

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MESSINA
Dipartimento di Ingegneria
Contrada Di Dio I, 98166 – Villaggio S. Agata Messina

Appunti Corso di Sistemi Elettrici

Capitolo 04 Impianto di Terra

Anno Accademico 2015-2016

prof. ing. Bruno Azzerboni

Fonti:

Manuali, guide e cataloghi
ABB, bTicino, Gewiss, Merlin Gerin
Schneider, Siemens

Web:

www.elektro.it,
www.voltimum.it
www.electroyou.it

Sommario

4. Impianto di terra	3
4.1 Definizioni	3
4.1.1 Chiarimenti su masse e masse estranee	5
4.2 Generalità	15
4.3 Dispersore	17
4.3.1 Dimensionamento del dispersore	18
4.3.2 Scelta e criteri realizzativi	19
4.4 Conduttori di terra (CT)	20
4.4.1 Dimensionamento dei conduttori di terra in un sistema TT	21
4.4.2 Dimensionamento dei conduttori di terra in un sistema TN	21
4.5 Conduttori di protezione (PE)	22
4.5.1 Parti dell'impianto da collegare al PE	24
4.6 Collegamenti equipotenziali	25
4.7 Connessioni e collettore principale di terra	26
4.8 Come proteggere il dispersore dalla corrosione	28
4.8.1 Processi di corrosione	28
4.8.2 Materiali e accorgimenti per limitare i rischi di corrosione	32
4.9 Misura della resistenza di terra	34
4.9.1 Generalità	34
4.9.2 La resistenza di terra e i potenziali del terreno	34
4.9.3 Misura della resistenza di terra	36
4.10 Contatti indiretti con e senza impianto di terra	41

4. Impianto di terra

4.1 Definizioni

Per rendere più chiara la lettura di questo capitolo si riassumono di seguito le definizioni utilizzate più frequentemente:

- **Tensione totale di terra U_T :** è la tensione che si stabilisce durante il cedimento dell'isolamento tra una massa e un punto del terreno sufficientemente lontano a potenziale zero;
- **Tensione di contatto U_c :** è la differenza di potenziale alla quale può essere soggetto il corpo umano in contatto con parti simultaneamente accessibili, escluse le parti attive, durante il cedimento dell'isolamento;
- **Tensione di passo U_P :** è la differenza di potenziale che può risultare applicata tra i piedi di una persona a distanza di un passo (convenzionalmente un metro) durante il cedimento dell'isolamento;
- **Tensione di contatto limite convenzionale U_L :** massimo valore di tensione di contatto che è possibile mantenere per un tempo indefinito in condizioni ambientali specificate;
- **Tensione nominale verso terra di un sistema U_n :** nei sistemi trifase con neutro isolato o con neutro a terra attraverso impedenza, la tensione nominale; nei sistemi trifase con neutro direttamente a terra, la tensione stellata corrispondente alla tensione nominale; nei sistemi monofase o a corrente continua senza punti di messa a terra, la tensione nominale; nei sistemi monofase o a corrente continua con punto di mezzo messo a terra, metà della tensione nominale;
- **Parte attiva:** conduttore o parte conduttrice in tensione nel servizio ordinario, compreso il conduttore di neutro ma escluso, per convenzione, il conduttore PEN;
- **Massa:** parte conduttrice di un componente elettrico e quindi facente parte dell'impianto elettrico, che può essere toccata e che non è in tensione in condizioni ordinarie, ma che può andare in tensione in condizioni di guasto (cedimento dell'isolamento principale), o una parte conduttrice, che fa parte dell'impianto elettrico, quando è ipotizzabile un contatto di tale parte con una parte attiva dell'impianto elettrico stabilmente prossima.

Esempi tipici di masse sono le carcasse dei motori e gli involucri metallici degli apparecchi di classe 0 e I, mentre quelli dei componenti di classe II non sono masse perché non vanno in tensione se cede il solo isolamento principale, essendoci anche quello supplementare.

La dizione "che può essere toccata" non ha alcun riferimento spaziale, ma si riferisce all'assenza di barriere di isolamento, o alla possibile rimozione delle stesse senza l'ausilio di appositi attrezzi.

È bene precisare che la possibilità di toccare le masse va intesa in senso lato; per esempio l'involucro esterno di una lampada per l'illuminazione stradale posta su un sostegno è una massa perché può essere toccata mediante una scala.

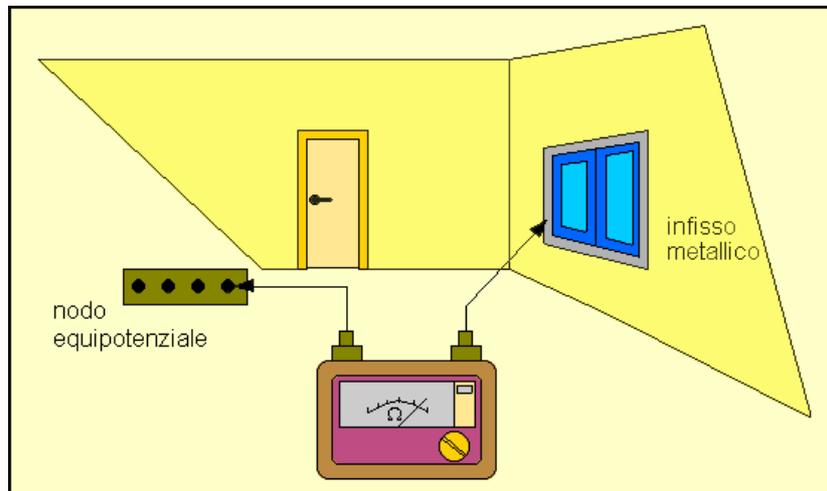
La norma precisa che non è da intendere come massa una parte conduttrice che può andare in tensione solo perché è in contatto con una massa. È questo, per esempio, il caso di cavi contenuti in tubi, poggiati su una passerella metallica. La passerella non è una massa perché se il tubo è metallico, è esso stesso una massa, e quindi le parti a contatto con esso non lo sono; se invece il tubo è isolante costituisce un doppio isolamento e, nel caso di cedimento dell'isolamento principale, la passerella non va in tensione.

Nel caso in cui l'involucro metallico sia ricoperto di vernici e simili è ancora da considerare massa se va in tensione in caso di cedimento dell'isolamento principale; infatti lo strato protettivo non è, in generale, idoneo a garantire la sicurezza delle persone.

La normativa infine vieta il collegamento a terra di componenti dell'impianto o apparecchi utilizzatori con isolamento doppio, rinforzato, o ad isolamento totale.

Il contatto indiretto è quindi quello di una persona con una massa, oppure con una parte conduttrice in contatto con una massa, durante un guasto che interessi l'isolamento principale.

- **Massa estranea:** parte conduttrice, che non fa parte dell'impianto elettrico, in grado di introdurre nell'impianto un potenziale, generalmente quello di terra.
Si tratta di parti metalliche accessibili in buon collegamento elettrico con il terreno, esse sono in genere costituite da tubazioni facenti parte di reti estese e interrato che, a causa dell'intimo contatto con il terreno, costituiscono dei dispersori con bassa resistenza di terra; esse conferiscono, nel caso siano toccate, un potenziale prossimo a quello del punto del terreno in cui avviene il contatto. In termini di potenziale si dice che la massa estranea introduce nell'ambiente il potenziale zero della terra lontana.
Può essere costituita anche da una parte metallica isolata verso terra, ma in grado di immettere un potenziale elevato nel locale, derivante da un guasto esterno al locale stesso.
In ambienti particolarmente pericolosi quali locali da bagno, piscine ecc., le masse estranee possono anche introdurre potenziali diversi da quello di terra. È tale il caso delle tubazioni idriche che, anche se isolate da terra, possono portare in altri luoghi il potenziale conseguente, per esempio, a guasti in uno scaldabagno elettrico.
La persona che entra in contatto simultaneamente con una massa e una massa estranea, è soggetta alla tensione totale, occorre pertanto collegare all'impianto di terra le masse estranee e tale collegamento viene definito come collegamento equipotenziale principale
Per decidere se si è alla presenza di una massa estranea, bisogna misurarne la resistenza verso terra, poiché un corpo conduttore a stretto contatto con il terreno ha una resistenza verso terra molto piccola, al limite nulla. La normativa considera masse estranee le parti metalliche aventi resistenza verso terra inferiore a 1000 ohm per gli ambienti ordinari e 200 ohm per quelli a maggior rischio.



Resistenza verso terra delle masse estranee.

Una struttura non facente parte dell'impianto elettrico si considera "massa estranea" se la sua resistenza rispetto alla terra è inferiore a 1000 Ω per gli ambienti normali e 200 Ω per gli ambienti particolari.

- **Terra:** il terreno come conduttore il cui potenziale elettrico in ogni punto è convenzionalmente considerato uguale a zero;
- **Resistenza di terra R_T :** resistenza esistente tra un collettore (o nodo) di terra e la terra;
- **Impianti di terra elettricamente indipendenti:** impianti di terra aventi dispersori separati. La corrente massima che uno di questi impianti può disperdere non deve modificare il potenziale rispetto a terra dell'altro impianto in misura superiore ad un determinato valore;
- **Conduttore PEN:** Conduttore che svolge contemporaneamente funzioni sia di protezione sia di neutro;

4.1.1 Chiarimenti su masse e masse estranee

Le definizioni sono tutto sommato semplici, ma, come si vedrà, su ogni parola si deve riflettere con attenzione.

Dopo aver precisato che l'isolamento principale è l'isolamento che separa il conduttore normalmente in tensione, detto parte attiva, dal resto dell'apparecchiatura consentendone il funzionamento, si definisce, in maniera sintetica:

Massa: una parte conduttrice, **facente parte dell'impianto elettrico**, che può essere toccata e che non è in tensione in condizioni ordinarie di isolamento, ma che può andare in tensione in caso di cedimento dell'isolamento principale.

Massa estranea: una parte conduttrice **non facente parte dell'impianto elettrico** in grado d'introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra.

