo con R_E . (a meno che non si possa assumere che la persona si trovi ad una distanza per cui $R_2 \approx 0$ ed $R_E \approx R_1$).

Se una persona tocca l'oggetto devia attraverso di sé una parte della corrente (che attraversa R_B), tuttavia la tensione U_E non cambia sensibilmente, in quanto la corrente che passa attraverso la persona è trascurabile rispetto alla corrente che attraversa l'oggetto (si noti infatti che $R_B + R_{EB} \gg R_E$). Però la corrente attraverso la persona

modifica il potenziale del terreno nel punto di contatto (per tale ragione è stata introdotta la resistenza R_{EB}). La corrente che attraversa la persona e si scarica a terra induce una tensione U_T ai capi della persona, tale tensione si chiama *tensione di contatto*. Si noti che anche se U_T è solo una parte della tensione totale U_E , il suo valore è quello che determina l'eventuale danno fisiologico.

Formalmente, con riferimento alla schematizzazione di figura 39, si può scrivere l'approssimazione:

$$U_T = \frac{R_B}{R_B + R_{EB}} \cdot U_{ST} \approx \frac{R_B}{R_B + R_{EB}} \cdot \frac{R_1}{R_E} \cdot U_E$$

però sui valori da inserire all'interno di tale relazione si possono fare solo delle ipotesi.

La tensione U_{ST} , chiamata tensione di contatto a vuoto, rappresenta (in buona approssimazione) la tensione che esiste, prima del contatto, tra l'oggetto e il punto del terreno occupato dalla persona.

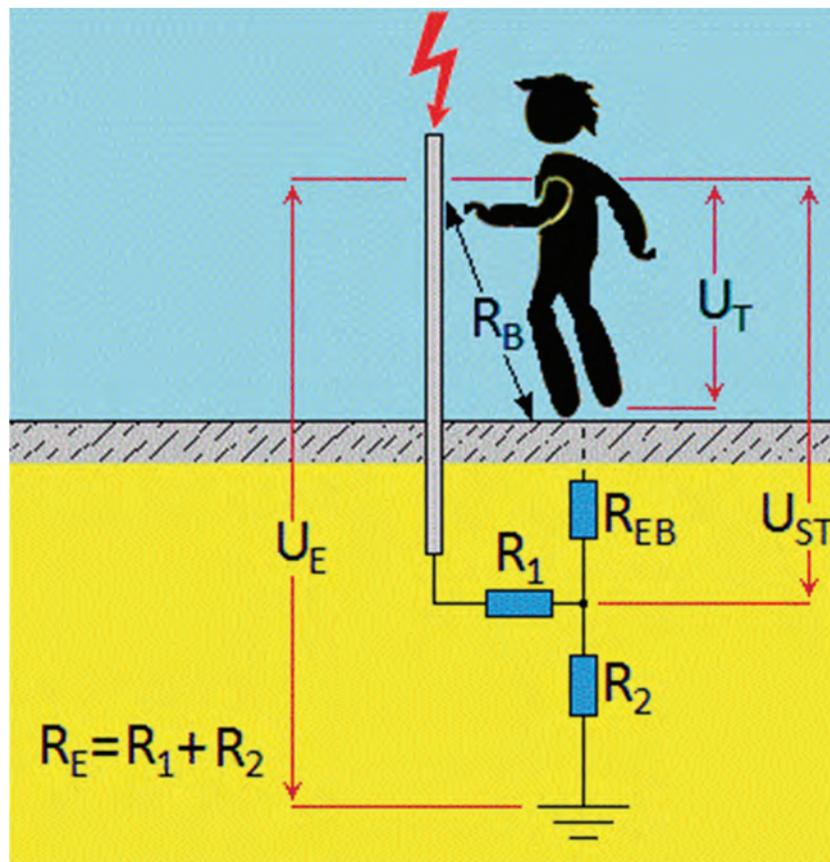


Figura 39: Schema di principio per il calcolo della tensione di contatto

3.7.1.1. Misure di protezione contro le tensioni di contatto

Essere vicini ad un tratto di conduttore attraversato da una frazione non trascurabile della corrente di fulmine e trovarsi contemporaneamente con i piedi a contatto con il terreno può essere pericoloso, per via delle tensioni di contatto.

Il pericolo è ridotto ad un livello tollerabile se è rispettata almeno una delle seguenti condizioni:

- a) normalmente non vi è presenza di persone entro 3 metri dal tratto di conduttore che può essere attraversato dalla frazione della corrente di fulmine;
- b) il conduttore che può essere attraversato da una frazione della corrente di fulmine è una calata di un LPS (Lightning Protection System), realizzato con captatori, calate e dispersori, e le calate sono almeno 10 (in modo che la corrente di fulmine che attraversa ogni calata sia ridotta, poiché la corrente di fulmine che colpisce un LPS si ripartisce tra le calate);
- c) la resistenza di contatto dello strato superficiale del suolo, entro 3 m dal conduttore che può essere attraversato da una frazione della corrente di fulmine, non è inferiore a 100 k Ω ; uno strato di materiale isolante, ad esempio uno strato di asfalto di 5 cm di spessore o uno strato di ghiaia di 15 cm di spessore, riduce il pericolo ad un valore tollerabile.

Se nessuna delle condizioni sopracitate è soddisfatta, devono essere adottate misure di protezione contro eventuali danni ad esseri viventi dovuti alle tensioni di contatto, quali:

- realizzare un isolamento del conduttore che può essere attraversato da una frazione della corrente di fulmine e che si trova in condizione di essere toccato, con uno strato isolante che abbia una tensione di tenuta ad impulso (1,2/50 μ s) di 100 kV, ad esempio mediante almeno 3 mm di polietilene reticolato;
- mettere in opera barriere e/o cartelli indicatori atti a minimizzare la probabilità di contatto con il conduttore che può essere attraversato da una frazione della corrente di fulmine.

3.7.2. Tensioni di passo

Se la corrente si scarica in un unico punto sul terreno (che in prima approssimazione può essere assunto come un conduttore omogeneo) o su un oggetto (o un dispersore) conficcato in esso, si crea un gradiente di potenziale (figura 40). Ciò significa che punti a distanza diversa dal punto di caduta si trovano a potenziale diverso.

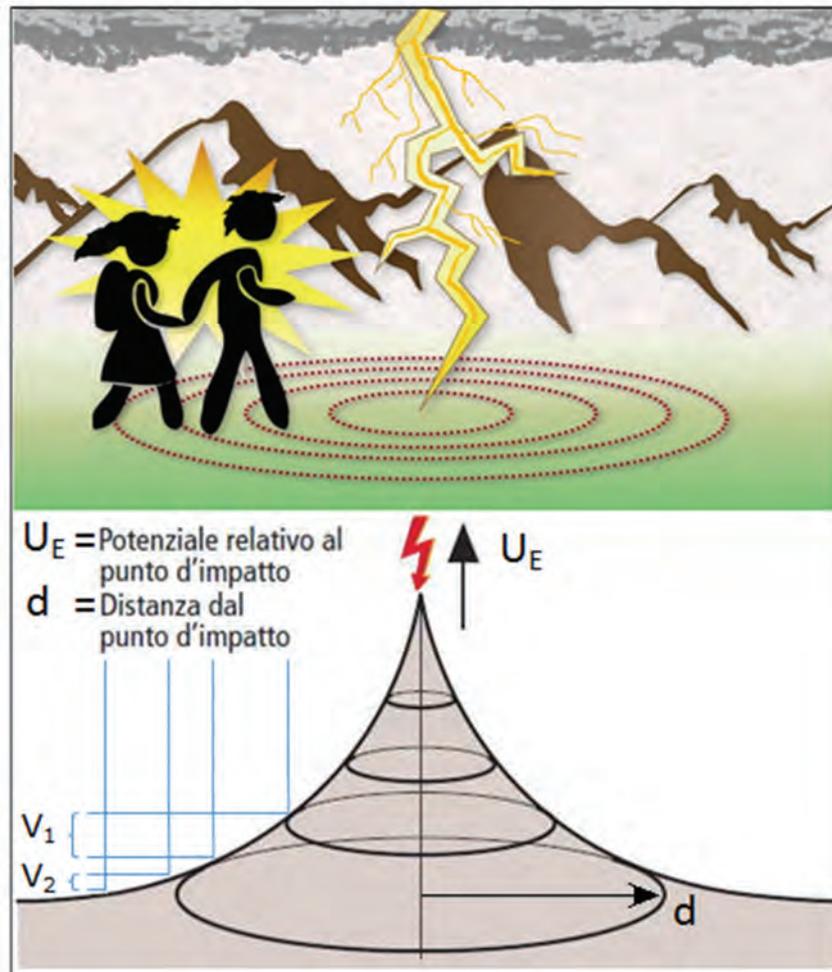


Figura 40: Schematizzazione del gradiente di potenziale che si ha nel terreno in caso di fulminazione

Se una persona cammina sul terreno e i suoi piedi si trovano su punti a potenziale diverso è soggetta ad una differenza di potenziale che può risultare anche pericolosa. Formalmente è definita *tensione di passo* la tensione tra due punti del terreno distanti tra loro un metro.

Per la precisione, con riferimento alla figura 41, nel caso di scarica della corrente di fulmine nel terreno attraverso un oggetto in esso conficcato (o un dispersore, o il tratto terminale del percorso della corrente di fulmine) di resistenza di terra R_E , la *tensione di passo* U_S è la tensione applicata alla resistenza R_B del corpo umano, mentre U_{SS} è la *tensione di passo a vuoto*, che esiste tra i due punti del terreno prima del contatto della persona (come nel caso della tensione di contatto, la presenza della persona modifica l'andamento dei potenziali sulla superficie del terreno). Nello schema della figura 41 si è indicato con R_{EP} la resistenza del terreno tra ciascun piede e la parte di oggetto (o di dispersore, o di percorso della corrente di fulmine) conficcata nel terreno. Per semplicità le due resistenze R_{EP} sono state assunte uguali, come se fossero indipendenti, e nella figura è stata omessa la resistenza del terreno tra i due piedi R_S , che si pone in parallelo alla resistenza del corpo R_B (il suo effetto è quello di aumentare la differenza tra U_{SS} ed U_S). La differenza tra U_{SS} ed U_S può essere molto elevata, anche perché nel caso della tensione di passo le resistenze dei due piedi (R_{EP}) sono entrambe in serie al corpo umano (R_B), mentre nel caso della tensione di

contatto le due resistenze sono in parallelo tra loro (R_{EB}) e poi in serie al corpo umano. In ogni caso la differenza tra U_{SS} ed U_S dipende direttamente dalla resistività dello strato superficiale del terreno, per tale motivo può essere utile rendere tale strato il più isolante possibile, ad esempio con uno strato di asfalto di spessore opportuno.

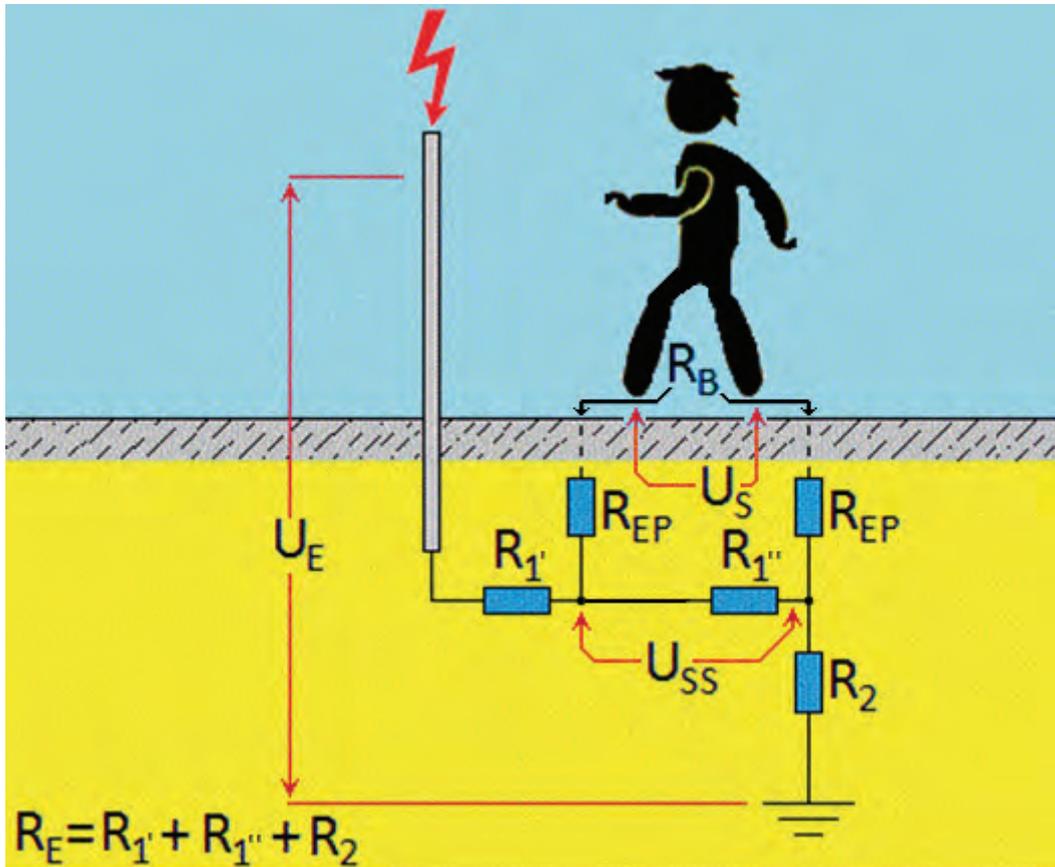


Figura 41: Schema di principio per il calcolo della tensione di passo, nei calcoli derivanti da tale schema va aggiunta la resistenza del terreno tra i due piedi R_S in parallelo alla resistenza del corpo R_B

Formalmente, con riferimento alla schematizzazione di figura 41, si può scrivere l'approssimazione:

$$U_S = \frac{R_B}{R_B + 2R_{EP} \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right)} \cdot U_{SS} \approx \frac{R_B}{R_B + 2R_{EP} \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right)} \cdot \frac{R_1''}{R_E} \cdot U_E$$

però sui valori da inserire all'interno di tale relazione si possono fare solo delle ipotesi.

3.7.2.1. Misure di protezione contro le tensioni di passo

Trovarsi vicino al punto in cui una corrente di fulmine è riversata nel terreno ed avere i piedi in punti a potenziale diverso può essere pericoloso per via delle tensioni di passo.

Il pericolo è ridotto ad un livello tollerabile se è rispettata almeno una delle seguenti condizioni:

- a) normalmente non vi è presenza di persone entro 3 metri dal tratto di conduttore attraverso cui la frazione della corrente di fulmine è riversata nel terreno;
- b) il conduttore attraverso cui la frazione della corrente di fulmine è riversata nel terreno è uno dei dispersori di un LPS (Lightning Protection System), realizzato con captatori, calate e dispersori, e i dispersori sono almeno 10 (in modo che la corrente di fulmine che attraversa ogni dispersore sia ridotta, poiché la corrente di fulmine che colpisce un LPS si ripartisce tra i dispersori) oppure il dispersore è realizzato ad anello con almeno 10 nodi di collegamento con le calate o il dispersore è a maglia;
- c) la resistenza di contatto dello strato superficiale del suolo, entro 3 m dal conduttore che può essere attraversato da una frazione della corrente di fulmine, non è inferiore a 100 k Ω ; uno strato di materiale isolante, ad esempio uno strato di asfalto di 5 cm di spessore o uno strato di ghiaia di 15 cm di spessore, riduce il pericolo ad un valore tollerabile.