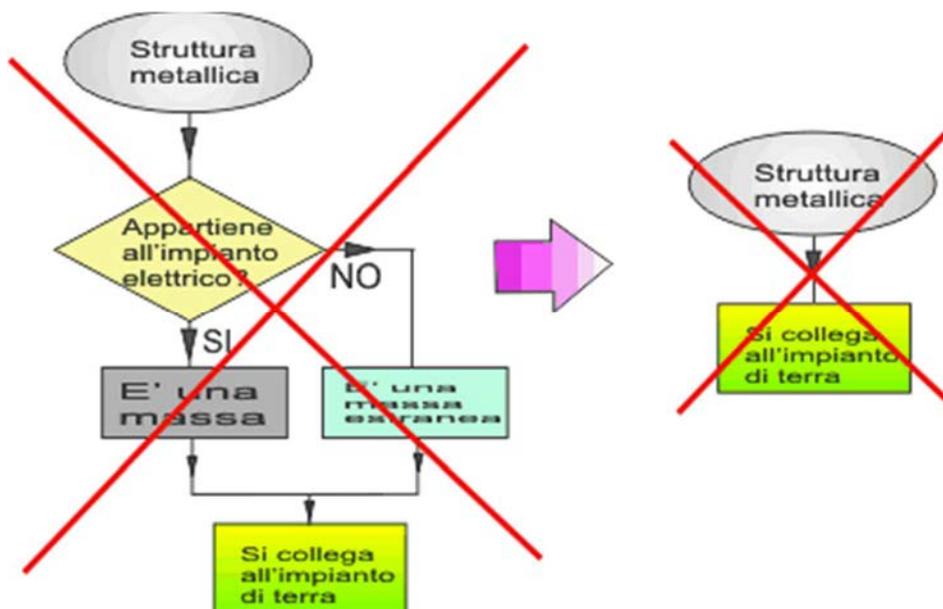
4.1.1.1 Discutiamo ora sulla definizione di massa.

Entrambe, massa e massa estranea, vanno collegate all'impianto di terra e le definizioni servono proprio per individuare le parti metalliche da collegare a terra.

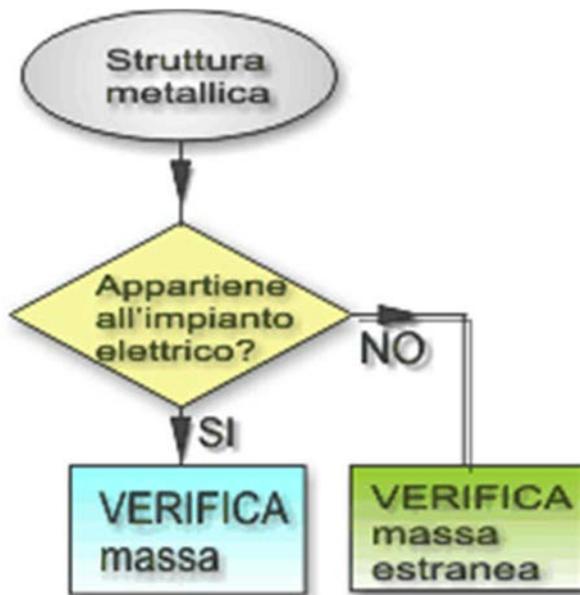
Attenti a semplificarne eccessivamente le definizioni limitandosi addirittura alla prima parte di entrambe e cioè quella che dice dell'appartenenza o meno della parte conduttrice all'impianto elettrico. Così capita che qualsiasi oggetto metallico abbia due possibilità (escludendo quella che si tratti di un conduttore attivo, cioè normalmente in tensione, e che è facilmente riconoscibile).

Tale limitazione porta alla conclusione che se la parte metallica fa parte dell'impianto elettrico è una massa; se non ne fa parte è una massa estranea.

E' evidente che non può essere così perché ciò porterebbe a collegare tutti gli oggetti metallici di un ambiente all'impianto di terra, come illustrato nei seguenti diagrammi di scelta



In realtà bisogna procedere secondo un diagramma di questo tipo:



Esaminiamo ora le varie frasi delle definizioni:

“far parte dell'impianto elettrico”

Masse nate

E' abbastanza evidente che se si considera una lavatrice, la sua struttura metallica è parte integrante dell'apparecchiatura. Quindi se, come in genere è, solo un isolamento principale la separa dai conduttori attivi, è una massa. Tra l'altro proprio la lavatrice è l'esempio di massa per antonomasia. E' una **massa nata** si può dire.

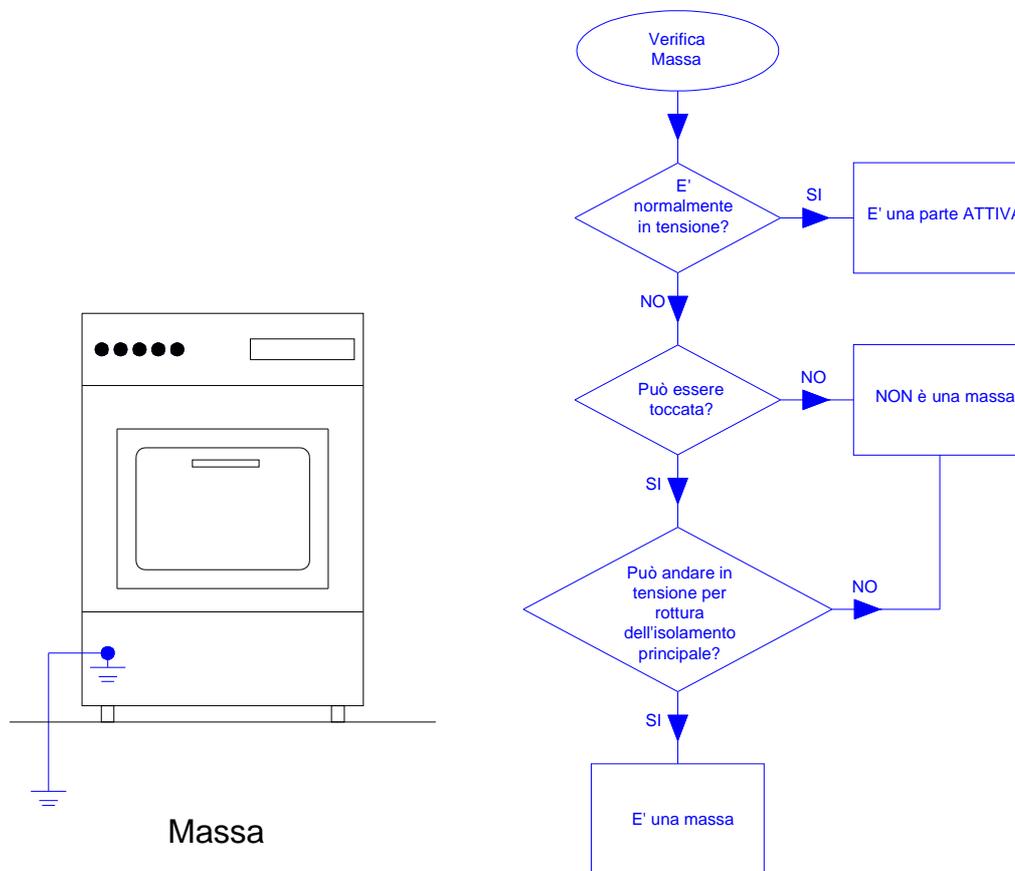
Masse diventate

Una scaffalatura metallica, invece non nasce come parte di un impianto elettrico. Come minimo non è una massa nata. Anche se qualcuno ci appoggia provvisoriamente sopra un'apparecchiatura elettrica, non diventa una massa. Nemmeno se qualcuno vi installa sopra permanentemente un'apparecchiatura elettrica che ha una sua massa, cioè, quello che si dice un apparecchio di classe I, diventa una massa. Tanto meno se vi installa un apparecchio in classe II cioè con doppio isolamento, contrassegnato, come noto, dal doppio quadrato. Analoghe considerazioni valgono per pareti metalliche, tavoli metallici ecc.

Ma se qualcuno vi installa sopra un apparecchio elettrico dotato del solo isolamento principale, cioè un apparecchio che non è di classe I, cioè non ha il morsetto di terra, e non è nemmeno di classe II, cioè non ha un isolamento doppio, quale potrebbe essere un corpo illuminante oppure una cordina (un cavo con semplice isolamento), la scaffalatura diventa, suo malgrado, una massa: è una **massa diventata**.

Superato dunque il test dell'appartenenza della parte metallica all'impianto elettrico, passiamo al test di **Verifica Massa** per stabilire se la parte metallica ha questa qualifica o meno.

La corretta interpretazione ed applicazione della definizione di massa è mostrata nel seguente diagramma



Rispettando il diagramma si decide se si ha a che fare con una massa o meno.

Diamo per scontato l'immediato riconoscimento delle parti attive: morsetti a cui arriva l'alimentazione, conduttori che la distribuiscono, avvolgimenti che l'utilizzano ecc. Dai contatti con tali parti c'è solo la barriera meccanica o l'isolamento che può difenderci: in pratica l'involucro che le contiene. Diciamo che come protezione supplementare può esserci il differenziale ad alta sensibilità ($I_{dn} \leq 30 \text{ mA}$), ma è la difesa meccanica passiva l'unica obbligatoria.

I contatti con le parti metalliche che possono essere masse sono i contatti indiretti e la protezione da essi si ha con il collegamento all'impianto di terra delle masse unitamente al coordinamento dell'intervento dei dispositivi di interruzione dell'alimentazione. Non è lo scopo ora di entrare nei dettagli di tale protezione ma, come detto, solo quello di individuare le masse.

Ogni domanda del grafico deve essere analizzata in dettaglio con riferimento al caso concreto per un'interpretazione ed una risposta corretta.

Sulle Norme tale analisi non può esserci perché la realtà è infinitamente varia. Sta dunque al progettista dell'impianto valutare ogni situazione.

“che può essere toccata”

Non significa innanzitutto semplicemente a portata di mano, cioè a meno di 2,5 m dal pavimento. Inoltre sarebbe opportuno aggiungere l'avverbio "inavvertitamente".

Ad esempio, non è una massa una parte metallica che fa parte di una apparecchiatura elettrica e che può andare in tensione per rottura dell'isolamento principale se, per poterla toccare, occorre aprire con attrezzi l'involucro entro cui essa è contenuta. Involucro, si badi bene, che non ha alcuna necessità di essere aperto nel normale utilizzo dell'apparecchiatura. Chi decide di aprire l'involucro sa cosa sta facendo, sa che potrebbe toccare parti in tensione; non si può dire che l'eventuale contatto non possa essere da lui previsto, allo stesso modo che se quell'operatore aprisse un involucro in cui sa che ci sono parti attive scoperte.

Se invece togliere l'involucro è un'operazione indispensabile per il normale utilizzo dell'apparecchiatura, ad esempio per sostituire fusibili o regolare termiche, la parte metallica che diventa accessibile e che durante l'operazione può essere inavvertitamente toccata, è una massa.

Altro esempio: l'eventuale struttura metallica di un lampadario posto ad oltre 2,5 m dal pavimento può essere toccata inavvertitamente da un operatore che sta lavorando nell'ambiente usando una scala. Quindi è da considerare una massa anche se è fuori della portata di mano.

Il test successivo richiede che la parte metallica debba andare in tensione per la **rottura dell'isolamento principale**

Ragion per cui una parte metallica che fa parte di un'apparecchiatura elettrica, ma che è separata dalle parti attive da un doppio isolamento, anche se può essere toccata, non è una massa. Sono tali, come già detto, le apparecchiature in classe II, contrassegnate dal doppio quadrato.

Se tutte le apparecchiature installate sono in classe due, se si usano cavi in doppio isolamento, se si usano cordine entro tubi isolanti, se si usano scatole di derivazione che assicurano il doppio isolamento, la parete metallica (come i pali dell'illuminazione) non è una massa.

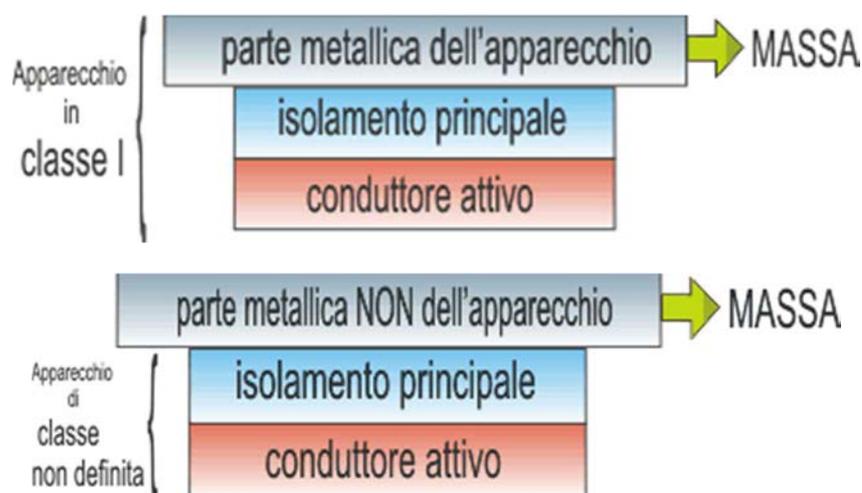
Ci si potrebbe chiedere se si debba considerare massa un involucro metallico di un'apparecchiatura elettrica che ha una vernice isolante: la risposta è sì in genere perché la vernice isolante non ha le prerogative richieste per costituire l'isolamento elettrico supplementare.

Riepilogo grafico

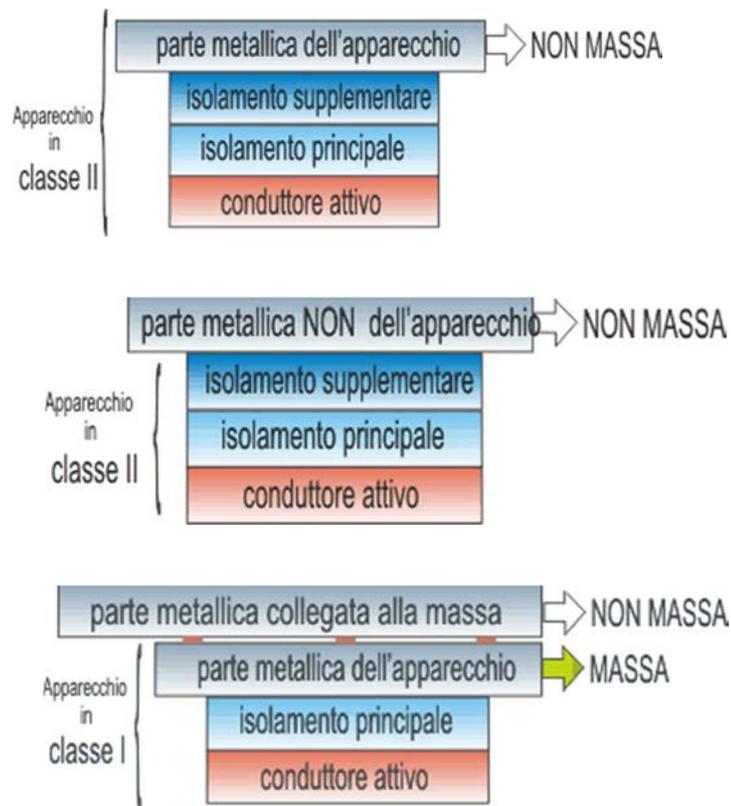
I casi che si possono presentare nella realtà sono molteplici: apparecchi in classe I, in classe II, in classe indefinita, installati permanentemente su strutture metalliche, oppure che si trovano occasionalmente su di esse.

Ecco comunque un riepilogo grafico delle possibili situazioni relative ad *installazioni permanenti* per parti metalliche che si possono inavvertitamente toccare.

Masse



Non Masse



La situazione di questa ultima figura mostra che una parte metallica in contatto con una massa non è una massa. Essa corrisponde all'esempio già discusso dell'installazione di un'apparecchiatura di classe I su una struttura metallica.

Nella stessa situazione in generale rientra anche lo sportello dei quadri elettrici quando su di esso non sono installate apparecchiature elettriche dotate del solo isolamento principale. Molti temono che le cerniere non consentano un collegamento sicuro con la struttura del quadro ed allora ponticellano. Il collegamento ohmico diventa più certo, ed in questo hanno ragione, ma il grado di sicurezza complessivo è stato abbassato perché hanno fatto diventare massa elettrica ciò che non lo è. Ciò che non è massa elettrica (e nemmeno massa estranea ovviamente) non rappresenta un pericolo, quindi non necessita del collegamento a terra diretto.

Ovviamente le cose cambiano se lo sportello è usato come supporto per apparecchiature elettriche con solo isolamento principale. In tal caso occorre ponticellare, a meno che il costruttore del quadro non garantisca che la cerniera assicura un perfetto collegamento ohmico.

4.1.1.2 Discutiamo ora sulla definizione di massa estranea.

Massa estranea è una parte conduttrice, non facente parte dell'impianto elettrico, in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra.

Definizione semplice. Troppo forse.

Come numero di parole la prima parte: *parte conduttrice, non facente parte dell'impianto elettrico*, equivale alla seconda: *in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra*.

Ma mentre sulla prima non c'è molto da dire ed è poco difficoltoso riconoscere ciò che la soddisfa, la seconda è composta da parole su cui occorre soffermarsi a lungo poiché sottintendono concetti delicati ed importanti.

Molto spesso essa diventa, ad una lettura superficiale: *che può assumere una tensione pericolosa*
Ciò la renderebbe simile alla massa elettrica. Può anche essere così, ma non è certo la situazione più frequente.

Intanto:

- perché si dice *introdurre* e non *assumere*?
- perché un *potenziale* e non una *tensione*?
- perché si aggiunge *generalmente* il potenziale di terra?
- come mai si *precisa in grado di*?

Partiamo da

[..] un potenziale, generalmente il potenziale di terra.

Si parla di un *potenziale*, ma si pone immediatamente l'accento su un *particolare potenziale*: *quello di terra* indicando in tal modo che è questo potenziale ad essere pericoloso nella quasi totalità dei casi.

Ma perché proprio il potenziale di terra deve essere pericoloso?

"Se la terra è pericolosa", ci si potrebbe chiedere, "perché si fa l'impianto di terra e si collegano ad essa le masse elettriche?"

La domanda, provocatoria o meno, potrebbe anche non essere banale, se si pensa che, pur non esplicitamente, le norme ritengono più sicuri gli apparecchi in classe due; sicuramente comunque mette in evidenza che ci si dimentica qual è il pericolo rappresentato dall'utilizzo dell'energia elettrica.

Bisogna allora fare un passo indietro e pensare alle *definizioni e leggi dell'elettrotecnica di base*.

Innanzitutto non è il potenziale in sé a rappresentare un pericolo (i passeri sui conduttori di una linea a 230 kV lo dimostrano), ma la differenza di potenziale.

Facciamo un paragone: sul pavimento di una stanza senza ostacoli e buchi si può camminare senza pericoli anche al buio, a qualunque piano del grattacielo sia localizzato l'appartamento. Non si può dire la stessa cosa se ci sono ostacoli, in particolare poi se ci sono buchi attraverso cui la persona possa precipitare.

Il potenziale è l'altezza rispetto al terreno, che non è pericolosa se in tutto il pavimento è la stessa. Ciò che rappresenta il pericolo è la differenza di altezza rispetto al terreno che può esserci tra due zone contigue del pavimento, in particolare sull'orlo della buca, quando, dopo un successivo passo non si può far altro che precipitare.

Il dislivello corrisponde alla *differenza di potenziale (o tensione elettrica)*.

Se la buca sul pavimento è pericolosa per le conseguenze della caduta che essa provoca al malcapitato che vi cade dentro, così la differenza di potenziale tra due conduttori che entrano in contatto con il corpo umano, è pericolosa per il movimento che essa provoca nelle cariche elettriche che migrano tra i due punti di contatto. Il movimento, cioè la corrente elettrica che si instaura, scombussola il funzionamento del corpo, come l'impatto conseguente alla caduta. E come le conseguenze della caduta sono tanto più gravi quanto più profonda è la buca, così lo "scombussolamento" è tanto maggiore quanto la differenza di potenziale è più grande. L'intensità di corrente è la tensione diviso la resistenza del corpo, misurata tra l'ingresso e l'uscita della corrente; la tensione è la differenza di potenziale tra i punti di ingresso e di uscita della corrente.