Se nessuna delle condizioni sopraccitate è soddisfatta, devono essere adottate misure di protezione contro il danno ad esseri viventi dovuto alle tensioni di passo, quali:

- realizzare l'equipotenzializzazione del terreno mediante un sistema di dispersori a maglia;
- mettere in opera barriere e/o cartelli indicatori atti a minimizzare le probabilità di accesso all'area pericolosa entro 3 metri dal conduttore che può essere attraversato da una frazione della corrente di fulmine.

4. Protezione dai fulmini dei Parchi Avventura

Non si conoscono ad oggi dispositivi o metodi per i quali sia stata scientificamente accertata la capacità di impedire la formazione dei fulmini o di prevenire la fulminazione di una struttura.

Viceversa, la valutazione del rischio di fulminazione è un procedimento durante il quale si valutano le caratteristiche di ciò che si vuole proteggere dai fulmini (il parco avventura, le sue strutture o altro) e, conseguentemente, si scelgono opportune misure di protezione.

Le misure di protezione contro le scariche atmosferiche non possono impedire la formazione dei fulmini, tuttavia possono essere utili per ridurre le conseguenze di una fulminazione.

4.1. Danni dovuti ai fulmini in un parco avventura

La fulminazione diretta in un parco avventura può determinare:

- danni meccanici immediati (danneggiamento di strutture, danneggiamento di funi metalliche, fusione o perforazione di parti metalliche, sforzi elettrodinamici);
- danni dovuti ad incendi;
- danni dovuti ad esplosioni (dovute al plasma incandescente del canale di fulmine, ad evaporazione di acqua o di linfa degli alberi, all'innescio di eventuali sostanze esplosive);
- danni alle persone (per fulminazione diretta, per tensioni di contatto e passo, per ustioni o altro; si rimanda al capitolo 2 per indicazioni in proposito).

Alcuni danni ai beni materiali possono determinare anche danni alle persone, esempi di simili danni sono:

- incendi e esplosioni;
- rottura e caduta di rami o di parti di albero o di parti strutturali di edifici, rifugi, tralicci, pali;
- danni materiali alle attrazioni, alle funi o ad altre parti del percorso acrobatico.



Cinque persone sono state ferite, tre gravemente, dopo essere state colpite da un fulmine in un parco avventura negli Alti Pirenei.

Il gruppo si trovava nel parco avventura quando il fulmine ha colpito. Il fulmine ha colpito l'albero e le funi del percorso acrobatico aereo dove le vittime stavano camminando.

Un bambino è stato ricoverato in stato di coma all'ospedale, ma successivamente ha ripreso conoscenza. Un visitatore quattordicenne e un istruttore ventenne hanno subito gravi ustioni rispettivamente alla schiena e al braccio.

Un istruttore quarantaduenne e un altro visitatore quattordicenne sono stati feriti, ma non gravemente. Infine venticinque persone sono state ricoverate sotto shock.

Nel momento in cui è il fulmine ha colpito il parco erano presenti sessanta persone e il personale responsabile aveva dato inizio alla chiusura, per via del temporale che si stava avvicinando, ma i visitatori non hanno avuto il tempo di scendere dalle cime degli alberi che sono state colpite.



Figura 42: Resoconto di un caso di fulminazione avvenuto nell'agosto del 2012 in un parco in Francia

4.2. Una strategia adottabile per la protezione dai fulmini

Una possibile strategia per la protezione dai fulmini nei parchi avventura si basa su una serie di azioni che i proprietari/gestori dovrebbero mettere in atto:

- predisporre le eventuali misure di protezione decise, sulla base della valutazione del rischio di fulminazione del parco, per la salvaguardia del personale e degli ospiti;
- predisporre un *piano di sicurezza per la protezione dai fulmini* (che includa le cartine metereologiche tipiche della zona, le previsioni del tempo, da aggiornare ogni giorno, la conformazione locale idrogeologica, le vie di evacuazione predeterminate e i rifugi disponibili), una simile preparazione aiuta a ridurre il possibile caos in caso di evacuazione durante un temporale;
- valutare anche il tempo che separa dall'arrivo sul parco avventura del fenomeno atmosferico (t_{fa}), confrontando il valore ottenuto con il tempo per la messa in atto del piano di sicurezza (t_m), che è pari alla somma tra il tempo necessario per l'evacuazione delle attrazioni all'aperto (t_e), il tempo necessario per portare in un luogo sicuro (o fuori dal parco) i visitatori a terra (t_f) e un opportuno margine di sicurezza per la soluzione di eventuali imprevisti (t_i); per la sicurezza deve essere $t_{fa} \gg t_m$, con $t_m = t_e + t_f + t_i$, mentre se $t_{fa} = t_m$ si deve dare inizio a quanto indicato nel piano di sicurezza.

Tabella 7: Sistema di allerta per grandi parchi negli Stati Uniti

Negli Stati Uniti si adotta la distanza di sicurezza di 16 km (10 miglia) per capire quando chiudere un parco avventura o una parte di esso.
 La distanza di 16 km è quella che si ritiene mediamente percorribile dalla cella temporalesca in mezz'ora (pertanto si assume $t_m = 30$ minuti).
 Se il sistema di allerta rileva attività temporalesca (ovvero una tempesta con fulmini) nel raggio di 16 km da un parco avventura, allora tutte le attrazioni all'aperto (incluse quelle nell'acqua) sono chiuse per la sicurezza dei visitatori.

In alcuni paesi (tabella 7) si adotta per t_m il tempo necessario alla cella temporalesca per percorrere 10 miglia (16 km), quando il fronte temporalesco si muove alla velocità media di 20 miglia orarie (circa 32 km/h).

In realtà, il discorso può essere riformulato in termini di distanze. La distanza a cui dare inizio al piano di sicurezza (d_{fa}) deve tener conto di molte variabili, quali il tempo necessario per evacuare le attrazioni, il tempo necessario per portare in un luogo sicuro i visitatori una volta che si trovano a terra (situazione "safe"), il tipo di fenomeni temporaleschi che interessano la zona, la loro velocità tipica (v_{fa}), il numero di addetti alle operazioni di sicurezza, la superficie del parco, un margine per eventuali imprevisti, etc.

Nel caso dell'esempio di tabella 7, la distanza è stata scelta pari a 16 km perché si è assunta una velocità media del fronte temporalesco pari a 32 km/h, in modo da avere a disposizione almeno mezz'ora per la procedura di messa in sicurezza del parco, in generale, se i dati effettivi sono differenti dai precedenti valori (ad esempio perché è necessario avere a disposizione più tempo), allora è sufficiente verificare il seguente insieme di relazioni:

$$t_{fa} \gg t_m;$$

$$t_m = t_e + t_f + t_i;$$

$$t_{fa} = d_{fa}/v_{fa}$$

A titolo di esempio, in figura 43 è riportata su una mappa della zona urbana di Roma l'indicazione approssimata della distanza di 16 km (10 miglia) utilizzata qualche volta come margine di sicurezza.

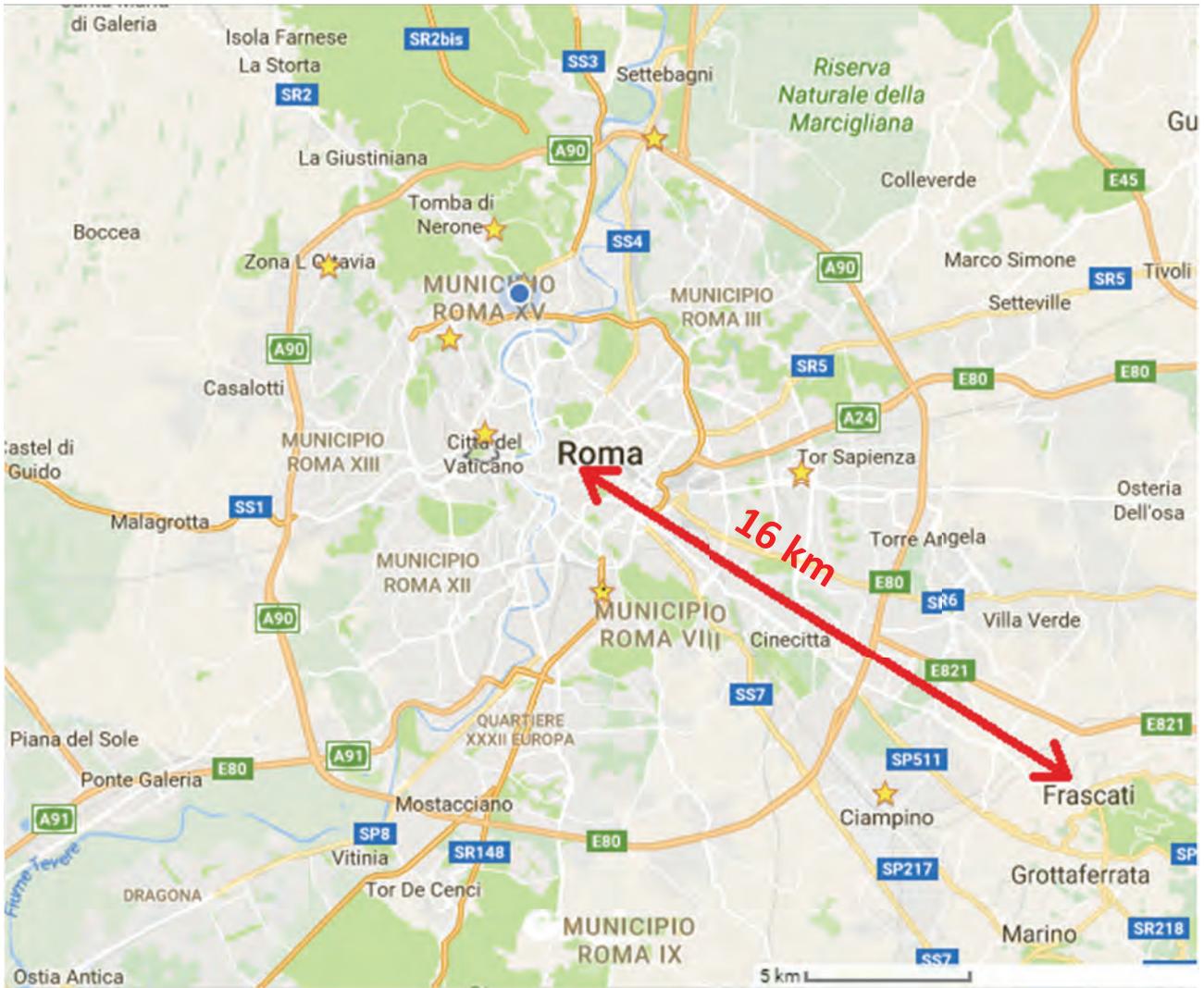


Figura 43: Distanza di 16 km (10 miglia) riportata su una mappa della zona urbana di Roma

4.3. Informazioni sull'aprossimarsi di un temporale

Esistono vari metodi, più o meno efficienti, per avere informazioni sull'aprossimarsi di un temporale:

- il più semplice, ma anche il meno affidabile, è basato sulla ricerca con vista e udito di segnali temporaleschi in avvicinamento (la soggettività, e quindi la pericolosità, di tale metodo è evidente);
- l'utilizzo di App o di siti web su smartphone o tablet (ma deve essere presente segnale UMTS o LTE), purtroppo la scala con cui sono fornite le informazioni in tali casi è di solito troppo grande e non sempre le informazioni sono in tempo reale;
- l'utilizzo di servizi di allarme con avviso via sms, e-mail, messaggio telefonico, ma deve essere possibile avere una connessione alla rete telefonica (mobile o fissa) o alla rete internet;
- l'utilizzo dei thunderstorm warning systems (TWS).

I thunderstorm warning systems [34] certamente assicurano una protezione maggiore, poiché possono dare l'allarme anche prima dell'inizio dell'attività di fulminazione.

Il ricorso ai TWS ha una serie di pro:

- è possibile definire con una certa esattezza l'area da sorvegliare;
- è possibile avere informazioni sulle fasi di evoluzione del fenomeno;

ed una serie di contro:

- è necessario uno studio per un'appropriata ed efficace installazione;
- è necessario disporre di una sorgente di alimentazione (rete elettrica o batteria).

4.4. Valutazione della necessità delle misure di protezione

È necessario effettuare, caso per caso, un'analisi del rischio. Uno strumento utilizzabile *può essere* la serie normativa CEI EN 62305 [6 – 9]. L'attività però potrà essere svolta da un tecnico competente, poiché la serie non è stata sviluppata per realtà quali i parchi giochi.

La CEI EN 62305-2 [7] ha lo scopo di fornire la procedura per la determinazione del rischio di fulminazione di strutture (edifici) [26].

Il rischio è valutabile secondo la seguente relazione

$$R = N \cdot P \cdot L$$

dove:

N è la frequenza annua di fulminazione del parco avventura;

P è la probabilità di danno;

L indica l'entità delle perdite.

Il rischio tollerabile di perdite di vite umane, secondo la CEI EN 62305-2, è pari a

$$R_T = 10^{-5} = \frac{1}{100.000}$$

Ovvero, secondo un modo di leggere tale valore, è tollerabile la perdita di una persona su centomila persone esposte (durante l'intero arco dell'anno).

Dal confronto del rischio stimato con quello tollerabile scaturisce la necessità, o meno, di adottare misure di protezione:

- se $R_{\text{stimato}} \geq R_T$ è necessario adottare misure di protezione per ridurre il rischio;
- se $R_{\text{stimato}} < R_T$ non è necessario adottare misure di protezione.

Per quanto riguarda i valori da utilizzare per la stima del rischio:

- la valutazione di N è abbastanza semplice;
- più complessa è la corretta valutazione di P ed L .

In Italia esistono diversi sistemi di rilevazione dei fulmini, sia locali che nazionali, così come esistono sistemi simili basati sul territorio delle nazioni confinanti, che sono in grado di rilevare dati anche per il territorio italiano. Tali sistemi sono realizzati con reti di sensori per la rilevazione in tempo reale e la localizzazione spaziale delle scariche di fulmine che avvengono tra nubi e suolo. I dati sono immagazzinati in archivi che a loro volta li trasmettono a chi ne faccia richiesta, spesso a pagamento.

Grazie ai dati di tali archivi, una volta che siano note le coordinate geografiche di un punto sul territorio italiano è possibile conoscere il numero medio di fulmini a terra (per km² e per anno) in una data zona centrata intorno a quel punto.

Questo valore è chiamato nella norma CEI EN 62305-2:

$$N_G = \text{numero medio di fulmini}/(\text{km}^2 \times \text{anno})$$

In realtà i valori di N_G sono calcolati utilizzando una maglia con lato di una certa dimensione: in pratica il valore di N_G fornito è costante per tutti i punti all'interno di un dato elemento di maglia e costituisce il valore mediato degli N_G effettivi dei punti all'interno della maglia. Ciò vuol dire che tra tali punti ce ne saranno alcuni con un valore annuo di N_G più grande del valore fornito e alcuni con un valore annuo più piccolo. Poiché spesso il valore effettivo di N_G in un dato punto dipende dalla conformazione del territorio (montagne, alture, pianure, bacini idrici, ecc.), dalla sua meteorologia (venti, umidità, ecc.) e dalla distribuzione di ciò che vi risiede (guglie, pinnacoli, tralicci, ecc.), i valori puntuali potrebbero differire anche notevolmente dal valor medio fornito.

Sulla base di N_G è possibile stimare il numero annuo di fulmini N che colpiscono un parco avventura.

Nota infatti l'area A del parco (in km²) ed il valore di N_G della zona in cui sorge lo stesso il calcolo è immediato:

$$N = N_G \times A \times C_D$$

dove C_D è il coefficiente di posizione della struttura (tabella 8).

Tabella 8: Coefficiente di posizione C_D [7]

Ubicazione relativa	C_D
Circondata da oggetti di altezza più elevata	0,25
Circondata da oggetti di altezza uguale o inferiore	0,5
Isolata: nessun altro oggetto nelle vicinanze	1
Isolata sulla cima di una collina o di una montagna	2

Se intorno alla struttura vi sono alberi, è dalla parte della sicurezza non considerarli come oggetti circostanti ai fini della scelta di C_D , ciò perché gli alberi sono soggetti a cambiamenti (taglio, potatura, ecc.), in modo da evitare, per via di tali cambiamenti, di dover modificare la valutazione dei rischi e la scelta delle misure di protezione.

Chiaramente questo è un approccio semplificato, tuttavia consente di fare qualche esempio. Se si considera un parco avventura con una superficie di 2 ettari (ha)¹, assumendo (nel caso peggiore che si può avere in Italia) che si abbia $N_G = 6$ fulmini/(km² × anno), ci si trova nella situazione di figura 44. Allora dalla figura 45 è possibile vedere che il numero atteso di anni prima che un fulmine si abbatta sul parco avventura è di 8,33.

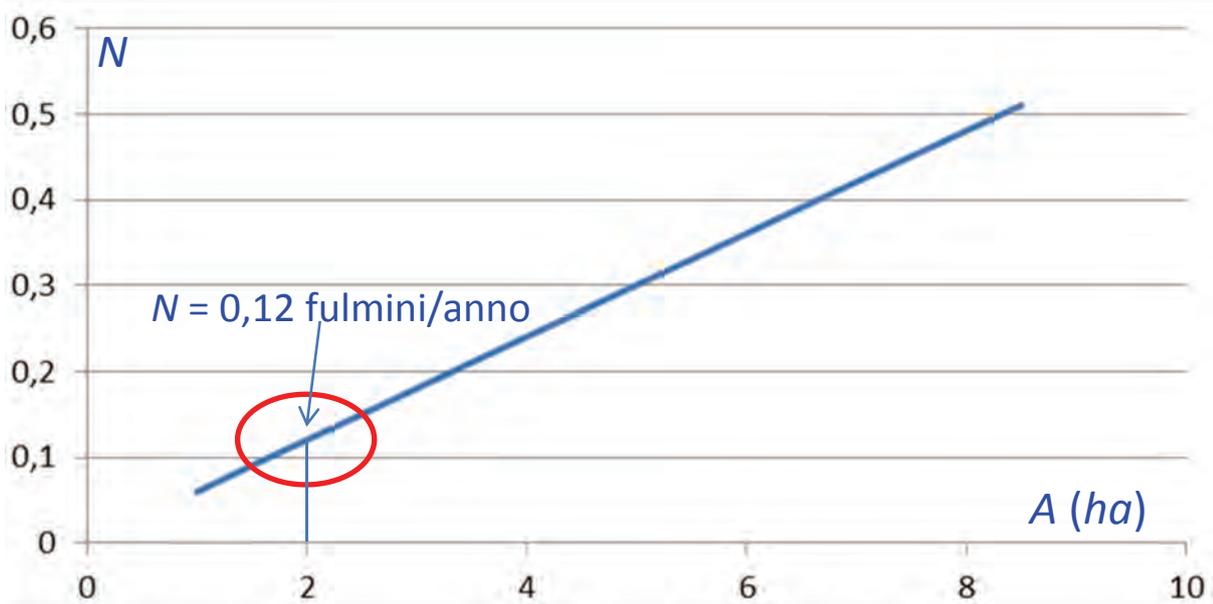


Figura 44: Frequenza di fulminazione (N) in funzione della superficie del parco avventura, nell'ipotesi conservativa $N_G = 6$ fulmini/(km² × anno)

¹ L'ettaro (simbolo "ha"; dove 1 ha = 1 hm²) è un'unità di misura dell'area, pari a 10 000 m², cioè all'area di un quadrato con lato lungo 100 metri. L'ettaro non è un'unità di misura ufficiale del Sistema Internazionale di misura, che al suo posto utilizza l'ettometro quadrato (hm²), ma è accettato come unità di misura alternativa. È utilizzata in Italia per misurare la superficie dei terreni a fini catastali e fiscali. L'ettaro è un multiplo dell'ara (simbolo "a"; dove 1 a = 1 dam²) e della centiara (simbolo "ca"; dove 1 ca = 1 m²). Un ettaro equivale a:

- 100 are (a)
- 10 000 centiare (ca)
- 0,01 km²
- 1 hm²
- 100 dam²

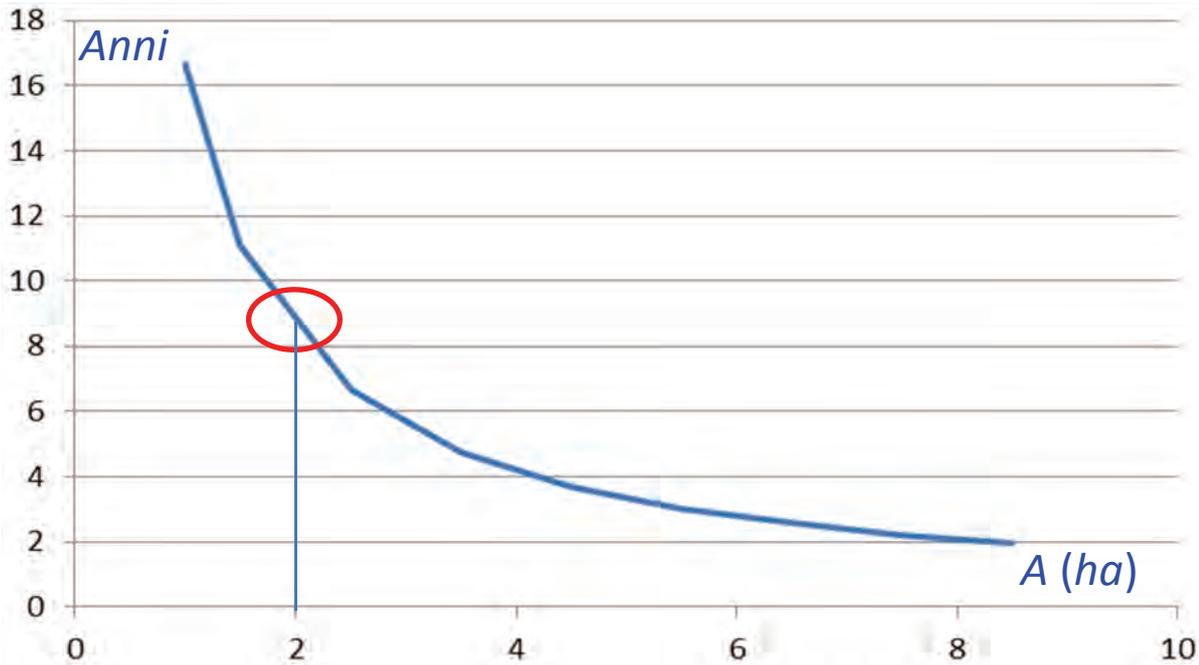


Figura 45: Numero atteso di anni prima che un fulmine si abbatta su un parco avventura, in funzione della sua superficie, nell'ipotesi conservativa $N_G = 6$ fulmini/(km² × anno)

Riguardo alla valutazione numerica dei parametri P ed L il problema è più complesso e sicuramente è necessario riferirsi di volta in volta ad ogni singola realtà.

In sintesi, per poter definire eventuali misure di protezione:

- è necessario *valutare caso per caso* il rischio:
 - i percorsi acrobatici possono avere punti a differente esposizione al rischio di fulminazione diretta;
 - il tipo di alberi usati come supporto dei cavi e delle piattaforme deve essere studiato, considerando anche il comportamento al fulmine;
- è un'attività da realizzarsi in fase di progettazione del percorso acrobatico:
 - possibilmente affidata a specialisti del settore elettrotecnico con esperienza riguardo la protezione dai fulmini, pena ritrovarsi con soluzioni inutili se non addirittura pericolose.

4.5. Alcune considerazioni

Il tema della protezione dai fulmini dei parchi avventura non trova grande diffusione nella letteratura tecnica. Fino a poco tempo fa, in caso di temporali con fulmini o forti venti molti parchi avventura erano immediatamente chiusi (figura 46).

Cosa fare in caso di brutto tempo?

«A discrezione degli istruttori, con precipitazioni scarse, il parco avventura rimane aperto.

In caso di forti venti, temporali con fulmini o condizioni climatiche che mettano in pericolo la sicurezza dei visitatori, il parco sarà immediatamente chiuso»

Figura 46: Cartello di avvertimento presente in molti parchi avventura

Attualmente, la *valutazione del rischio di fulminazione*, l'utilizzo di un *piano di sicurezza per la protezione dai fulmini*, nonché il ricorso a *sistemi di allerta* sembrano passi utili da percorrere per iniziare a gestire in modo più opportuno il rischio fulmini, scegliendo procedure alternative (come quella riportata nel paragrafo 4.2).

La predisposizione e la protezione di rifugi (capitolo 5) o l'adozione di ulteriori misure di protezione possono essere decise procedendo con lo studio dei singoli casi. Anche misure come l'informazione dei visitatori riguardo ai comportamenti consigliati da tenere (capitolo 6) e la formazione di addetti al primo soccorso tra il personale (capitolo 7) contribuiscono ad abbassare il livello del rischio.

Infine c'è un aspetto che è assolutamente necessario considerare. Le sollecitazioni termiche e gli sforzi elettromeccanici che si possono esercitare sui materiali (legno, metalli, materiali sintetici e compositi) a seguito di fulminazione diretta o per induzione elettromagnetica sugli elementi metallici (soprattutto sulle funi) con cui sono realizzate le attrazioni, come si è visto nel capitolo 3, possono alterare la stabilità, la portata massima effettiva e la sicurezza dei percorsi.

Pertanto, dopo un temporale con fulmini, è consigliabile ispezionare le attrazioni alla ricerca di segnali di alterazioni meccaniche o fisiche dei componenti, che potrebbero comprometterne la sicurezza, sostituendo gli elementi che dovessero risultare danneggiati prima di riaprire le attrazioni.

L'ispezione si deve concentrare soprattutto sui sistemi utilizzati per fissare le piattaforme, sulle linee di sicurezza (anche se realizzate solo con funi metalliche di acciaio inossidabile o zincato) e sugli elementi utilizzati per ridurre i danni arrecati agli alberi. La verifica dei percorsi dovrebbe essere effettuata in altezza: l'utilizzo di binocoli e le ispezioni da terra non sono sicure. È anche indispensabile una valutazione della condizione fisiologica e meccanica degli alberi utilizzati come supporto dei cavi e delle piattaforme. Come visto nel capitolo 2, alberi colpiti dai fulmini subiscono spesso danneggiamenti che ne indeboliscono le proprietà meccaniche, inoltre, anche se i danni potrebbero sembrare lievi, se la corrente si è dispersa al suolo attraverso le radici, queste potrebbero morire anche in tempi non troppo lunghi, con conseguenze sulla stabilità della pianta.

5. Rifugi

Fulmini su elementi conduttori, quali recinzioni, palchi, pali, pennoni, proiettori, parti di attrazioni, alberi (nel momento in cui sono attraversati dalla corrente di fulmine) o il terreno, pongono a rischio i visitatori ed il personale dei parchi avventura a causa delle tensioni di contatto e di passo.

Le differenze di potenziale che si vengono a creare tra elementi conduttori diversi possono portare a scariche incontrollate e archi laterali che sono pericolosi per le persone e gli animali nelle immediate vicinanze e, se ricorrono le condizioni, possono provocare anche incendi.

Inoltre il parco avventura potrebbe essere dotato di rifugi, capanni, tettoie, per la protezione dagli agenti atmosferici (pioggia, fulmini) dei visitatori, del personale e dei materiali. Anche tali strutture possono essere colpite dai fulmini.

Naturalmente è opportuno effettuare una valutazione del rischio di perdita di vite umane, al fine di decidere se e quali protezioni adottare in modo da ridurre il rischio a valori tollerabili. La valutazione del rischio potrebbe portare alla decisione di proteggere gli elementi conduttori, i rifugi, i capannoni e le tettoie con un LPS (costituito da captatori, calate e dispersori) e/o con un sistema di captatori ad asta (al limite uno solo), eventualmente coadiuvati da un dispersore a maglia (per rendere equipotenziale il terreno) e/o da uno strato isolante sul terreno. Nel seguito si farà riferimento solo ai rifugi (figura 47), ma le stesse considerazioni valgono anche per capannoni e tettoie (comunque, l'uso di tettoie aperte espone al rischio di scariche laterali, si veda in proposito l'introduzione al capitolo 6).

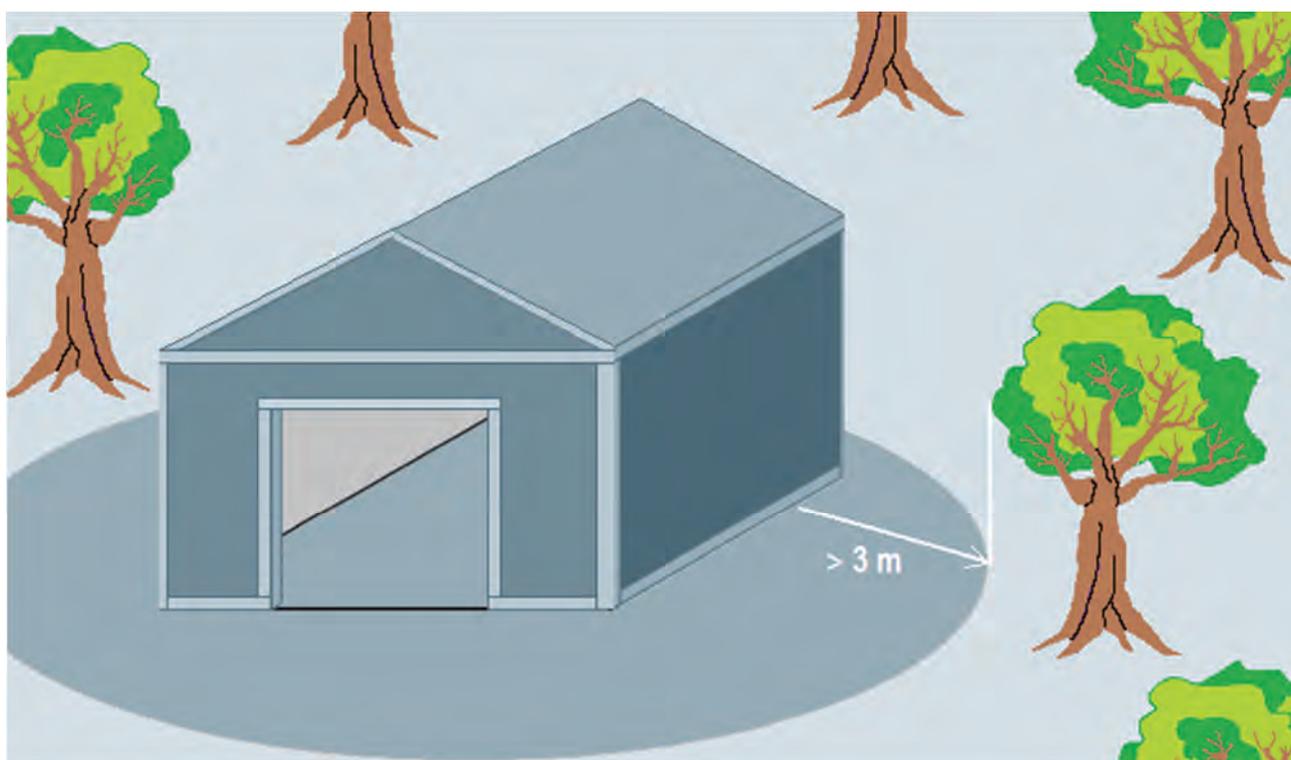


Figura 47: Rifugio realizzato nel rispetto delle distanze di sicurezza da elementi vicini

5.1. Caratteristiche dei rifugi

I rifugi (dotati di tetto e pareti) sono più sicuri delle tettoie (dotate di solo tetto), perché offrono anche protezione laterale. I rifugi non devono essere installati in posizioni esposte (sulle colline, al margine di una foresta, sotto alberi isolati) ed entro un raggio di circa 3 metri da elementi conduttori, siepi o rami di alberi.