Se i punti di contatto sono equipotenziali, indipendentemente dal loro potenziale assoluto rispetto al terreno, il pericolo non c'è: nessuna corrente può circolare ai capi di una resistenza finita, qual è quella del corpo umano, se la differenza di potenziale è nulla. Come non si può precipitare in una buca che non c'è.

Il corpo metallico che si tocca, per essere pericoloso, deve essere *in grado di introdurre [..] il potenziale zero* che è quello, già si è detto più volte, che crea in genere i problemi.

Deve cioè

- *portarlo dentro* l'ambiente in cui si trova l'impianto elettrico le cui masse possono avere un potenziale diverso;
- *mantenerlo* indipendentemente dal potenziale che assumeranno le masse in caso di guasto.
In altre parole deve essere *indipendente (eletticamente separata) dall'impianto di terra* che serve per la protezione dai contatti indiretti.

E' così che il contatto tra una massa e la parte metallica che non fa parte dell'impianto elettrico può determinare una differenza di potenziale in grado di instaurare la corrente pericolosa nella persona che stabilisce il contatto.

Per mantenere il suo potenziale zero, la parte metallica non deve essere in alcun modo collegata ohmicamente all'impianto di terra nel senso che rimane a potenziale zero anche quando l'impianto di terra va in tensione: questo significa indipendente.

Se esiste un collegamento, qualunque ne sia la resistenza, masse e parte metallica assumono lo stesso potenziale. La parte metallica dunque non rappresenta un pericolo.

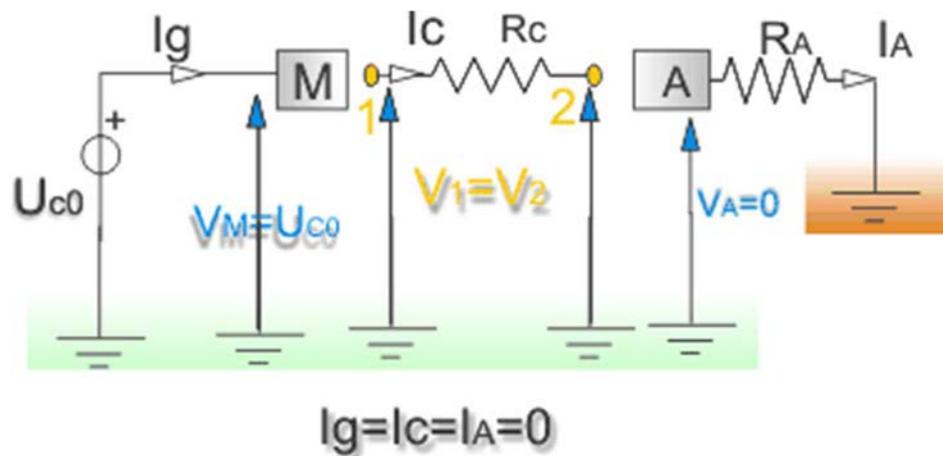
Potrebbe anche trattarsi di **un potenziale diverso da zero** ad esempio un tubo collegato ad una massa elettrica non connessa a terra, comune a più ambienti, nel caso di un guasto sulla massa.

Il potenziale introdotto nell'ambiente sarebbe allora pericoloso. Se gli ambienti appartengono tutto allo stesso edificio e l'impianto è eseguito a regola d'arte, tutte le masse sono già collegate all'impianto di terra per cui il potenziale trasferito è quello delle masse, e non rappresenta un pericolo. Ovviamente potrebbe esserci un errore od una rottura del collegamento. A rigore dunque quel tubo, dato che potrebbe introdurre un potenziale in un ambiente e mantenerlo, è una massa estranea e dovrebbe essere collegato a terra.

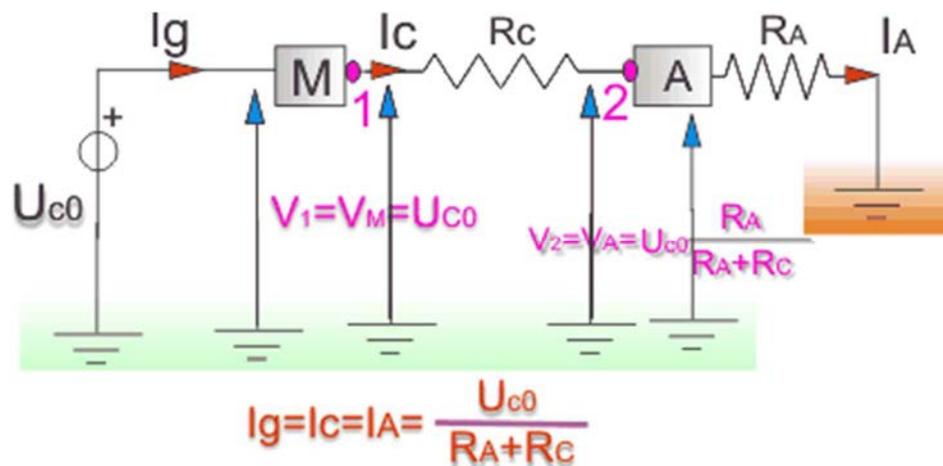
Da questo punto di vista la massa estranea sembra sfuggire ad un'identificazione precisa, o meglio apre un ampio ventaglio di possibilità di esserlo ad ogni oggetto metallico comune a più ambienti, con una proliferazione indiscriminata dei collegamenti a terra e discussioni a non finire tra gli addetti ai lavori. Ma, come si vedrà, la norma correrà ai ripari, definendo esplicitamente le masse estranee da collegare a terra.

C'è, per di più, un'ulteriore questione che rende il riconoscimento di una massa estranea sempre più scivoloso: quella dei

1000 Ω e 200 Ω



Prima del contatto



Contatto

La parte metallica indipendente dall'impianto di terra e non facente parte dell'impianto elettrico, indicata con A nelle figure, può introdurre il potenziale zero con diversi valori di resistenza che dipendono dal suo contatto con il terreno. Nelle figure l'indipendenza di A dall'impianto di terra della massa M è evidenziata simbolicamente utilizzando il colore verde per la terra della massa M, che è l'impianto di terra dell'edificio, e l'arancione per la terra lontana che dà il suo potenziale ad A. Entrambe le terre sono ovviamente a potenziale zero.

La resistenza R_A è determinante per la corrente I_C che si stabilisce nel corpo umano che tocca contemporaneamente la massa M in tensione per un guasto e la parte metallica A .

Prima del contatto

- la parte metallica ha il potenziale zero della terra lontana $V_A = 0$;
- la massa M è al potenziale $V_M = U_{C0}$;
- tra i punti 1 e 2 del corpo umano schematizzato con la resistenza R_C , non c'è alcuna differenza di potenziale e non circola alcuna corrente.

Quando il contatto avviene, ritenendo costante il potenziale assunto della massa (è un'assunzione a favore della sicurezza, in quanto la tensione di contatto si abbassa per effetto della resistenza, qui trascurata perché sempre piccola in confronto ad R_C , in serie al generatore U_{C0}), si instaura nel corpo una corrente

$$I_C = \frac{U_{C0}}{R_C + R_A}$$

tanto più grande dunque quanto più R_A è piccola: al limite nulla per R_A infinita, massima e pari a

$$I_C = \frac{U_{C0}}{R_C}$$

se R_A è nulla. Nel primo caso non c'è pericolo, nel secondo sì.

La domanda allora è: Qual è il valore di passaggio da non pericolo a pericolo?

Tradotta in altri termini: qual è il valore di R_A al di sotto del quale quella parte metallica è da considerare una vera massa estranea?

La risposta è:

- 1000 Ω negli ambienti normali;
- 200 Ω in quelli speciali

Il motivo è dovuto alle ipotesi che si sono fatte in sede normativa per stabilire le *curve di sicurezza*.

Le curve di sicurezza danno, per ogni tensione cui può essere soggetta la persona nei due tipi di ambienti, il tempo massimo per cui può essere sopportata senza danni.

Al di sotto di tali valori la parte metallica deve essere considerata a tutti gli effetti una massa estranea. Al di sopra no, ovviamente.

Teoricamente il ragionamento è relativamente semplice ma nella pratica è evidente che le cose come si complicano. Ogni oggetto metallico entrante in un ambiente, in contatto con il terreno, indipendentemente dall'impianto di terra dell'edificio, potrebbe essere una massa estranea e, per deciderlo, occorrerebbe misurarne la resistenza rispetto a terra.

Il buon senso, che nella norma non è però definito, ci dice che ci si potrebbe limitare al controllo delle parti metalliche più sospette per le quali è ipotizzabile che una persona possa stabilire un contatto con una massa estranea. Anche in questo caso possono nascere infiniti dubbi amletici ed altrettante discussioni: misurare o non misurare?

Che fare in pratica

La norma allora corre ai ripari e semplifica o almeno cerca.

Per i ***luoghi a maggior rischio elettrico***:

- locali medici;
- luoghi conduttori ristretti;
- bagni e docce;
- piscine;
- locali agricoli;

bisogna considerare tutte le masse estranee di ogni locale e collegarle all'impianto di terra: tale tipo di collegamento è detto collegamento equipotenziale supplementare: ***EQS***. Esso è effettuato in ogni locale e si aggiunge a quello eseguito per l'edificio nel suo complesso, detto principale.

Per **tutti gli altri luoghi**, compresi gli edifici di cui i luoghi a maggior rischio elettrico fanno parte, la norma precisa le indiscutibili **quattro masse estranee** da collegare effettivamente all'impianto di terra:

- tubazione di acqua e gas;
- tubazioni dell'impianto centralizzato di condizionamento;
- gli elementi strutturali metallici dell'edificio;
- i ferri d'armatura del cemento armato.