È consigliabile che le porte e le finestre del rifugio possano essere chiuse.

Se la valutazione dei rischi prevede la realizzazione di un LPS per il rifugio (figura 48), allora devono essere adottate misure appropriate per evitare tensioni di contatto e passo.

Il pericolo è ridotto ad un livello tollerabile se si seguono le indicazioni del capitolo 3 relative alle tensioni di contatto e passo, ad es. se è rispettata almeno una delle seguenti condizioni:

- si rimane a distanza di almeno 3 metri da tratti di conduttore che possono essere attraversati dalla corrente di fulmine, come le calate dell'LPS, grazie all'adozione di barriere e/o cartelli indicatori;
- oppure tali tratti sono ricoperti con uno strato isolante che abbia una tensione di tenuta ad impulso ($1,2/50 \mu\text{s}$) di 100 kV, ad esempio può essere sufficiente una copertura con uno spessore di almeno 3 mm di polietilene reticolato;

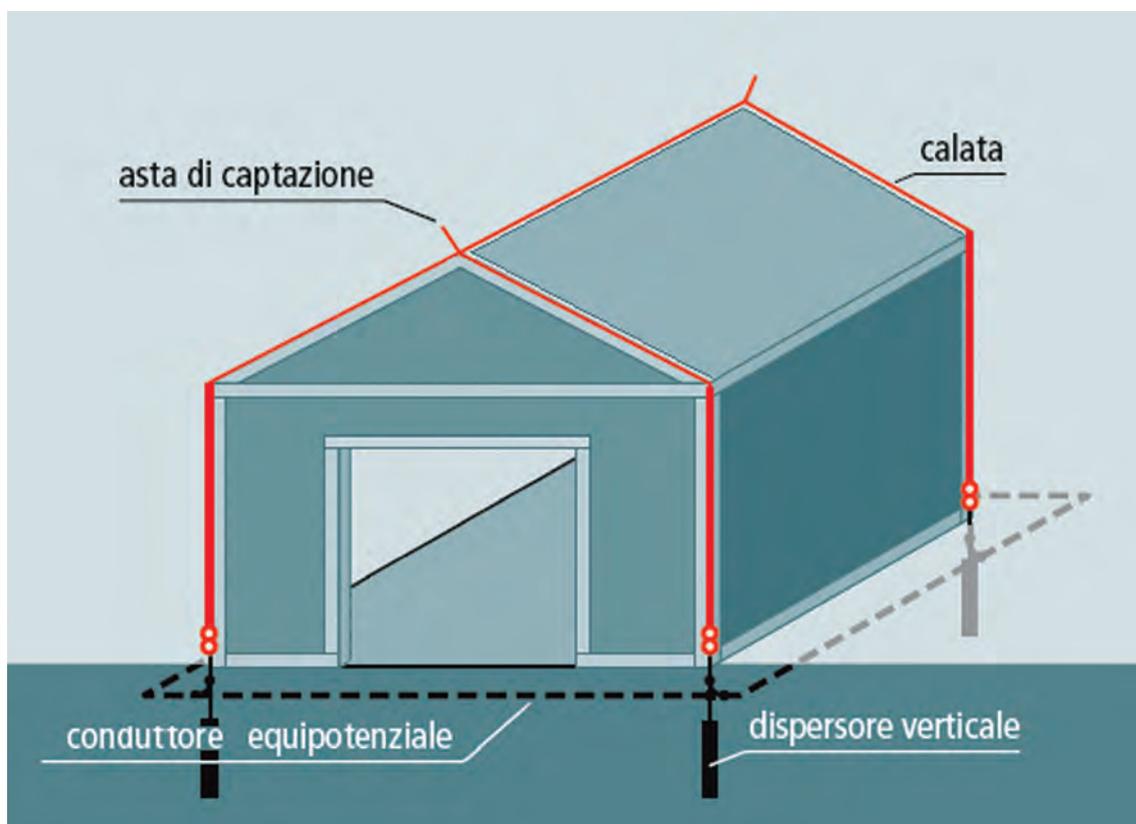


Figura 48: Rifugio dotato di LPS

e se, in aggiunta alle precedenti, è messa in atto almeno una delle seguenti misure:

- c) la resistenza di contatto dello strato superficiale del suolo, entro 3 m dai tratti conduttori che possono essere attraversati dalla corrente di fulmine, non è inferiore a 100 k Ω ; ad esempio uno strato di materiale isolante, come uno strato di asfalto di 5 cm di spessore (figura 49a) o uno strato di ghiaia di 15 cm di spessore (figura 49b), riduce il pericolo ad un valore tollerabile;
- d) oppure si può realizzare l'equipotenzializzazione del terreno mediante un sistema di dispersori a maglia (figura 49c).

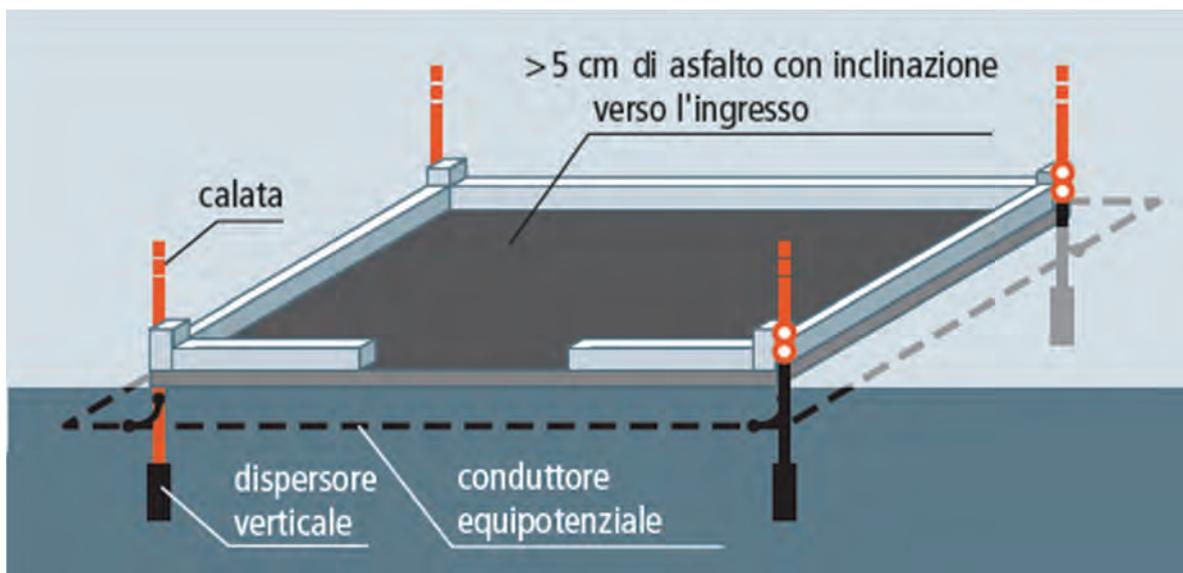


Figura 49a: Pavimento di rifugio realizzato con strato di materiale isolante

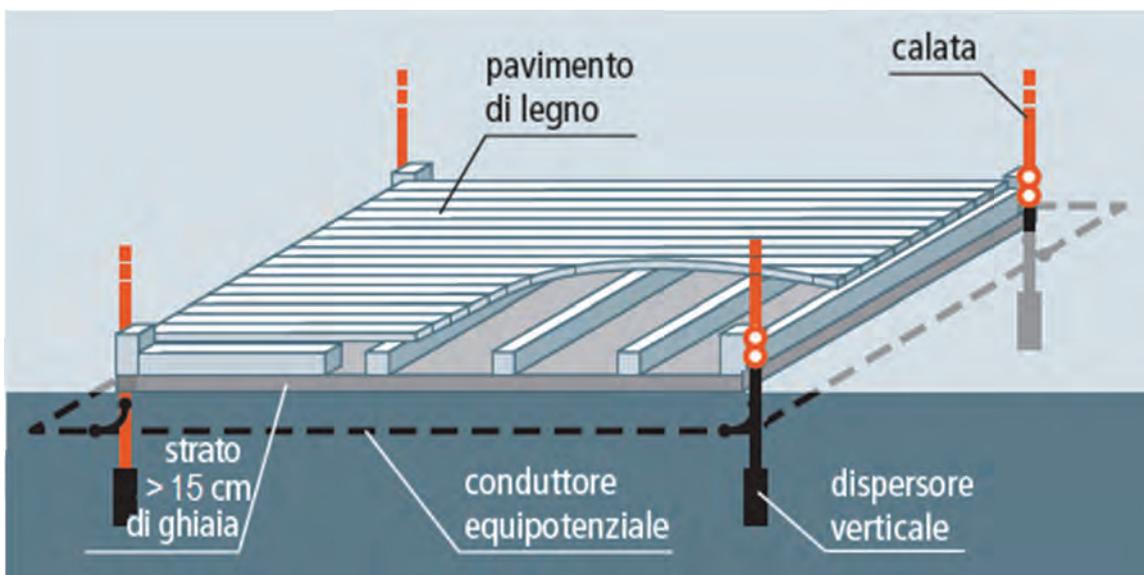


Figura 49b: Pavimento di rifugio realizzato con strato di ghiaia e tavole di legno

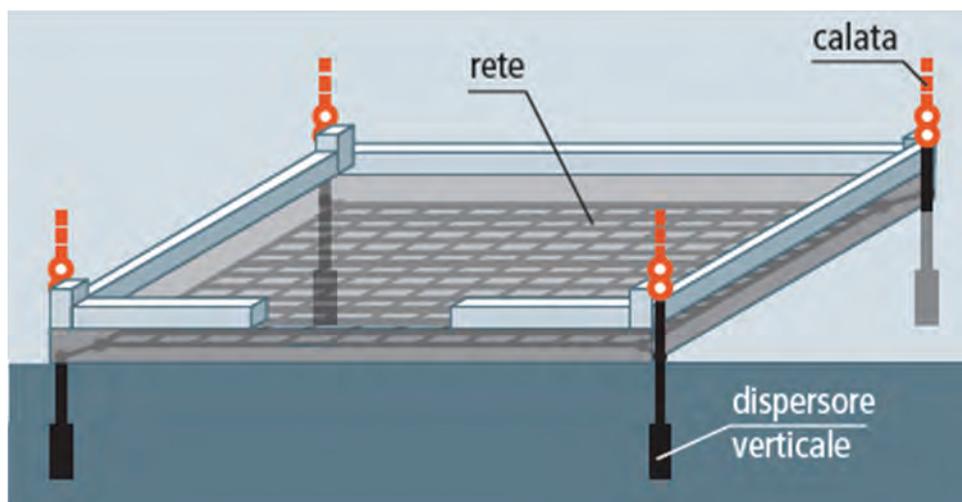


Figura 49c: Equipotenzializzazione del terreno mediante sistema di dispersori a maglia

5.2. Protezione contro i fulmini

Come mostrato in figura 48, l'LPS (Lightning Protection System) di un rifugio può

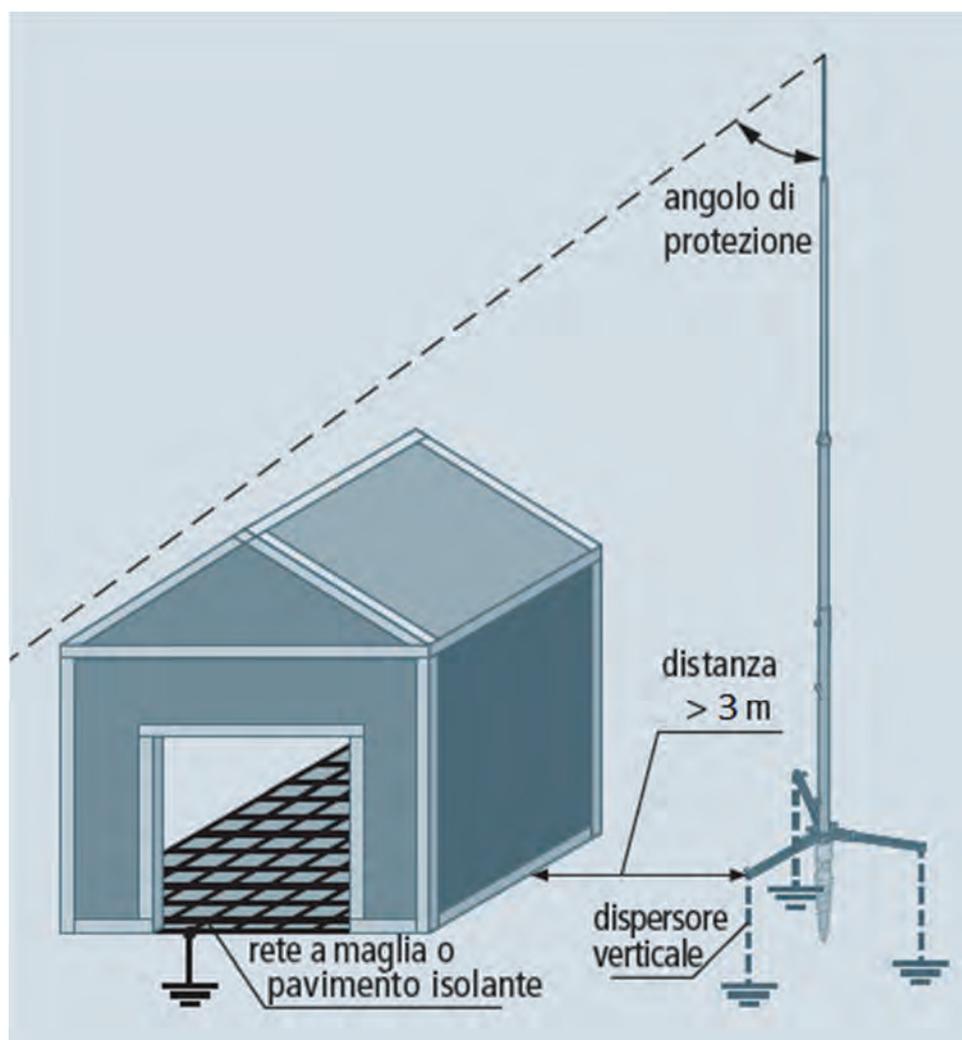


Figura 50: Uso di un'asta di captazione per la protezione di un rifugio

essere costituito da un sistema di captazione posto sul tetto (conduttore di captazione o asta di captazione), da un sistema di calate montate a parete (cavi di calata) e da un sistema di dispersione (di solito costituito da dispersori). La funzione è quella di condurre in sicurezza la corrente di fulmine al suolo, proteggendo le persone da shock elettrici e la struttura da incendi e danni meccanici.

Un'altra possibilità è quella di utilizzare aste di captazione ad elevato isolamento (figura 50). Simili aste sono usate per rifugi nei quali la distanza di isolamento (la distanza d del prossimo paragrafo) non può essere mantenuta a causa delle ridotte dimensioni. Spesso simili sistemi sono utilizzati in associazione con sistemi di equipotenzializzazione del suolo tramite rete metallica (figura 49c).

5.3. Prevenzione delle tensioni di contatto

Al fine di evitare pericolose tensioni di contatto, deve essere mantenuta un'adeguata distanza di isolamento tra gli elementi conduttori dell'LPS (aste di captazione, calate) e le persone che si trovano nel rifugio. Per quanto riguarda le aste di captazione, ciò può essere ottenuto facendo in modo che la distanza d tra il tetto del rifugio e le persone al suo interno sia appropriata:

$$d > 2,5 + s$$

dove

d è l'altezza interna del tetto del rifugio;

2,5 è l'altezza di una persona con il braccio alzato;

s è la distanza di sicurezza (sulla base delle indicazioni del paragrafo 6.3 della CEI 81-10/3, nel caso peggiore si ha $s = 0,08 \times l$);

l è la lunghezza, in metri, lungo il captatore e lungo la calata fra il punto in cui si intende verificare la distanza di sicurezza e la più vicina connessione equipotenziale.

Mantenere un'adeguata distanza dalle pareti esterne è più difficile. Le pareti percorse dalle calate dell'LPS devono avere uno spessore isolante adeguato. Per i rifugi con pareti di legno sottili e con pilastri di legno agli spigoli, le calate sono installate direttamente sugli spigoli esterni della costruzione, sfruttando lo spessore dei pilastri di legno per garantire il massimo isolamento tra il conduttore ed eventuali persone all'interno del rifugio. In alternativa possono essere usate calate rivestite di materiale isolante di spessore adeguato.

Per collegare le calate a terra, si impiegano di solito dei dispersori (aste metalliche di lunghezza definita e materiale adatto alle condizioni locali), interrati verticalmente nel suolo, ad una profondità variabile a seconda del tipo di terreno. In tal caso, un isolamento adeguato è ottenuto realizzando il rifugio su uno strato di spessore opportuno di materiale isolante (ad es. asfalto o ghiaia) ed usando eventualmente anche un pavimento isolante. Per la protezione dalle tensioni di passo si rinvia al prossimo paragrafo.

5.4. Prevenzione delle tensioni di passo

Per prevenire la formazione di pericolose tensioni di passo provocate da fulmini che colpiscono il sistema di captazione del rifugio, o che cadono nelle vicinanze dello stesso, sono possibili due opzioni:

- a) prevenire le tensioni di passo per mezzo dell'isolamento del pavimento, e, come già visto, ciò può essere ottenuto realizzando il rifugio su uno strato di spessore opportuno di materiale isolante (ad es. asfalto o ghiaia) ed usando eventualmente anche un pavimento isolante;
- b) prevenire le tensioni di passo per mezzo dell'equipotenzializzazione del suolo, che può essere ottenuta con una fitta rete metallica interrata nel terreno sotto il piano di calpestio e connessa ai dispersori (potrebbe servire allo scopo anche una rete di armatura annegata nel calcestruzzo).

Quando si realizza un pavimento in legno, conviene sollevarlo dal suolo, per garantire un'adeguata ventilazione in modo che resti asciutto in qualsiasi circostanza. In ogni caso devono essere presi provvedimenti opportuni per impedire la crescita di alberi attraverso il rifugio.

Quando si utilizza una rete metallica per l'equipotenzializzazione, per garantirne la durata, si consiglia di utilizzare conduttori tondi in acciaio inossidabile di diametro opportuno, o conduttori in rame. I conduttori della rete devono essere collegati tra loro su tutte le giunzioni, con metodi adeguati.

5.5. Rifugi metallici

All'interno di rifugi in metallo (tetto, pareti e pavimento) le persone non sono a rischio se non toccano la struttura metallica, pertanto è consigliabile installare un rivestimento isolante per il pavimento e, eventualmente, per le pareti. Deve essere installato anche un sistema di dispersori per la messa a terra collegato al rifugio (si può anche utilizzare il pavimento metallico o ricorrere ad una rete metallica).

Nel caso di un rifugio metallico, per prevenire la fusione del tetto del rifugio in caso di fulminazione diretta, il tetto deve avere uno spessore minimo (paragrafo 3.3) in grado di garantire la protezione delle persone all'interno del rifugio stesso. Se il metallo non possiede lo spessore desiderato, devono essere installate sul tetto metallico delle aste di captazione collegate allo stesso, in modo da permettere il passaggio delle correnti di fulmine senza danneggiamenti.

6. Comportamenti

Oltre alla valutazione dei rischi e alle misure di prevenzione applicate, è altrettanto importante che i visitatori ed il personale dei parchi avventura sappiano come comportarsi durante un temporale.

Nessun posto è assolutamente sicuro durante un evento di fulminazione, comunque è possibile scegliere posti più sicuri di altri. Evitare o allontanarsi da aree a maggior rischio come vette o crinali, oggetti alti (ski lift, tralicci, pali, antenne), oggetti metallici o alberi isolati. Se esiste un rifugio, in caso di temporale imminente le persone dovrebbero cercare riparo immediatamente nel rifugio stesso e restare al suo interno, chiudendo porte e finestre. Altri posti dove può essere possibile trovare rifugio sono: in una caverna profonda, all'interno di una densa boscaglia e lontano dai margini del bosco. Tali posti sono un'alternativa più sicura rispetto al rimanere in un'area aperta ed esposta. Grotte poco profonde, alberi solitari, baldacchini, tende, canoe, scivoli, tettoie aperte o alcune attrazioni espongono al rischio di archi laterali o tensioni di contatto e passo.

In generale, è consigliabile che le persone restino all'interno del rifugio per almeno 30 minuti dopo l'ultimo tuono, ciò garantisce un sufficiente allontanamento della cella temporalesca.

6.1. Comportamenti consigliati quando ci si trova in un rifugio o in un edificio chiuso

I rifugi, o in generale gli edifici chiusi, sono un riparo sicuro in caso di temporale, se all'interno:

- si evita di utilizzare apparecchiature connesse alla rete elettrica o alla rete telefonica fissa;
- si evita di toccare e si mantiene una certa distanza (di qualche metro) da elementi metallici quali tubature, elementi strutturali, porte e finestre metalliche;
- si evita di entrare in contatto con l'acqua (ad es.: fare la doccia, lavare i piatti);
- si resta lontano da porte e finestre.

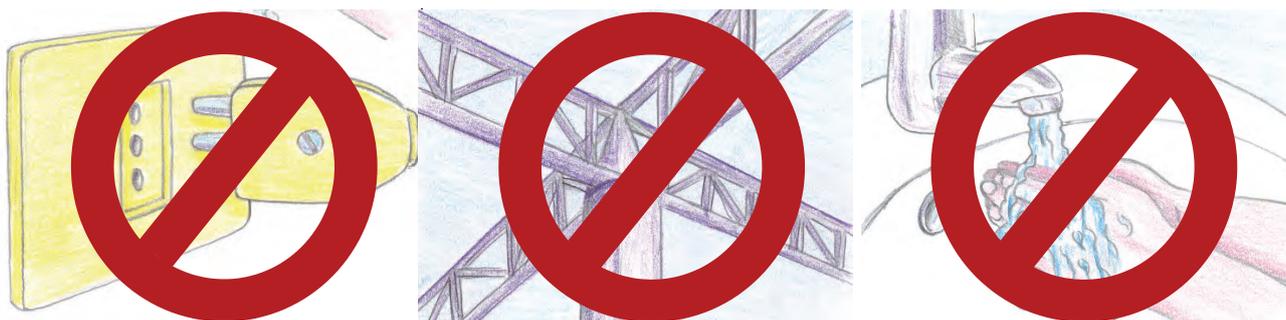


Figura 51: Alcune cose da evitare durante un temporale con fulmini

6.2. Comportamenti consigliati quando ci si trova in un campo aperto o al limitare di un bosco

In un campo aperto o al limitare di un bosco, durante un temporale, è preferibile non essere il punto più alto dell'ambiente circostante. Anche per tale motivo conviene tenere chiusi gli ombrelli. Neanche ripararsi sotto alberi (isolati o al limitare del bosco) o nei pressi di scale metalliche, pali o tralicci è indicato.

In mancanza di un luogo chiuso, la posizione più sicura è quella in cui si sta accovacciati in terra, in una parte non rialzata del terreno (attenzione a non sostare nel bagnato e a non scegliere vie di scorrimento dell'acqua che potrebbero essere inondate), piegati sulle ginocchia, con le mani raccolte ed i piedi uniti insieme, senza stare in piedi o sdraiati sul terreno, evitando di rimanere in gruppo con altre persone. Se si sta seduti, sollevare i piedi da terra. Se si rimane in piedi, unire i piedi. Il rischio dovuto a tensioni di passo può essere ridotto cercando di isolarsi dal terreno (ad es.: sedendo su uno zaino o una borsa da cui siano stati rimossi gli oggetti metallici, sedendo su un rotolo di corda asciutta, sedendo su un materassino da campeggio in materiale isolante).



Figura 52: Posizione consigliata in mancanza di alternative durante un temporale con fulmini [33]

Infatti, essendo il corpo umano un conduttore, la posizione piegata sulle ginocchia e isolata dagli altri (almeno 3 m di distanza, meglio se 5 m), è quella che minimizza l'altezza da terra e la superficie di contatto con il suolo, riducendo la probabilità di

attrarre un fulmine e di riportare danni per tensioni di passo e contatto. Comunque tale strategia dovrebbe essere vista come "ultima risorsa", dato che è difficile mantenere a lungo una simile posizione.

6.3. Comportamenti consigliati quando ci si trova in montagna

Occorre studiare preventivamente le previsioni del tempo, prima di iniziare qualsiasi escursione in montagna, in modo da evitare di trovarsi in situazioni pericolose. Evitare anche vette e creste nelle ore pomeridiane (dopo le 14:00), quando è più probabile la formazione di temporali. Se si è in gruppo (ma gli stessi consigli valgono in generale) è consigliabile aver pronto un *piano di sicurezza per la protezione dai fulmini*. Tale piano deve includere le cartine metereologiche tipiche della zona, le previsioni del tempo, la conformazione locale idrogeologica, le vie di evacuazione predeterminate e i rifugi disponibili (una simile preparazione aiuta a ridurre il possibile caos nel caso dovesse rendersi necessaria l'evacuazione del gruppo durante un temporale).

Una volta in montagna, se ci si accorge di un temporale imminente, è preferibile scendere di quota e cercare di raggiungere un rifugio prima dell'arrivo del temporale. Se ci si trova uniti in cordata è consigliabile dividersi (la corda bagnata diviene un conduttore). Se non si riesce a raggiungere un rifugio si può trovare riparo in una grotta profonda, facendo attenzione anche al rischio di frane, evitando il contatto con le pareti bagnate o umide e cercando di non sostare nei pressi dell'ingresso.

Durante il temporale è preferibile non essere il punto più alto dell'ambiente circostante (evitare quindi vette, creste e guglie, ma anche passerelle o ponti) e chiudere gli ombrelli.

Allontanarsi anche da pareti verticali ed evitare canaloni, fessure, camini, piccole sporgenze, zone bagnate, vie di scorrimento dell'acqua, fossi e ripari quali cavità, crepacci, grossi massi isolati e alberi.

Non si devono toccare elementi metallici come scalette, ringhiere, ganci (è preferibile non toccare neanche le funi ancorate alla roccia dagli alpinisti con ganci e chiodi). Anche l'attrezzatura metallica (ramponi, piccozza, ganci, chiodi, bastoni da sci) va riposta lontano. La distanza di sicurezza da adottare nei confronti degli oggetti metallici non deve essere inferiore a 3 m (meglio se almeno 5 m). Le rocce, specie se bagnate, sono conduttori migliori della neve o del ghiaccio.

Prima di cercare di tornare a casa è consigliabile attendere per almeno 30 minuti dopo l'ultimo tuono, ciò garantisce un sufficiente allontanamento della cella temporalesca.

6.4. Comportamenti consigliati quando ci si trova in un campo da golf o una radura

Come già anticipato, una radura è un luogo pericoloso durante un temporale, lo stesso si può affermare per un campo da golf. In tale situazione sono da evitare gli alberi isolati, il contatto con elementi metallici (la mazza, le aste segnapanche), gli spazi aperti (il limitare del bosco).

Se si è distanti da ripari coperti, è preferibile assumere la posizione raccolta: accovacciati in terra, piegati sulle ginocchia, con le mani raccolte ed i piedi uniti, senza stare in piedi o sdraiati sul terreno, evitando di rimanere in gruppo con altre persone.

6.5. Comportamenti consigliati quando ci si trova al di sotto di una tettoia

Le tettoie sono sconsigliate in quanto, non avendo pareti, non offrono riparo da scariche laterali. Comunque, se ci si trova al di sotto di una tettoia durante un temporale e la tettoia è dotata di sistema di protezione dalle scariche atmosferiche, conviene evitare il contatto con eventuali elementi metallici del sistema di protezione (captatori, calate) e porsi a debita distanza da essi. Evitare di tenere in mano oggetti metallici (ombrelli inclusi). Evitare anche l'uso dei cellulari.

6.6. Comportamenti consigliati quando ci si trova su un campo sportivo

In uno stadio o in un campo sportivo all'aperto, durante un temporale, sono in pericolo sia gli atleti che gli spettatori, se sono i punti più alti dell'ambiente circostante. Gli spettatori delle tribune aperte e quelli vicino a pali, lampioni o aste delle bandiere sono particolarmente in pericolo. Conviene mantenere una distanza di almeno 3 m (meglio se 5 m) da tali strutture e chiudere gli ombrelli. Si è al sicuro sotto una tribuna coperta solo se la tettoia è munita di sistema di protezione dalle scariche atmosferiche.

6.7. Comportamenti consigliati quando ci si trova in acqua

Nuotare o restare in acqua (nel mare, in un lago o in un fiume) durante un temporale è molto pericoloso.