Esse vanno collegate al collettore cui arriva il conduttore di terra con conduttori che costituiscono il collegamento equipotenziale principale: **EQP**

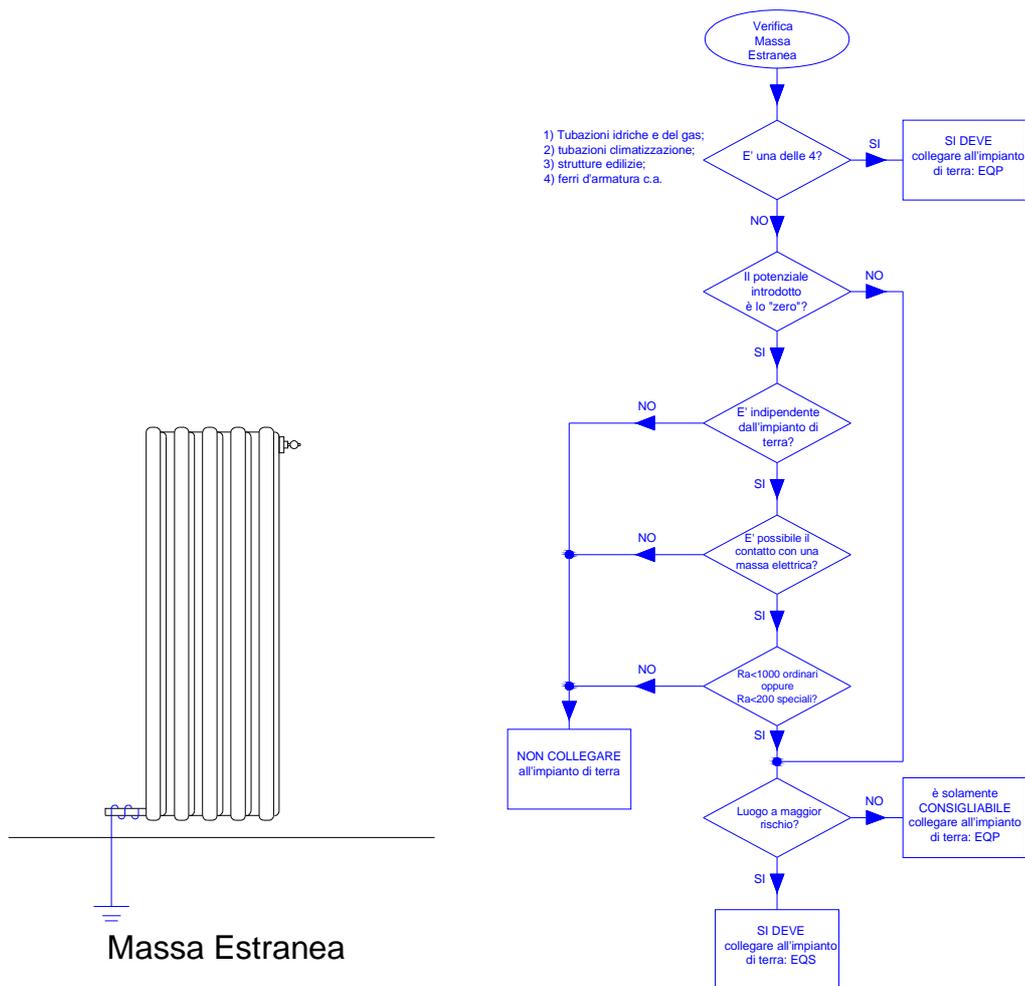
A ben guardare poi le vere masse estranee dovrebbero essere ridotte a tre, almeno nei nuovi edifici, in quanto i ferri d'armatura, dovrebbero già essere collegati all'impianto di terra essendo le fondamentazioni i migliori dispersori.

Per le altre masse estranee, cioè per quelle parti metalliche che non fanno parte dell'impianto elettrico, che sono indipendenti dall'impianto di terra, che portando all'interno dell'edificio il potenziale di una terra lontana, con resistenza inferiore a 1000 Ω negli ambienti normali ed a 200 Ω in quelli speciali, e per quelle che possono trasferire da un ambiente all'altro un potenziale elevato per un guasto su una massa non connessa a terra, il collegamento a terra non è necessario ma solo consigliato.

Le ragioni per far nascere discussioni ci sono, ma esistono anche le indicazioni per dirimerle.

Un progettista ad ogni modo deve esistere e qualche decisione dovrà pure prenderla, consapevole che le norme non possono codificare tutti i casi particolari.

Il seguente **grafo di flusso** riassume come procedere

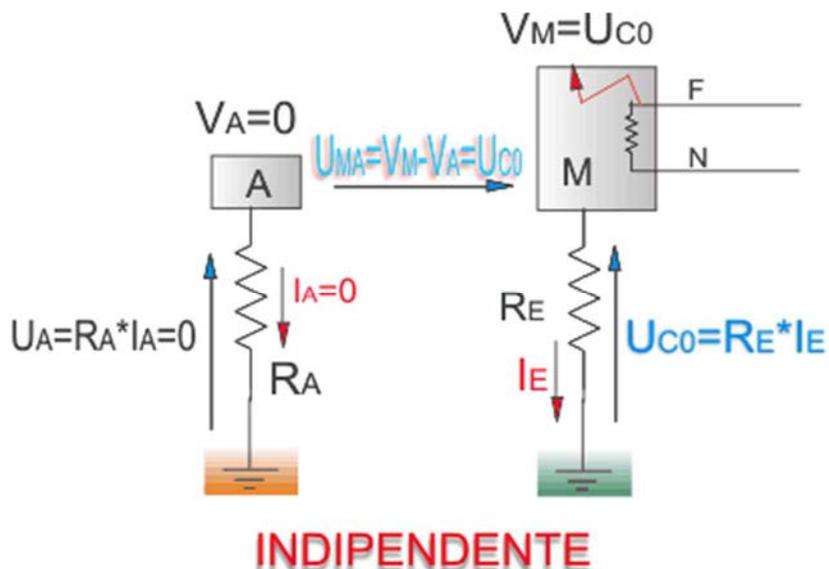


Test per massa estranea

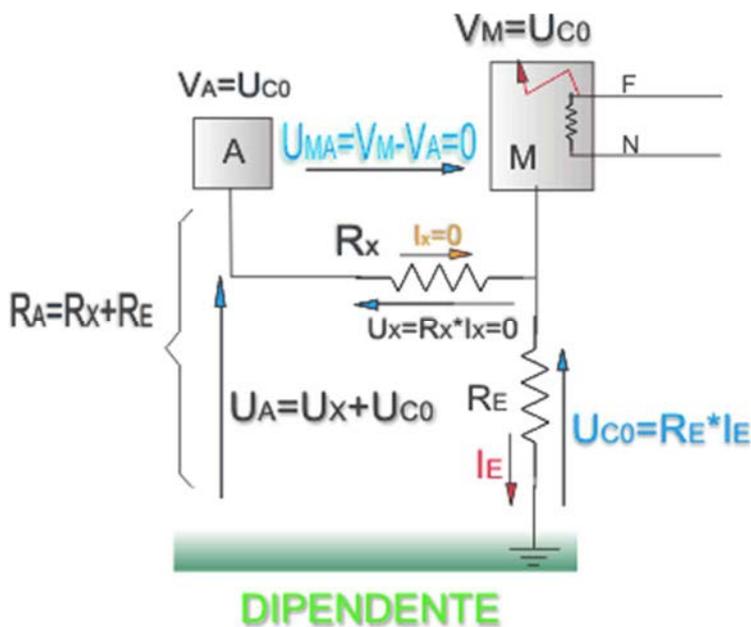
Come evidenziato dal grafo di flusso, occorre stabilire se la parte metallica è dipendente o indipendente dall'impianto di terra cui sono collegate le masse.

Le due figure che seguono dovrebbero chiarire il concetto

Indipendenza e dipendenza



In questo caso il corpo metallico presenta una resistenza verso terra R_A che è indipendente dall'impianto di terra cui sono collegate le masse elettriche. In seguito ad un guasto sulla massa, questa si porta, rispetto a terra, al potenziale U_{C0} , mentre la parte metallica resta a zero. La tensione tra massa e parte metallica è proprio U_{C0} .



In questo secondo caso la resistenza R_A è ottenuta tramite una R_X che collega la parte metallica all'impianto di terra, una R_X che è dovuta alla presenza dei collegamenti equipotenziali principali (EQP).

Un guasto sulla massa porta sia la massa, sia la parte metallica al potenziale U_{C0} . La tensione tra la massa e la parte metallica è pertanto nulla, **qualunque sia il valore di R_A** , quindi di R_X . (Ovviamente se fosse $R_A < R_E$ la parte metallica sarebbe indipendente)

4.2 Generalità

L'impianto di terra costituisce fondamentalmente un mezzo per disperdere correnti elettriche nel terreno e per proteggere, unitamente ai dispositivi d'interruzione automatica del circuito, le persone dal pericolo di elettrocuzione. Un buon impianto di terra, associato ad uso corretto dei collegamenti equipotenziali, rappresenta una delle soluzioni più utilizzate per raggiungere il miglior livello di sicurezza.

Un impianto di terra, secondo la funzione che deve assolvere, può distinguersi in:

- **messa a terra di protezione:** è una misura atta a proteggere le persone dai contatti diretti. Collega tutte le parti metalliche degli impianti e degli apparecchi utilizzatori con lo scopo di limitare o, agevolando l'interruzione del circuito guasto, di eliminare le tensioni pericolose che potrebbero applicarsi alla persona che venisse malauguratamente a contatto con un involucro metallico in difetto di isolamento. La messa a terra di protezione riguarda anche gli impianti di protezione contro le scariche atmosferiche, i sistemi di scarico a terra di cariche elettrostatiche, la messa a terra di apparecchiature elettroniche che presentano correnti di dispersione elevate anche in condizioni di normale funzionamento.
- **messa a terra di funzionamento:** ha lo scopo di stabilire un collegamento a terra di particolari punti del circuito elettrico per esigenze di esercizio, come la messa a terra del neutro nei sistemi TT e TN; garantisce quindi il regolare funzionamento degli impianti.
- **messa a terra per lavori:** collega a terra e quindi mette in sicurezza, una sezione di impianto temporaneamente fuori servizio per esigenze di manutenzione.

E' utile ricordare che l'importanza dell'impianto di terra, a proposito delle problematiche legate alla sicurezza, è sottolineata anche da leggi e normative specifiche riguardanti la sicurezza nei luoghi di lavoro. Non bisogna comunque dimenticare che, per quanto concerne il rischio per le persone, la presenza di un impianto di terra è una condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la sicurezza; questa dipende da molti altri fattori che saranno chiariti in altre parti del testo.

- 1: dispersore intenzionale o artificiale (DA)
- 2: dispersore di fatto o naturale (DN)
- 3: conduttore di terra (CT)
- 4: collettore principale di terra
- 5: collegamenti equipotenziali principali (EQP)
- 6: pozzetto di ispezione
- 7: conduttore di protezione principale montante (PE)
- 8: derivazione principale sul PE
- 9: conduttore di protezione secondario (PE)
- 10: collegamenti equipotenziali supplementari (EQS)

N.B. **Conduttori di protezione** riguardano esclusivamente le **masse**.

Collegamenti equipotenziali riguardano esclusivamente le **masse estranee**

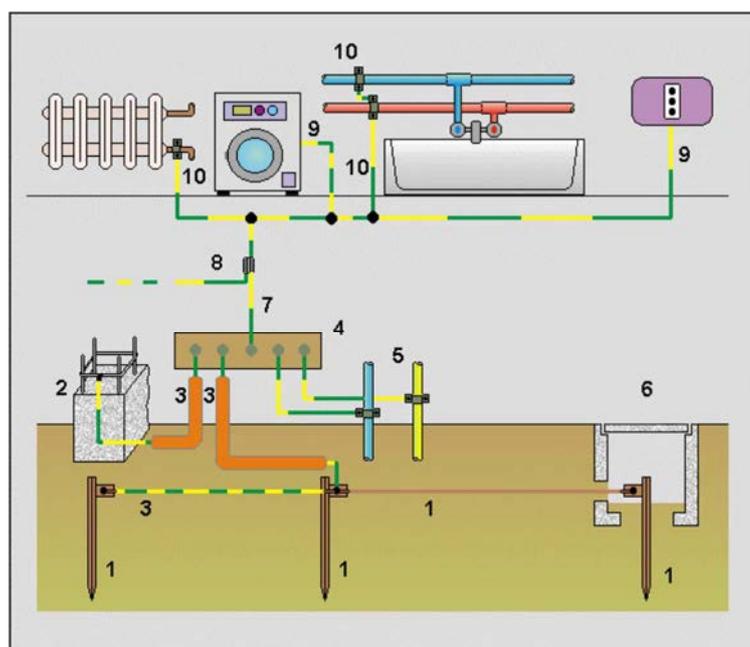


Fig. 1 – Struttura fondamentale di un impianto di terra

Gli elementi fondamentali dell'impianto di terra sono (fig. 1):

1. dispersore intenzionale o artificiale (DA), ottenuto mediante picchetti (puntazze) infissi verticalmente nel terreno, nastri, piastre oppure corde nude interrate orizzontalmente.

2. dispersore di fatto o naturale (DN), costituito da strutture metalliche interrate come ferri d'armatura, tubazioni metalliche dell'acqua (non sono solitamente utilizzabili le tubazioni dell'acquedotto pubblico), schermi metallici dei cavi, ecc..

In generale il **dispersore** è un corpo conduttore o gruppo di corpi conduttori in contatto elettrico con il terreno e che realizza un collegamento elettrico con la terra;

3. conduttore di terra (CT), collega i dispersori fra loro e al collettore principale di terra, gli eventuali tratti di corda nuda a contatto col terreno devono essere considerati parte del dispersore. È consigliabile proteggere le parti interrate e quelle emergenti mediante tubi per migliorare le difese contro la corrosione e contro gli urti.

4. collettore principale di terra, è il nodo principale, realizzato mediante sbarra o morsettiera, cui fanno capo le diverse parti dell'impianto.

5. collegamenti equipotenziali principali (EQP), collegano al collettore principale di terra le **masse estranee** (tubazioni dell'acqua, del gas, ecc..) entranti alla base dell'edificio.

I collegamenti equipotenziali principali realizzano il collegamento fra il conduttore di protezione, il conduttore di terra, il collettore principale di terra e le parti conduttrici di seguito elencate:

- i tubi metallici, acqua, gas, ecc..;
- le strutture metalliche dell'edificio;
- le canalizzazioni del riscaldamento centrale;
- le canalizzazioni del condizionamento d'aria;
- le armature principali del cemento armato (ove possibile);
- lo schermo metallico dei cavi di telecomunicazione.

Le parti conduttrici che dall'esterno si immettono all'interno nell'edificio devono essere collegate il più vicino possibile al loro punto di ingresso nell'edificio.

6. pozzetto di ispezione, non obbligatorio.

7. conduttore di protezione principale montante (PE), connette il collettore principale di terra con i PE di collegamento alle **masse** e con i conduttori equipotenziali di collegamento alle masse estranee.

È il conduttore prescritto per alcune misure di protezione contro i contatti indiretti per il collegamento di alcune delle seguenti parti: masse, masse estranee, collettore (o nodo) principale di terra, dispersore, punto di terra della sorgente o neutro artificiale;

8. derivazione principale sul PE con collegamento passante senza interruzione del PE montante.

9. conduttore di protezione secondario (PE), collega le **masse** al collettore principale di terra tramite il PE montante.

10. collegamenti equipotenziali supplementari (EQS), collegano le **masse estranee** fra loro e al conduttore di protezione.

Un collegamento equipotenziale supplementare comprendente tutte le masse simultaneamente accessibili costituite da componenti fissi dell'impianto e tutte le masse estranee (comprese, ove possibile, le armature principali del cemento armato) deve essere praticato localmente se i requisiti previsti per l'interruzione automatica non possono essere soddisfatti. Il collegamento equipotenziale deve comprendere i conduttori di protezione di tutti i componenti dell'impianto inclusi quelli delle prese a spina

4.3 Dispensore

Il dispersore è un elemento o un insieme di elementi metallici a contatto col terreno atto a disperdere le correnti di guasto. Deve essere dimensionato e scelto in funzione dei seguenti criteri:

- Resistenza meccanica adeguata per evitare eventuali danneggiamenti dovuti alle sollecitazioni in fase di installazione o agli assestamenti del terreno.
- Collegamenti che garantiscano nel tempo una buona continuità elettrica tra le varie parti del dispersore.
- Resistenza alla corrosione chimica del terreno e non aggressività nei confronti di altre strutture metalliche interrate alle quali il dispersore è collegato elettricamente.
- Sezione adeguata a sopportare senza danni le sollecitazioni termiche ed elettrodinamiche dovute alle correnti di guasto.

La norma CEI 64-8/5 stabilisce le dimensioni minime per i dispersori intenzionali (la norma CEI 11-1 per gli impianti di alta tensione stabilisce dimensioni minime in parte diverse che riguardano però solo le utenze con cabina propria dei sistemi TN) al fine di assicurare una sufficiente resistenza alle sollecitazioni meccaniche e alla corrosione (fig. 2).

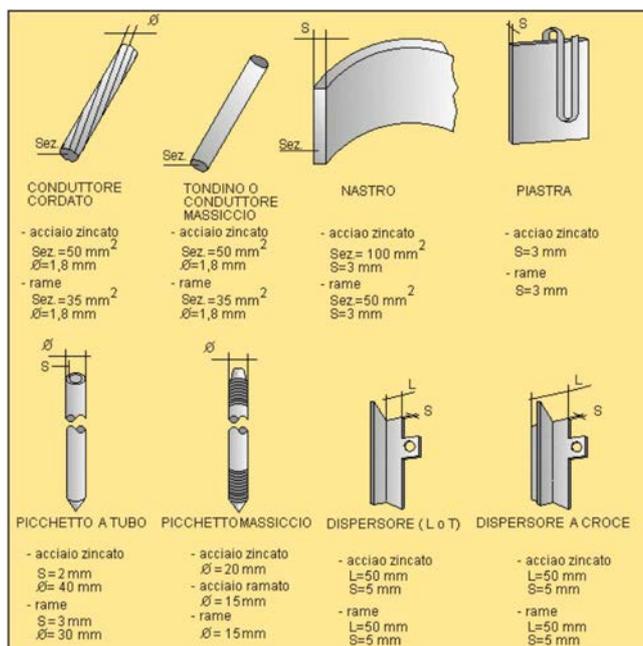


Fig. 2 – Dimensioni minime degli elementi di un dispersore intenzionale

La Norma raccomanda l'impiego di metalli resistenti alla corrosione come ferro zincato, rame, acciaio ramato senza escludere la possibilità di impiegare anche altri metalli se adatti al tipo di terreno. Possono essere utilizzati anche metalli ferrosi senza rivestimenti protettivi purché lo spessore sia aumentato del 50% e le sezioni non siano inferiori a 100 mm². Nelle figure seguenti sono rappresentati alcuni tra i componenti più comuni impiegati per la costruzione di un impianto di terra.

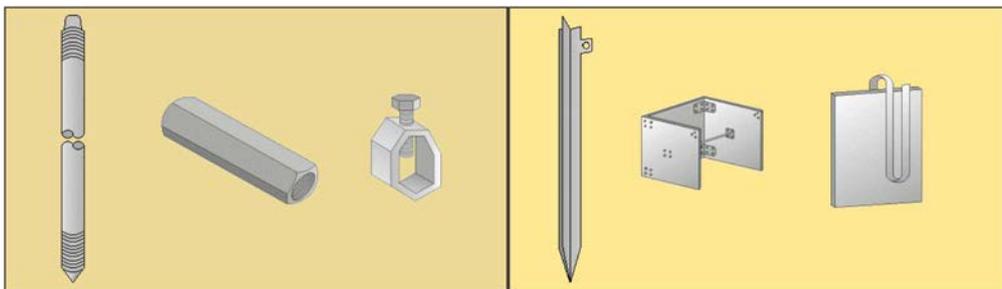


Fig. 3 Elemento per dispersore di profondità maniccotto per prolunga morsetto di collegamento.

Fig. 4 Esempi di dispersori Dispersore a croce in profilato dispersore a piastra modulare dispersore a piastra.