Entro 10 m dal punto di caduta la corrente di un fulmine può provocare la paralisi muscolare o la morte.

È consigliabile uscire dall'acqua ai primi segni di un temporale e cercare riparo allontanandosi dalla riva e da eventuali ombrelloni o sdraie.

Se ci si trova in un natante conviene dirigersi velocemente a riva, uscire dall'acqua e cercare riparo.

Se ci si trova in navigazione conviene cercare riparo sotto al ponte dopo aver bloccato il timone. Se non è possibile trovare riparo conviene assicurarsi ad una "linea vita".

6.8. Comportamenti consigliati quando ci si trova a pesca

Trovarsi a pescare in barca durante un temporale è pericoloso. Se il pesce ha abboccato conviene lasciarlo andare, smontare la canna (non lasciare in ogni caso la canna a svettare) e dirigersi a riva.

Anche se si è a riva o su un molo conviene smettere di pescare e riporre subito la canna da pesca.

6.9. Comportamenti consigliati quando ci si trova in automobile

Evitare di usare l'automobile e mettersi in viaggio durante un temporale, se non strettamente necessario.

Se si è in viaggio e si è sorpresi da un temporale, l'automobile è un buon rifugio, a patto di tenere chiusi i finestrini e le portiere, evitando di toccare la carrozzeria o le parti metalliche (anche dall'interno) e l'autoradio (di cui conviene ritrarre l'antenna se si è in tempo). Decappottabili con copertura in tessuto o materiale sintetico non offrono adeguata protezione.

Se la precipitazione è molto violenta è consigliabile fermarsi in un parcheggio o in una zona sicura (lontano da alberi isolati, pali, tralicci) e attendere che il temporale finisca. È possibile anche cercare riparo nell'edificio più vicino e sicuro.

Finché si rimane in movimento, mettere la massima prudenza nella guida, riducendo la velocità, aumentando le distanze di sicurezza ed evitando, se possibile, di essere colpiti da alberi e pali abbattuti dal vento (cosa che potrebbe rivelarsi più difficile del previsto).

Non transitare con l'auto o sostare lungo gli argini dei corsi d'acqua, sopra ponti o passerelle.

Fare attenzione prima di percorrere sottopassaggi che potrebbero essere allagati.

Non cercare di spostare autovetture investite da masse d'acqua.

Non scendere dall'auto finché i tuoni risuonano a meno di 5 secondi dopo la comparsa di un lampo.

6.10. Altri comportamenti consigliati

Tapparsi le orecchie soprattutto nell'istante successivo al bagliore: il forte rumore e lo spostamento d'aria, se il fulmine è caduto nei pressi, possono danneggiare i timpani.

Evitare di guardare direttamente l'intensa luce del fulmine: le componenti ultraviolette possono danneggiare la retina.

L'utilizzo di cellulari durante un temporale è sconsigliato da tutte le case produttrici.

Mantenere una buona dose di prudenza, stando attenti, quando ci si trova all'aperto, ad altri pericoli in cui si potrebbe incorrere nel tentativo di sfuggire ai fulmini (evitare i terreni rocciosi quando sono resi scivolosi da acqua, foglie, fango; evitare i terreni allagati, sconnessi, franosi, fangosi; evitare di trovarsi nei pressi di specchi d'acqua, canaloni, impluvi, torrenti, zone di scorrimento dell'acqua, che potrebbero ingrossarsi rapidamente e diventare pericolosi; attenzione ai guadi, perché anche quelli facilmente attraversabili potrebbero essere resi impervi dalle piogge).

Se si deve scappare perché vicino stanno cadendo dei fulmini, è più sicuro correre (in modo da avere per terra un solo piede per volta) piuttosto che camminare. Se ci si ferma, tenere i piedi uniti e accovacciarsi.

Se si sentono drizzarsi i capelli o i peli delle braccia, ci si trova in un luogo in cui il campo elettrico è intenso. In tale luogo si è in pericolo e conviene allontanarsene velocemente.

7. Prestare soccorso

Le persone colpite da fulmine generalmente non sono cariche elettricamente e dunque i soccorritori non corrono, normalmente, pericoli nel prestare immediatamente soccorso.

L'80% delle vittime di fulminazione sopravvive: quindi, se dovesse essere necessario, eseguire subito la rianimazione cardio-polmonare può contribuire a salvare la vita dell'infortunato.

Il BLS (Basic Life Support, supporto base alle funzioni vitali) è una tecnica di primo soccorso che comprende la rianimazione cardiopolmonare (RCP) ed una sequenza di azioni di supporto alle funzioni vitali.

Lo scopo di tale tecnica è quello di mantenere ossigenati il cervello e il muscolo cardiaco, insufflando artificialmente aria nei polmoni e provocando, per mezzo di spinte compressive sul torace, un minimo di circolazione del sangue.

Il rischio principale collegato alla mancanza di soccorso in questi casi è il danno anossico cerebrale. Importante è la tempestività dell'intervento: dall'inizio dell'arresto cardio-circolatorio le probabilità di sopravvivenza diminuiscono mediamente del 7-10% ogni minuto; dopo 9-10 minuti, in assenza di RCP, è difficile sperare nel recupero del danno anossico cerebrale (i primi gravi danni al cervello si riscontrano già dopo i primi 4 minuti di mancanza di ossigeno).

La procedura di seguito descritta si basa sulle linee guida dell'European Resuscitation Council ([31], [32]), ed è pensata per essere eseguita da chiunque (anche personale non sanitario). Non richiede capacità mediche né l'uso di particolari attrezzature, per questo è definita "BLS laico".

La procedura descritta, può essere messa in atto nell'attesa dell'arrivo di soccorsi qualificati, che dovranno essere chiamati immediatamente dopo aver valutato la scena e lo stato di coscienza del soggetto infortunato, attivando così la "catena del soccorso".

7.1. Valutazione della scena

All'arrivo sulla scena, prima di qualsiasi azione, il soccorritore deve accertarsi che la zona sia priva di pericoli che potrebbero pregiudicare la salute sua e dell'infortunato (ad es.: accertarsi che il soggetto non sia a contatto con parti in tensione, o che non vi siano odori di gas o presenza di liquidi dannosi e assicurarsi che tutte le fonti di energia siano disattivate e l'ambiente sia sicuro, prima di avvicinarsi). Nel caso in cui la zona non sia sicura è necessario avvertire le autorità competenti (ad es. i Vigili del fuoco).

Valutare se il soggetto è vittima di un malore oppure di un trauma; nel secondo caso assolutamente non deve essere mosso. Se il soggetto è incosciente, con ustioni lineari o punteggiate (feathering), è probabile sia vittima di fulminazione. Quando non si ha la possibilità di valutare con certezza la causa dell'evento, bisogna agire considerando l'infortunato come vittima di un trauma.

7.2. Valutazione dello stato di coscienza

Nel caso si sospetti un trauma, evitare qualsiasi movimento dell'infortunato. Nel caso non si sospetti un trauma, porsi di fronte al corpo steso dell'infortunato, per evitare movimenti del collo dello stesso, quindi scuoterlo leggermente per le spalle e chiamarlo ad alta voce (il solo stimolo vocale può risultare inutile in caso di persone ipoudenti). Nell'eseguire tale operazione, il soccorritore deve prestare attenzione nel proteggere la propria incolumità nel caso questo si risvegli e, in preda al panico o sotto l'effetto di stupefacenti, tenti di aggredire il soccorritore. Se l'infortunato non reagisce, allora è incosciente e deve essere allertato il numero di soccorso, dichiarando lo stato di incoscienza. Se non risponde e non respira normalmente o se ha convulsioni, è sospetto un arresto cardiaco. Nel caso sia cosciente, può essere comunque richiesto l'invio di personale qualificato al fine di controlli più accurati.

Fare sempre riferimento al numero di soccorso (nella maggior parte delle regioni italiane è attivo il numero 118, mentre in alcune regioni e in molti paesi dell'Unione Europea è attivo il numero 112) prima di intervenire in qualunque modo sugli infortunati, soprattutto se esposti a trauma. Per quanto riguarda la chiamata al numero di soccorso, si ricorda che questa può essere effettuata da qualsiasi telefono, fisso o cellulare. I cellulari sono abilitati a effettuare la chiamata anche se la scheda non ha più credito, mentre se si chiama da una cabina telefonica non sono necessarie monete o schede.

7.3. Valutazione ABC

La fase di valutazione prosegue con una procedura denominata ABC (Airway, Breathing, Circulation). Per iniziare la procedura il soccorritore deve porre la persona su un piano rigido (generalmente per terra) con gli arti e la testa allineati in posizione supina (pancia in alto) e con il torace scoperto, avendo ben presente che l'infortunato potrebbe aver subito un trauma e quindi potrebbe presentare lesioni alle vertebre cervicali.

A (Airway): Il pericolo che corre una persona incosciente è l'ostruzione delle vie aeree, anche la stessa lingua potrebbe cadere all'indietro e impedire la respirazione. Pertanto, prima di ogni azione, si deve procedere al controllo del cavo orale, ruotando assieme l'indice e il pollice sulla bocca del paziente, come se si dovesse aprire un portaspiccioli. Se sono presenti oggetti che ostruiscono le vie respiratorie vanno rimossi, con pinze, non introducendo mai le dita in bocca all'infortunato e facendo attenzione a non spingere il corpo estraneo ancora più in profondità. Se è presente acqua o altro liquido (per esempio dopo un annegamento) si deve inclinare lateralmente la testa dell'infortunato per permettere al liquido di fuoriuscire. Se c'è il

sospetto di un trauma delle vertebre cervicali, si devono evitare movimenti della colonna vertebrale, stabilizzando manualmente la testa, in modo da ridurre al minimo il movimento di testa, collo e colonna vertebrale. Una volta verificata l'assenza di oggetti che possano ostruire il passaggio dell'aria si effettua l'iper-estensione della testa, proprio per evitare un auto-soffocamento con la lingua (questa manovra va fatta successivamente all'ispezione orale per non spingere ancora più in basso eventuali corpi estranei presenti all'interno). Per effettuare la manovra dell'iper-estensione, vanno poste una mano sulla fronte, per portare indietro la testa, e due dita sotto il mento, per sollevarlo. La manovra non dovrà essere brusca o violenta (il collo è molto delicato) ma dovrà comunque essere efficace. Per questa ragione, nel caso vi sia un trauma cervicale anche solo sospetto, l'iper-estensione dovrà essere evitata insieme a tutti gli altri movimenti dell'infortunato: la manovra potrà essere eseguita in maniera parziale solo se dovesse rendersi *assolutamente necessaria* (ad es. in caso di arresto respiratorio). La posizione di iper-estensione deve essere mantenuta fino alla fine della valutazione ABC.

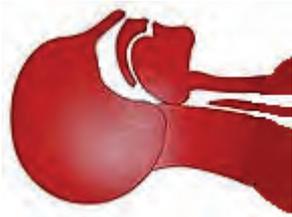


Figura 53a: Vie aeree chiuse a seguito di rilassamento della lingua



Figura 53b: Vie aeree aperte a seguito della manovra di iper-estensione del capo

B (Breathing): Dopo la fase di *Airway* è necessario controllare se l'infortunato respira, a tal fine si osserva il suo torace, dopo averlo preventivamente scoperto dagli abiti, accostando la guancia alla sua bocca (a circa 3–5 cm). Questa manovra è detta "GAS" che sta per *Guardo, Ascolto, Sento*:

1. *Guardare* il movimento del torace
2. *Ascoltare* il respiro
3. *Sentire* il flusso d'aria sulla guancia

È necessario fare attenzione a non confondere ansimi e gorgoglii emessi in caso di arresto respiratorio con la respirazione normale. L'osservazione deve essere mantenuta per 10 secondi, contando ad alta voce (ciò serve a chi interviene nel frattempo, e conosce la procedura BLS, a capire che può essere necessario il suo aiuto), mantenendo, nel caso si sia certi dell'assenza di un trauma, la testa del soggetto iper-estesa. Nel caso vi sia stato un trauma è necessario mantenere la posizione neutra del capo e liberare le vie aeree senza provocare movimenti delle vertebre cervicali.

C (Circulation): Mentre si effettua la manovra GAS il soccorritore valuta se sono presenti elementi che manifestino la presenza di circolazione interna: movimenti della persona, degli arti, colpi di tosse, respiro. La ricerca di segni di circolo è definita MO.TO.RE. (MOvimenti, TOsse, REspiro). Oltre a tale ricerca, è possibile la ricerca del polso, preferibilmente carotideo (rilevato premendo con i polpastrelli di indice e medio

sulla carotide, posta lateralmente al pomo di Adamo), giacché permette la percezione di battito cardiaco anche ad una pressione arteriosa sistolica (massima) di 50 mmHg, mentre il polso radiale e femorale non permettono di reperire battito con pressione arteriosa sistolica inferiore a 80 mmHg. Comunque, poiché non è facile cercare il polso carotideo soprattutto se non si è esperti, la presenza di MO.TO.RE., anche quando il polso carotideo non è apprezzabile, è una prova certa che il cuore sta battendo.

La ricerca di segni di circolo (MO.TO.RE.) non deve in nessun modo ritardare le operazioni di soccorso, per cui in caso di dubbio, si assume che l'attività cardiaca sia assente.

In assenza di MO.TO.RE. è indispensabile iniziare la rianimazione cardio-polmonare RCP. Se non si è chiamato prima il numero di soccorso, si chiama in questo momento. Se i soccorsi sono stati già chiamati, è importante confermare che c'è una persona in arresto respiratorio e senza segni di circolo.

7.4. Rianimazione cardio-polmonare

La procedura della rianimazione cardio-polmonare, da effettuarsi su un paziente su una superficie rigida (una superficie morbida o cedevole rende completamente inutili le compressioni) consiste in queste fasi:

- il soccorritore si inginocchia a fianco del torace, con la sua gamba all'altezza della spalla dell'infortunato;
- il soccorritore rimuove, aprendo o tagliando se necessario, gli abiti dell'infortunato (la manovra richiede il contatto con il torace, per essere sicuri della corretta posizione delle mani);
- il soccorritore colloca le mani direttamente sopra lo sterno dell'infortunato, una sopra all'altra, al centro del petto, per evitare di rompere le costole del soggetto (in caso fragilità ossea, età avanzata, osteogenesi imperfetta...) pone solo il palmo delle mani a contatto con il torace (il punto di contatto deve essere la parte inferiore e più vicina al polso del palmo, che si presenta più dura e in asse con l'arto), per facilitare il contatto può intrecciare le dita e sollevarle leggermente;
- il soccorritore sposta il peso verso avanti, rimanendo sulle ginocchia, fino a che le sue spalle non sono direttamente sopra le mani;



Figura 54: Massaggio cardiaco

- tenendo le braccia dritte, senza piegare i gomiti, il soccorritore si muove su e giù con determinazione facendo perno sul bacino; la pressione sul torace, per essere efficace, deve provocare un movimento di circa 5–6 cm per ciascuna compressione; per la riuscita dell'operazione, è fondamentale che il soccorritore permetta la riespansione toracica completa dopo ogni compressione, evitando di staccare il palmo delle mani dal torace, in modo da non causare un dannoso effetto di rimbalzo; il ritmo di compressione corretto deve essere di almeno 100 compressioni al minuto ma non superiore a 120 compressioni al minuto, ovvero 3 ogni 2 secondi, riducendo al minimo le interruzioni nelle compressioni;
- ogni 30 compressioni, è necessario praticare 2 insufflazioni con la respirazione artificiale;
- la respirazione bocca a bocca comporta l'insufflazione forzata di aria nel sistema respiratorio dell'infortunato, con l'ausilio di una mascherina o di un boccaglio; in caso di mancanza, un fazzoletto di cotone può essere impiegato per proteggere il soccorritore dal contatto diretto con la bocca dell'infortunato; la testa della persona deve essere iper-estesa (ruotata all'indietro), il soccorritore chiude il naso con una mano mentre estende la mandibola con l'altra per mantenere la bocca aperta (se non si chiude il naso, l'operazione risulterà completamente inefficace); è fondamentale che durante le insufflazioni il capo rimanga iper-esteso, giacché una scorretta posizione delle vie aeree espone la vittima al rischio che entri aria nello stomaco, provocando così facilmente rigurgito (questo può essere provocato anche dalla potenza con cui si soffia: se si soffia troppo forte si manda aria nello stomaco, per tale motivo le insufflazioni non devono essere eccessivamente energiche, ma emettere una quantità d'aria non superiore a 500–600 cm³/s, cioè circa mezzo litro in un secondo); per fare in modo che l'aria insufflata contenga una più alta percentuale di ossigeno, il soccorritore dovrà alzare la testa tra un'insufflazione e l'altra per non inspirare l'aria emessa dalla vittima;
- dopo le insufflazioni, il soccorritore ritorna dalla parte del torace e riposiziona le mani nella posizione corretta; ripete il ciclo di 30 compressioni e 2 insufflazioni per un totale di 5 volte, controllando alla fine se esistono segni di MO.TO.RE.,

ripetendo la procedura senza mai fermarsi, tranne che per esaurimento fisico o per l'arrivo dei soccorsi;

- se, invece, i segni di MO.TO.RE. tornano ad essere presenti (la vittima muove un braccio, tossisce, muove gli occhi, parla), si deve tornare alla fase di Breathing: se la respirazione è presente, si potrà disporre la vittima in posizione laterale di sicurezza, altrimenti si dovranno eseguire soltanto ventilazioni (10-12 al minuto), ricontrollando ogni minuto i segni di MO.TO.RE. fino alla ripresa completa della respirazione normale (che è di circa 10-20 respiri al minuto).

La rianimazione deve sempre cominciare con le compressioni salvo nel caso si tratti di trauma o la vittima sia un bambino: in questi casi si comincerà con 5 insufflazioni, per proseguire normalmente con l'alternanza compressioni-insufflazioni. Questo avviene perché in caso di trauma si presume che l'ossigeno presente nei polmoni di una persona che ha perso coscienza a seguito di un trauma non sia in quantità sufficiente a garantire l'efficienza della circolazione sanguigna; a maggior ragione, a titolo precauzionale, si inizierà con le insufflazioni nel caso la vittima sia un bambino, in virtù del fatto che è presumibile che un bambino, godendo di buone condizioni di salute, si trovi in stato di arresto cardiaco per cause dovute con maggiore probabilità a trauma o ad un corpo estraneo penetrato nelle vie aeree.

Il soccorritore smetterà il massaggio cardiaco esclusivamente se:

- si modificano le condizioni del luogo, che diventa non più sicuro (in caso di grave pericolo il soccorritore ha il dovere di mettersi in salvo);
- arriva l'ambulanza con un medico a bordo o l'auto medica inviata dal numero di soccorso o soccorso qualificato con una più efficace attrezzatura;
- è sfinito e non ha più forze (se più soccorritori mettono in atto dei cambi, questi dovranno avvenire a metà di un ciclo di 30 compressioni, in modo da non interrompere il ciclo compressioni-insufflazioni);
- il soggetto riprende le funzioni vitali.

7.5. Modifiche apportate alle procedure

Alcune modifiche sono state apportate alle procedure nel 2010 e nel 2015. Innanzitutto, è aumentata l'enfasi sul massaggio cardiaco precoce (quindi sulla C: Circulation), ritenuto più importante dell'ossigenazione precoce. La sequenza è passata quindi da ABC a CAB, infatti si inizia con le 30 compressioni toraciche (entro 10 secondi dal riconoscimento del blocco cardiaco), e si procede con le manovre di apertura delle vie aeree e con la ventilazione. Così facendo si ritarda la prima ventilazione di circa 20 secondi, cosa che non influisce negativamente sulla buona riuscita della rianimazione.

Inoltre è stata eliminata la fase GAS poiché potrebbe essere presente respiro agonizzante (*gasping*) che viene avvertito dal soccorritore sia come sensazione di respiro sulla pelle (Sento) sia a livello uditivo (Ascolto), ma tale respiro non provoca

una ventilazione polmonare efficace poiché spasmodico, poco profondo e a bassissima frequenza.

Modifiche minori riguardano la frequenza delle compressioni toraciche (da *circa* 100/min ad *almeno* 100/min, ad una *frequenza compresa tra* 100/min e 120/min), l'abbassamento del torace (tra 5 e 6 cm). Infine la pressione cricoidea (una manovra comunque non praticata in Italia) è stata sconsigliata, poiché non è efficace per prevenire l'insufflazione gastrica e può rivelarsi dannosa rendendo più difficoltoso l'inserimento di dispositivi respiratori avanzati come i tubi endotracheali.

7.6. La posizione laterale di sicurezza (PLS)

Se la respirazione torna ad essere presente, ma il soggetto è ancora in stato di incoscienza, allora, in attesa dell'arrivo dei soccorsi, se si suppone che non abbia subito traumi alla colonna vertebrale, all'anca o al bacino, è possibile posizionarlo in posizione laterale di sicurezza. Per far ciò bisogna flettergli un ginocchio e portare il piede della gamba flessa dietro il ginocchio della gamba opposta. Poi si provvederà a far scivolare il braccio opposto alla gamba flessa sul terreno fino a portarlo in posizione perpendicolare al tronco. L'altro braccio va posto sul torace, in modo che la mano passi sul lato del collo. Successivamente il soccorritore deve porsi sul fianco che non presenta il braccio esteso esternamente, infilare il proprio braccio fra l'arco formato dalle gambe del paziente e con l'altro afferrare la testa. Facendo leva sulle ginocchia, bisogna far rotolare delicatamente il paziente sul fianco del braccio esterno, accompagnando il movimento della testa. La testa va poi iper-estesa e mantenuta in tale posizione sistemando sotto la guancia la mano del braccio che non tocca terra. Questa posizione ha lo scopo di mantenere le vie aeree sgombre ed evitare che improvvisi getti di vomito occludano la cavità respiratoria ed entrino nei polmoni, danneggiandone l'integrità (in tale posizione ogni liquido emesso viene espulso fuori dal corpo).



Figura 55: Posizione laterale di sicurezza

7.7. Uso del defibrillatore

Se si dispone di un defibrillatore automatico esterno (DAE) è ragionevole che sia utilizzato al più presto, la versione precedente delle linee guida, se il defibrillatore era immediatamente disponibile, consigliava di iniziare la RCP ed utilizzare il defibrillatore prima possibile.

La RCP deve essere praticata mentre si applicano le placche del defibrillatore automatico esterno e fino a quando questo non è pronto ad analizzare il ritmo cardiaco dell'infortunato.

8. Cenni di elettrofisiologia

Le correnti di fulmine hanno caratteristiche diverse dalle correnti di rete, per tale motivo danno luogo ad effetti diversi. Nel presente capitolo sono riportati alcuni cenni di elettrofisiologia. Mentre il nucleo della trattazione è valido in generale, alcuni aspetti riguardano soprattutto le correnti di rete (come i paragrafi 8.2, 8.3, 8.4.1 – 8.4.4). Per una trattazione dei possibili effetti delle correnti di fulmine, si rimanda pertanto al paragrafo 2.2.

8.1. Il comportamento delle cellule

Le cellule animali contengono all'interno una soluzione acquosa salina e sono immerse in una matrice extracellulare (che riempie gli spazi tra le cellule) assimilabile anch'essa ad una soluzione salina.

Gli ioni in soluzione sono soprattutto Na^+ , K^+ , Ca^{++} e Cl^- .

Gli ioni sono presenti in concentrazione diversa tra l'interno (maggiore concentrazione di K^+) e l'esterno (maggiore concentrazione di Na^+) della cellula. Tale differenza di concentrazione comporta una differenza di potenziale elettrico tra l'interno e l'esterno delle cellule stesse (figura 56).

La differenza di potenziale che si ha è detta *potenziale di riposo* e, nei mammiferi, è pari a circa 70 mV (con l'ambiente all'interno della cellula a potenziale negativo rispetto all'esterno).

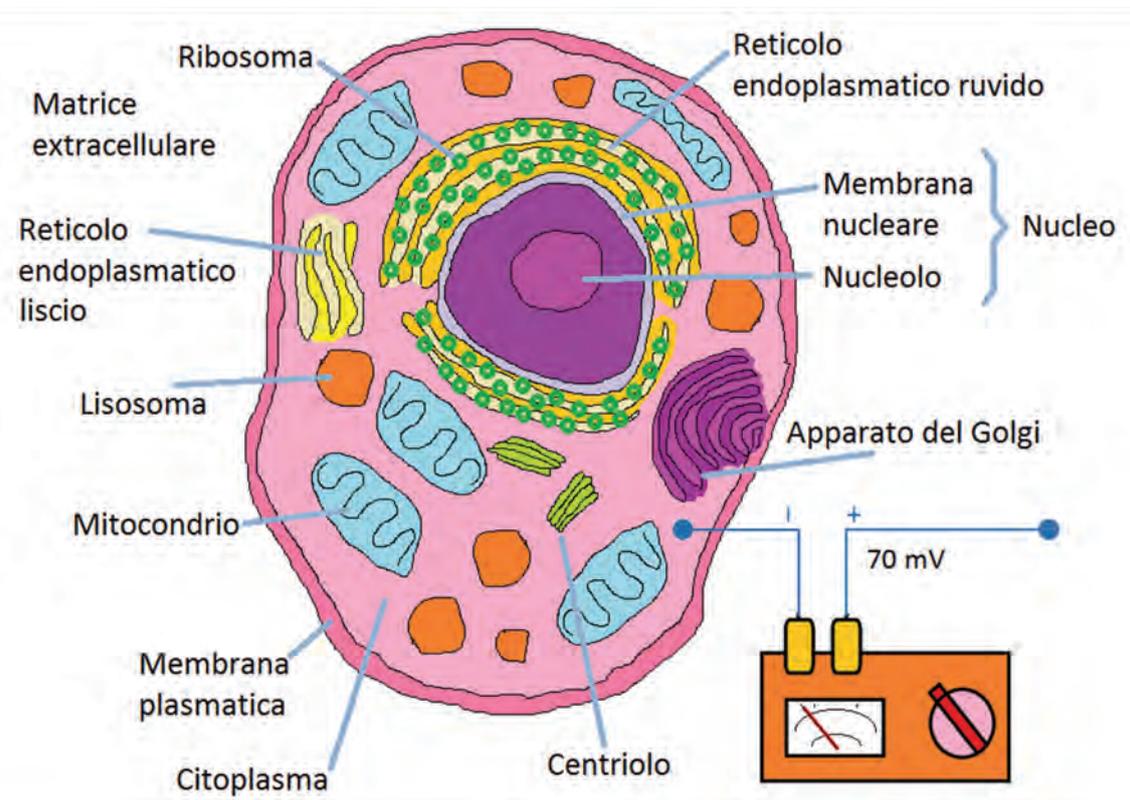


Figura 56: Differenza di potenziale tra l'interno e l'esterno di una cellula

Se ad una cellula è applicata una differenza di potenziale di segno opposto a quella di riposo, si ha un aumento del passaggio degli ioni Na^+ verso l'interno, fino ad arrivare anche all'inversione del potenziale indotto. Il fenomeno, noto come *potenziale d'azione*, si manifesta se il potenziale applicato supera una *soglia di eccitabilità*, che diminuisce con l'aumentare del tempo di applicazione. Il meccanismo è alla base della propagazione del segnale nervoso (segnali sensoriali e contrazione muscolare).

8.2. Impedenza del corpo, tensione e corrente

Il passaggio di una corrente elettrica esterna attraverso il corpo, oltre alla capacità di interferire con i potenziali d'azione delle cellule nervose e muscolari, alterando la trasmissione nervosa e stimolando i muscoli e gli organi attraversati, produce effetti termici.

Un corpo sottoposto a differenza di potenziale elettrico si comporta come un'impedenza, il cui valore varia in funzione del soggetto (fattori individuali, età, sesso), delle condizioni della pelle (sudata, bagnata, secca) e della frequenza della tensione applicata.

La corrente circolante attraverso tale impedenza è direttamente proporzionale alla tensione applicata.

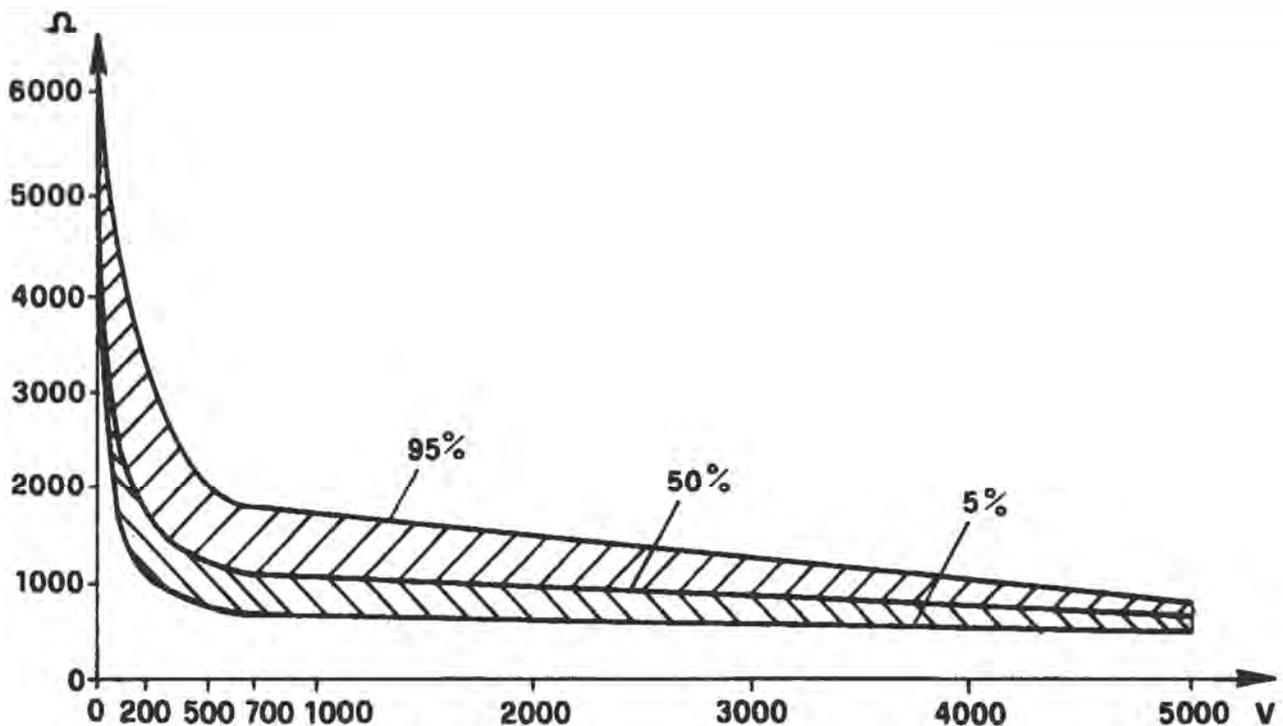


Figura 57: Valori dell'impedenza totale del corpo umano al variare della tensione di contatto (a frequenza di rete) per un percorso della corrente *mano-mano* o *mano-piede*, per una significativa area di contatto (50 o 100 cm^2) con pelle asciutta [11]