4.3.1 Dimensionamento del dispersore

Il terreno conduce le correnti di guasto che provengono dal dispersore dell'impianto verso quello della cabina. Si tratta di un conduttore atipico che avendo una sezione molto grande rende ininfluente la distanza rispetto alla cabina; a una certa distanza dal dispersore la resistenza del terreno si annulla. La resistenza di terra non dipende quindi dalla lunghezza di tale conduttore ma solamente dalla geometria che assume il dispersore. La resistenza che si oppone all'ingresso della corrente nel terreno è l'insieme di una resistenza di contatto, dovuta all'aderenza più o meno intima delle superfici degli elettrodi col terreno circostante, e di una resistenza che dipende dalla forma dei dispersori e dalla resistività del terreno. In generale la resistività del terreno è molto elevata se paragonata ai normali materiali conduttori. La sua variabilità da luogo a luogo, dipendendo dalla conformazione geologica ed essendo influenzata dalla temperatura, dall'umidità e dalla presenza nel terreno di composti in soluzione, ne rende molto difficoltosa la valutazione. Il suo valore può essere determinato solo attraverso misure o stabilito approssimativamente in funzione del tipo di terreno. In tab. 1 sono riportati i valori indicativi di resistività dei più comuni tipi di terreno.

<i>Terreno</i>		<i>Umido</i>	<i>Normale</i>	<i>Secco</i>
	Argilloso	5	10	20
	Agricolo (Terreno vegetale)	25	50	100
	Sabbia marina (con soluzioni saline)	4	2	1
	Sabbioso-Ghiaioso	500	1000	2000
	Roccioso	250	500	1000

Tab. 1 – Valori orientativi della resistività in funzione del tipo di terreno (ohm-metro)

Per abbassare il valore della resistenza di terra può essere necessario collegare in parallelo n dispersori elementari. La resistenza complessiva se si realizza un parallelo perfetto si riduce di un fattore 1/n. Realizzare il parallelo quasi perfetto non è facile e nemmeno del tutto conveniente. Ad una distanza pari a circa 10 volte la loro lunghezza l'influenza fra i dispersori è praticamente inesistente ma già con qualche metro di distanza si ottengono risultati più che accettabili (fig. 5).

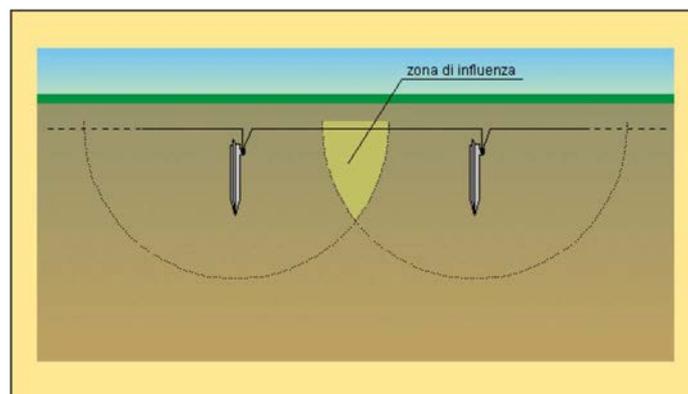


Fig. 5 – Influenza reciproca fra picchetti

La resistenza di terra può essere determinata preliminarmente mediante calcoli sufficientemente approssimati che non possono però prescindere da misure effettuate sul campo durante i lavori di posa per recuperare eventuali errori (valutazione della resistività del terreno, influenza reciproca fra dispersori o con strutture metalliche interrate) ed operare gli appropriati correttivi. Studi e rilievi sperimentali hanno consentito di scrivere delle formule semplificate per il calcolo della resistenza di terra in funzione delle caratteristiche dei diversi tipi di dispersori e della resistività del terreno (fig. 6).

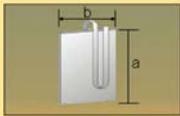
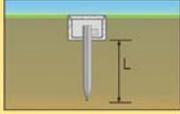
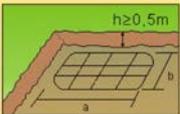
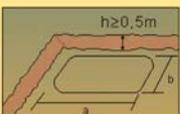
	Piastra	$R_E = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot b}}$
	Picchetto	$R_E = \frac{\rho}{L}$
	Corda	$R_E = 2 \frac{\rho}{L}$
	Maglia	$R_E = \frac{\rho}{(a+b)}$
	Anello	$R_E = 1,5 \frac{\rho}{(a+b)}$

Fig. 6 – Formule semplificate per il calcolo della resistenza di terra di alcuni fra i più comuni tipi di dispersore.

4.3.2 Scelta e criteri realizzativi

La scelta del tipo di dispersore è legata prevalentemente al tipo di terreno. Un dispersore a corda, solitamente interrato a profondità variabili di 50 - 100 cm, potrà essere impiegato in terreni a bassa resistività superficiale mentre un dispersore a picchetto, raggiungendo anche gli strati profondi, sarà adatto per terreni con strati profondi bagnati. Non sarà conveniente posare un dispersore ad anello in terreni di riporto mentre un dispersore a picchetto non potrà essere utilizzato in terreni con un sottile strato di terreno che ricopre conformazioni rocciose. Il dispersore a maglia trova applicazione soprattutto nei sistemi TN dove si devono limitare le tensioni di passo e di contatto che si possono stabilire a causa di guasti sull'alta tensione. Un impianto classico che sfrutta i vantaggi presentati da ciascun tipo di dispersore è descritto in fig. 7. Il dispersore è costituito da un anello ininterrotto di corda interrata attorno al perimetro dell'edificio a una profondità non inferiore a 50 cm integrato da un certo numero di picchetti e collegato in più punti ai ferri d'armatura.

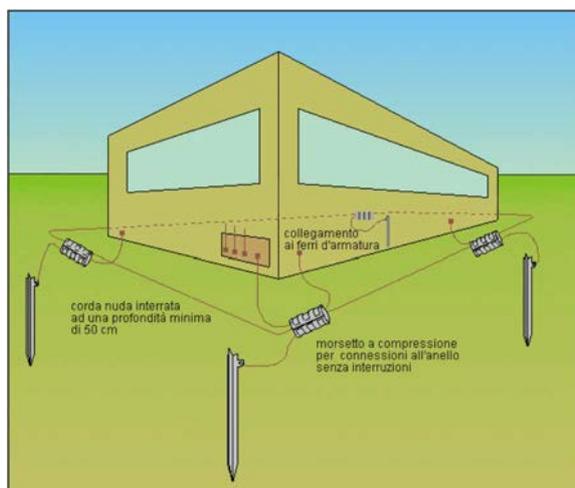


Fig. 7 – Dispersore integrato anello-picchetti

4.4 Conduttori di terra (CT)

I conduttori di terra normalmente si presentano sotto forma di corde o di piattine. Se il conduttore è nudo e interrato svolge anche le funzioni di dispersore e deve quindi avere le sezioni minime stabilite per i dispersori (come indicato nella figura 2, 35 mm² se in rame 50 mm² se in acciaio zincato) se invece si tratta di corda nuda installata a vista le sezioni minime previste sono di 25 mm² se in rame e di 50 mm² se in acciaio zincato (tab. 2). Il conduttore di terra può essere anche isolato, normalmente in PVC, e quindi, essendo garantita una buona protezione contro la corrosione, la sezione minima può essere di 16 mm² sia se di rame sia se di acciaio zincato. La sezione può essere ulteriormente ridotta se si adottano contemporaneamente difese contro le aggressioni chimiche e contro le sollecitazioni meccaniche, ad esempio conduttore isolato posato entro tubazione di tipo pesante. In questo caso la sezione minima non deve però essere inferiore alla maggiore sezione del conduttore di protezione collegato al collettore principale di terra. È consigliabile proteggere mediante tubi, solitamente in PVC, la parte interrata ed emergente dal terreno per migliorare le difese contro la corrosione e contro gli urti.

	<i>Protetti meccanicamente</i>		<i>Non protetti meccanicamente</i>
	<i>Sezione conduttore di fase</i>	<i>Sezione minima conduttore di terra</i>	<i>Sezione minima conduttore di terra</i>
<i>Protetto contro la corrosione (In ambienti non particolarmente aggressivi dal punto di vista chimico il rame e il ferro zincato si considerano protetti contro la corrosione).</i>	$S_F < 16$	$S_T = S_F$	16 mm ² se in rame
	$16 \leq S_F \leq 35$	$S_T = 16$	16 mm ² se in ferro zincato (secondo Norma CEI 7-6 o con rivestimento equivalente)
	$S_F > 35$	$S_T = S_F/2$	
<i>Non protetto contro la corrosione.</i>	25 mm ² se in rame 50 mm ² se in ferro zincato (secondo la Norma CEI 7-6 o con rivestimento equivalente).		

Tab. 2 – Sezioni minime (S_T) dei conduttori di terra

Un esempio di applicazione delle norme, in relazione alle sezioni minime da adottare, nel caso di conduttori di terra in rame è riportato nella figura 8. Il dimensionamento dei conduttori di terra deve essere condotto in modo differente a seconda che si tratti di impianto alimentato in bassa tensione o in alta tensione. Le ragioni che stanno alla base del dimensionamento dei conduttori di terra sono principalmente legate alla resistenza meccanica e alla corrosione del conduttore. La corrente di guasto, infatti, che in condizioni di normale funzionamento è zero, è quasi sempre sopportabile da conduttori di terra che rispettino le sezioni minime di tab. 2 stabilite dalle Norme. Una verifica più approfondita è comunque sempre auspicabile e richiede un'analisi dei singoli sistemi di distribuzione.