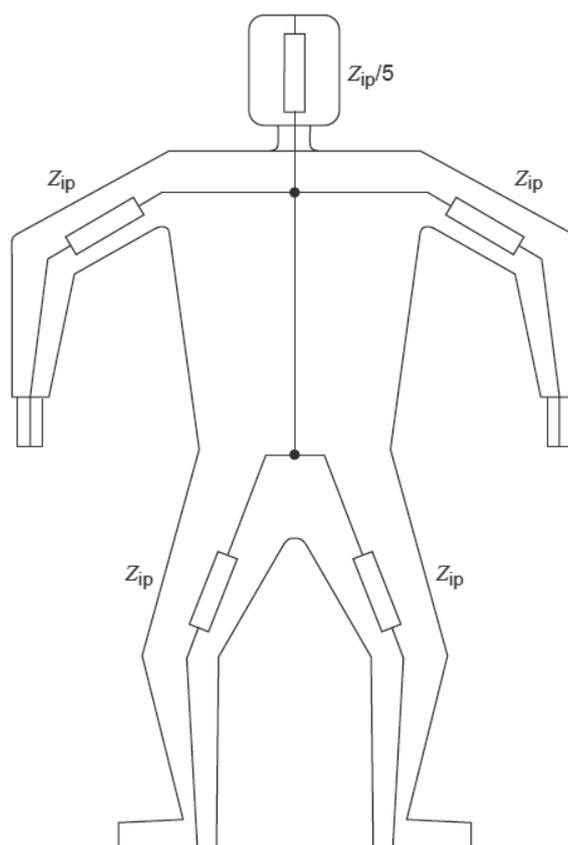


Figura 58: Schema semplificato delle impedenze interne del corpo umano per frequenza di rete [10]

Z_{ip} è impedenza parziale interna di una estremità (braccio o gamba)

Prendendo come riferimento l'impedenza interna mano-mano o mano-piede (pari a $2 \times Z_{ip}$);

- l'impedenza tra una mano ed entrambi i piedi è approssimativamente uguale al 75% (pari a $1,5 \times Z_{ip}$);
- l'impedenza tra entrambe le mani ed entrambi i piedi è il 50% (pari a Z_{ip});
- l'impedenza da entrambe le mani verso il tronco del corpo è il 25% (pari a $0,5 \times Z_{ip}$).

8.3. Soglie di pericolosità

Gli effetti fisiologici del passaggio di una corrente elettrica a frequenza di rete (50 Hz o 60 Hz) attraverso il corpo umano sono di solito classificati in base a tre valori di soglia: 0,5 mA, 10 mA e 50 mA.

- Al di sotto di 0,5 mA (soglia di percezione): non si hanno danni o percezioni dolorose per tempi indefiniti;
- tra 0,5 mA e 10 mA (soglia di rilascio): non si hanno effetti pericolosi oltre alla percezione dolorosa, ed è possibile rilasciare la muscolatura;
- tra 10 mA e 50 mA (soglia di pericolo): non si è in grado di rilasciare i muscoli contratti dalla corrente (tetanizzazione) e la pericolosità della scarica dipende del tempo di applicazione;
- oltre 50 mA: l'intensità della corrente è pericolosa per qualunque durata temporale.

Per la corrente continua i tre valori di soglia vanno corretti rispettivamente in 2 mA, 40 mA e 120 mA.

La soglia di tensione minima considerata pericolosa è di 120 V in corrente continua e di 50 V in corrente alternata (norma tecnica IEC 60479-1). Infatti per tensioni minori a tali valori la normale impedenza del corpo umano (pari convenzionalmente a 1000 Ω) non permette di solito il passaggio di una corrente pericolosa.

8.4. Effetti fisiologici

Gli effetti fisiologici indotti dal passaggio della corrente attraverso il corpo umano dipendono dal valore della corrente stessa e dalla durata del contatto.

Tali effetti sono principalmente contrazioni muscolari involontarie (spasmi) ed effetti termici.

Particolarmente determinante è il percorso seguito dalla corrente elettrica nell'attraversare il corpo.

Se il passaggio della corrente si ha, come nel caso più diffuso, tra mano e piede, la regione cardiaca è parzialmente investita. Se invece il contatto è tra mano e mano o tra piede e piede il flusso di corrente che interessa il torace è molto ridotto. Nelle norme è introdotto un fattore di riduzione della pericolosità della corrente, quando il percorso è diverso dal percorso torace-mano sinistra, che è ritenuto il più pericoloso.

Quando il passaggio di corrente interessa solamente regioni periferiche del corpo, per esempio mano-avambraccio, le eventuali conseguenze sono limitate solo a tale regione.

La scarica ad alta frequenza di un fulmine tende a scorrere sulla superficie del corpo (effetto pelle dovuto all'alta frequenza), con una maggiore probabilità di arresto cardio-respiratorio. Invece, nel caso di una folgorazione da corrente a frequenza di rete il danno maggiore è a carico degli organi interni e il pericolo più grave è rappresentato dalla fibrillazione ventricolare.

8.4.1. Contrazione muscolare, blocco respiratorio e fibrillazione cardiaca

Correnti a frequenza di rete (50 Hz o 60 Hz), di intensità pari ad alcune decine di milliampere possono già causare spasmi muscolari dei muscoli scheletrici, dei muscoli della respirazione e del cuore.

La contrazione muscolare involontaria della mano dovuta al passaggio della corrente può impedire il rilascio di un conduttore se questo è stato afferrato col palmo. Per questo motivo, prima che si diffondesse la cultura della sicurezza sul lavoro, si poteva vedere personale esperto nei lavori elettrici che toccava i cavi col dorso della mano in caso di incertezza (procedura assolutamente da evitare).

Se una corrente alternata pari a 50 mA attraversa il torace per un tempo superiore a un secondo, è in grado di distruggere la sincronia di contrazione delle fibre cardiache (*fibrillazione ventricolare*). In corrente continua l'intensità necessaria sale a 120÷200

mA. Paradossalmente, correnti alternate di 200 mA e oltre possono anche non dare luogo a fibrillazione, bloccando però il cuore per effetto delle contrazioni prodotte nei muscoli ad esso circostanti. In ogni caso l'azione di pompaggio è pregiudicata e, se non si ripristina la funzionalità cardiaca in tempi brevi, l'esito può essere letale.

Correnti elettriche a frequenze molto elevate, da migliaia di hertz in su, non sono in grado di provocare spasmi e quindi arresto cardiaco o respiratorio, e l'effetto termico diventa l'unico effetto rilevante.

8.4.2. Effetti termici

La corrente elettrica che fluisce nel corpo genera calore per effetto Joule e può provocare ustioni gravi e profonde (nel caso di correnti a frequenza di rete la corrente scorre anche all'interno del corpo).

8.4.3. Effetti neurologici

L'interessamento della testa durante il passaggio della corrente può avere conseguenze a livello neurologico che spaziano da una temporanea perdita di coscienza a danni neurologici permanenti.

8.4.4. Traumi da arco elettrico e traumi indiretti

Lo sviluppo di un arco elettrico può rappresentare un pericolo a causa dell'elevato calore generato, dell'esplosione dell'aria rapidamente riscaldata, della vaporizzazione di metalli e dell'intensa emissione di raggi ultravioletti.

La contrazione muscolare involontaria può provocare movimenti bruschi e pericolosi, cadute e altri incidenti.

Pertanto, i traumi indiretti prodotti sull'organismo possono essere di tipo termico (ustioni), di tipo meccanico (fratture, danni agli organi interni) o di altro tipo (danneggiamento della retina).

9. Riferimenti

- [1] d. m. 22 gennaio 2008 n. 37 e successive modificazioni ed integrazioni "Regolamento concernente l'attuazione dell'articolo 11-quaterdecies, comma 13, lettera a) della legge n. 248 del 2 dicembre 2005, recante riordino delle disposizioni in materia di attività di installazione".
- [2] legge 46/90 art. 14 "Verifiche".
- [3] d. P. R. 22 ottobre 2001 n. 462 "Regolamento di semplificazione del procedimento per la denuncia di installazioni e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche, di dispositivo di messa a terra di impianti elettrici e di impianti elettrici pericolosi".
- [4] d. lgs. del 9 Aprile 2008 n. 81 e successive modificazioni ed integrazioni "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007 n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".
- [5] Guida tecnica INAIL, Aprile 2012, "D.P.R. 462/01 – Guida tecnica alla prima verifica degli impianti di protezione dalle scariche atmosferiche e impianti di messa a terra"
- [6] CEI 81-10/1 (EN 62305-1), Protezione contro i fulmini – Parte 1: Principi generali.
- [7] CEI 81-10/2 (EN 62305-2), Protezione contro i fulmini – Parte 2: Valutazione del rischio.
- [8] CEI 81-10/3 (EN 62305-3), Protezione contro i fulmini - Parte 3: Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone.
- [9] CEI 81-10/4 (EN 62305-4), Protezione contro i fulmini – Parte 4: Impianti elettrici ed elettronici nelle strutture.
- [10] CEI 64-18:2011, Effetti della corrente elettrica attraverso il corpo umano e degli animali domestici. Parte 1: Aspetti generali (IEC/TS 60479-1:2006)
- [11] CEI 64:1999, Effetti della corrente attraverso il corpo umano (IEC 479-1:1984, IEC 479-2: 1987)
- [12] G. L. Amicucci, I danni creati dai fulmini, ANESV-PAI, Meeting Annuale Parchi Avventura Italiani, Polignano a Mare (BA), 27 Gennaio 2017.
- [13] F. Fiamingo, La protezione dai fulmini: i Parchi Avventura, ANESV-PAI, Meeting Annuale Parchi Avventura Italiani, Polignano a Mare (BA), 27 Gennaio 2017.
- [14] G. L. Amicucci, G. Platania, F.M. Oddi, A. Orlandi, Laboratory Characterisation of Lightning Induced Effects on Communication Cables, Proceedings of the 25th

International Conference on Lightning Protection - ICLP, September 18-22, 2000, Rhodes, Greece, pp. 679 - 684.

- [15] G. L. Amicucci, B. D'Elia, G. Platania, Dependability of surge protective devices due to lightning flashes, Proceedings of the 26th International Conference on Lightning Protection - ICLP, September 2-6, 2002, Cracow, Poland, , ISBN 83-910689-5-1.
- [16] G. L. Amicucci, B. D'Elia, P. Gentile, A method to assess the frequency of damage due to indirect lightning flashes, Proceedings of the 26th International Conference on Lightning Protection - ICLP, September 2-6, 2002, Cracow, Poland, ISBN 83-910689-5-1.
- [17] G. L. Amicucci, B. D'Elia, G. Di Gregorio, C. Mazzetti, Z. Flisowski, R. Tomassini, SPD protective distance for effective protection against lightning overvoltages, Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, September 9-13, 2002, Sorrento, Italy.
- [18] G. L. Amicucci, B. D'Elia, Reliability of surge protective devices stressed by lightning, Journal of Electrostatics, vol.60, no. 2-4, March 2004, pp.247-256.
- [19] G. L. Amicucci, C. Mazzetti, Probabilistic method for reliability assessment of metal oxide varistors under lightning stress, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 23, no. 1, 2004, pp. 263-276, ISSN 0332-1649.
- [20] G. L. Amicucci, C. Mazzetti, P. Gentile, Influence of Lightning, Switching and Temporary Overvoltages on Reliability of Metal Oxide Varistors, Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection - ICLP, September 13-16, 2004, Avignon, France.
- [21] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, M. Marzinotto, C. Mazzetti, G. B. Lo Piparo, Z. Flisowski, Protection against Lightning Overvoltages of Electrical and Electronic Systems: Evaluation of the Protection Distance of an SPD, Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection - ICLP, September 13-16, 2004, Avignon, France.
- [22] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, Z. Flisowski, G. B. Lo Piparo, C. Mazzetti, A probabilistic approach to the selection and location of protection measures against lightning overvoltages, Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection - ICLP, September 17-22, 2006, Kanazawa, Japan.
- [23] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, Z. Flisowski, G.B. Lo Piparo, C. Mazzetti, Surge Protective Devices for low voltage systems: practical approach for the protection distance evaluation, IEEE Power Tech 2007, EPFL, Losanna, 1-7 luglio 2007.
- [24] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, Risk assessment of photovoltaic installations due to lightning, Proceedings of the 29th International Conference on Lightning Protection, 23rd – 26th June 2008 – Uppsala, Sweden.

- [25] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, G.B. Lo Piparo, B. Kuca, Z. Flisowski, C. Mazzetti, Protection of electrical and electronic systems against surges by an isolation transformer, EMD 2009, Bialystok, Poland, 23-25 September 2009.
- [26] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, M.T. Settino, Impianti di protezione contro le scariche atmosferiche. Valutazione del rischio e verifiche, Quaderno di Ricerca INAIL, 2016, ISBN 978-88-7484-514-9.
- [27] Dehn, Blitzplaner, Guida alla protezione contro i fulmini, III ed., 2016, ISBN 978-3-9813770-2-6.
- [28] Dehn Italia, Convivere con i fulmini, 2008
- [29] V. Carrescia, G.B. Lo Piparo, Elettroquesiti 3. Fulmini e parafulmini, Edizioni Tuttonormel 1996
- [30] C. Spies, R.G. Trohman, Narrative review: elettrocution and life-threatening electrical injuries, Annals of internal medicine, Vol. 145, no. 7, (2006), pp. 531-537
- [31] <https://eccguidelines.heart.org/wp-content/uploads/2015/10/2015-AHA-Guidelines-Highlights-Italian.pdf>
- [32] <https://cprguidelines.eu/guidelines-translations>
- [33] AA. VV., Wilderness Medical Society Practice Guidelines for the Prevention and Treatment of Lightning Injuries, Wilderness & Environmental Medicine, 23, 260–269 (2012)
- [34] CEI EN 50536, Protezione contro i fulmini – Sistemi di rilevamento di temporali (2013).
- [35] AA. VV., Injuries, Sequelae, and Treatment of Lightning-Induced Injuries: 10 Years of Experience at a Swiss Trauma Center, Hindawi Publishing Corporation, Emergency Medicine International, Volume 2012, Article ID 167698, 6 pp.
- [36] foto Marie-Lan Nguyen e un altro autore rilasciata nel pubblico dominio https://it.wikipedia.org/wiki/Zeus#/media/File:Jupiter_Smyrna_Louvre_Ma13.jpg
- [37] foto Håvard Kjøntvedt, Norwegian Environment Agency/Directorate for Nature Management <http://www.miljodirektoratet.no/en/News1/2016/323-wild-reindeer-killed-by-lightning/>