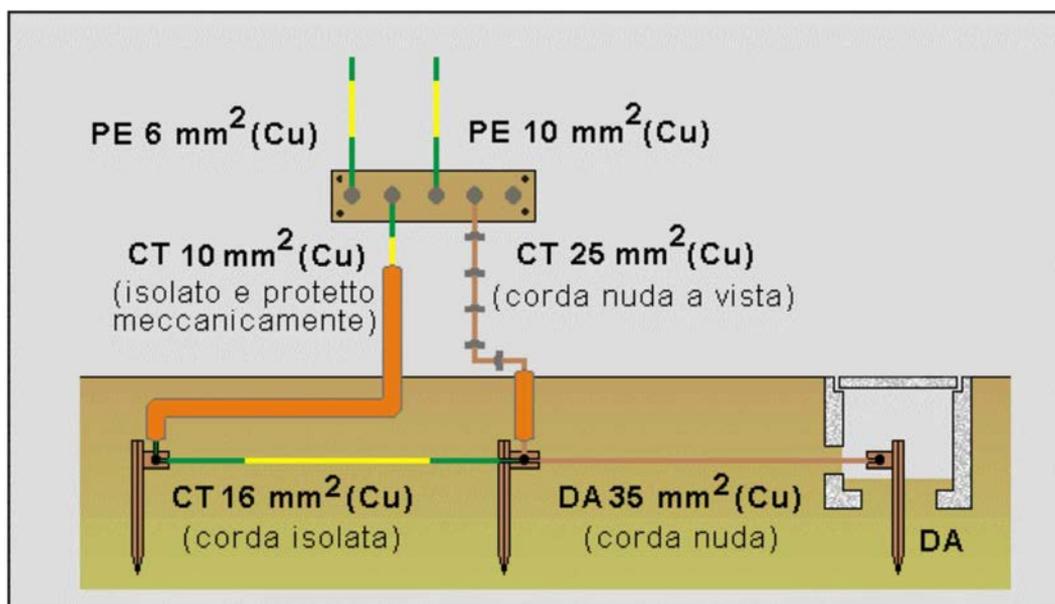


Fig. 8 Esempio di applicazione delle norme in relazione alle sezioni minime ammissibili dei conduttori di terra (CT) in rame

4.4.1 Dimensionamento dei conduttori di terra in un sistema TT

La corrente di guasto attraversa il conduttore di terra la cui sezione minima deve essere, sempre rispettando le sezioni minime prescritte, almeno uguale al maggiore conduttore di protezione dell'impianto oppure verificata con la nota relazione:

$$\text{da } I^2 t = K_c^2 S_T^2 \text{ ricaviamo } S_T = \sqrt{\frac{I^2 t}{K_c^2}}$$

dove:

S_T è la sezione minima del conduttore di terra in mm^2

I è la corrente di guasto in ampere che percorre il conduttore di terra per un guasto franco a massa

t è il tempo di intervento in secondi del dispositivo di protezione,

K_c è un coefficiente che tiene conto delle caratteristiche del materiale e della temperatura iniziale e finale che assume il conduttore

Se cautelativamente supponiamo di avere una resistenza dell'impianto di terra particolarmente bassa, ad esempio $R_T=0,1$ ohm, si avrà:

$$I_F = \frac{U_0}{R_T} = \frac{230}{0.1} = 2300A$$

Se il tempo di intervento delle protezioni fosse di un secondo (i relè differenziali intervengono generalmente in un tempo più breve) e il conduttore di protezione fosse un conduttore unipolare in EPR (tab. 4), si avrà:

$$S_T = \sqrt{\frac{2300^2 \times 1}{176^2}} = 13 \text{ mm}^2$$

Normalmente l'impianto di terra presenta valori di resistenza superiori a quelli ipotizzati e i tempi di intervento delle protezioni sono generalmente più bassi per cui un conduttore avente sezione di 16 mm^2 è quasi sempre sufficiente per un sistema TT.

4.4.2 Dimensionamento dei conduttori di terra in un sistema TN

Il dimensionamento del conduttore di terra in un sistema TN deve essere condotto con modalità diverse a seconda che si tratti di guasto sulla MT o sulla BT.

Media tensione

Per il calcolo di un guasto verso terra sulla MT prendiamo in considerazione una situazione estrema considerando, per comodità, una corrente di guasto pari a 1000 A (è un valore estremamente improbabile) e un tempo di intervento di 5 s. Se si utilizza sempre un conduttore di protezione unipolare in EPR dalla nota relazione, si ottiene:

$$S_T = \sqrt{\frac{1000^2 \times 5}{176^2}} = 12 \text{ mm}^2$$

Anche in questo caso una sezione di 16 mm^2 potrebbe essere adatta per la maggior parte delle situazioni con valori di correnti e di tempi di intervento (come normalmente si verifica) delle protezioni inferiori a quelli ipotizzati nell'esempio.

Bassa tensione

La corrente di guasto in bassa tensione può raggiungere anche valori di alcune decine di kA ma normalmente interessa solo il conduttore di protezione. Quando esistono più nodi equipotenziali, il conduttore di terra può essere interessato da correnti di guasto che hanno comunque, nella quasi totalità dei casi, valori piuttosto modesti perché la corrente che lo attraversa è funzione del rapporto tra l'impedenza del conduttore di protezione e di quella del conduttore di terra ed è tanto più bassa quanto minore è la sezione del conduttore di terra. Non è quindi necessario nemmeno in questo caso, se si rispettano le dimensioni minime, operare particolari verifiche.

4.5 Conduttori di protezione (PE)

Col conduttore di protezione (è identificato dal colore giallo/verde e viene chiamato PE oppure, se svolge contemporaneamente anche la funzione di neutro, PEN) si realizza il collegamento delle masse con l'impianto di terra. Unitamente all'interruttore automatico garantisce la protezione dai contatti indiretti e deve essere dimensionato sia per sopportare le sollecitazioni termiche dovute alla corrente di guasto verso terra (che in condizioni di regime è nulla) sia per sopportare eventuali sollecitazioni meccaniche o azioni corrosive (le norme a tal proposito stabiliscono delle sezioni minime). Il dimensionamento può essere effettuato, con un metodo semplificato (fig. 7), in funzione della sezione del conduttore di fase (tab. 3) o con la formula sotto indicata, metodo che conduce a sezioni notevolmente inferiori rispetto a quelle ottenute col metodo semplificato.

$$S_{PE} = \sqrt{\frac{I^2 t}{K_C^2}}$$

dove:

$I^2 t$ è l'energia specifica lasciata passare dall'interruttore automatico durante l'interruzione del guasto.

K_C è un coefficiente (tab.4) che dipende dal materiale isolante e dal tipo di conduttore impiegato.

Sezione di fase (mm ²)	Sezione minima del conduttore di protezione (mm ²)			
	Cu		Al	
	PE	PEN	PE	PEN
S_F<16	S _{PE} =S _F	S _{PE} =S _F	S _{PE} =S _F	S _{PE} =S _F
16≤S_F≤35	S _{PE} =16	S _{PE} =16	S _{PE} =16	S _{PE} =25
S_F>35	S _{PE} =S _F /2	S _{PE} =S _F /2	S _{PE} =S _F /2	S _{PE} =S _F /2

Tab. 3 – Sezioni minime dei conduttori di protezione

Valori del coefficiente K_C per conduttori costituiti da cavo unipolare o da un conduttore nudo in contatto con il rivestimento esterno dei cavi.				
Tipo conduttore		Tipo isolante		
		PVC g ₀ =30 g _f =160	G2 g ₀ =30 g _f =250	EPR/XLPE g ₀ =30 g _f =220
Cavo unipolare	Cu	143	166	176
	Al	95	110	116
Cavo nudo a contatto con rivestimento esterno di cavi isolati	Cu	143	166	176
	Al	95	110	116
	Fe	52	60	64

Valori del coefficiente K_C per conduttori costituiti da un'anima di cavo multipolare.				
Tipo conduttore		Tipo isolante		
		PVC g ₀ =30 g _f =160	G2 g ₀ =85 g _f =250	EPR/XLPE g ₀ =85 g _f =220
Anima di cavo multipolare	Cu	115	135	143
	Al	76	89	94

Valori del coefficiente K_C per conduttori nudi non in contatto con materiali danneggiabili				
Tipo conduttore		Condizioni di posa		
		A(*) $\vartheta_0=30$ $\vartheta_f=500$	B(*) $\vartheta_0=30$ $\vartheta_f=200$	C(*) $\vartheta_0=30$ $\vartheta_f=150$
Cavo nudo non a contatto con rivestimento esterno di cavi isolati	Cu	228	159	138
	Al	125	105	91
	Fe	82	58	50
A(*): a vista in locali accessibili solo a personale addestrato B(*): in condizioni ordinarie C(*): in locali con pericolo di incendio, salvo diverse prescrizioni della Norma CEI 64-2				

Valori del coefficiente K_C per conduttori costituiti dal rivestimento metallico o dall'armatura del cavo				
Tipo conduttore		Tipo di isolante		
		PVC $\vartheta_0=30$ $\vartheta_f=160$	G2 $\vartheta_0=80$ $\vartheta_f=250$	EPR/XLPE $\vartheta_0=75$ $\vartheta_f=220$
Rivestimento o armatura del cavo	Cu	122	140	149
	Al	79	90	96
	Fe	42	48	51
	Pb	22	19	19

Tab. 4 – Valori di K_C per il calcolo dei conduttori di terra e protezione

Se la sezione che si ricava dalla relazione $S_F/2$ non è compresa fra le sezioni unificate è ammesso adottare quella che più si avvicina a quella calcolata. Tale procedimento è valido solo se il conduttore di protezione è costituito dallo stesso materiale del conduttore di fase.

In caso contrario la sezione del conduttore deve essere calcolata in modo che le conduttanze dei diversi materiali abbiano lo stesso valore. Siano:

S_{PE} la sezione ricavata dalle tabelle relative al materiale, di resistività ρ uguale a quello del conduttore di fase;

S_{PE}^I la sezione e ρ^I la resistività del materiale del conduttore di protezione prescelto

Le due conduttanze da uguagliare sono:

$$G_{PE} = \frac{S_{PE}}{\rho l} \quad G_{PE}^I = \frac{S_{PE}^I}{\rho^I l}$$

da cui

$$S_{PE}^I = \frac{S_{PE} \rho^I}{\rho}$$

Se il conduttore di protezione è comune a più circuiti utilizzatori il valore della sezione deve essere scelto riferendosi alla maggior sezione fra i conduttori di fase.

Per concludere occorre ricordare che quando il conduttore di protezione non fa parte della conduttura di alimentazione non deve, in ogni caso, essere inferiore a $2,5 \text{ mm}^2$ se è prevista una protezione meccanica del conduttore stesso (tubo di protezione), e a 4 mm^2 se non è prevista una protezione meccanica.

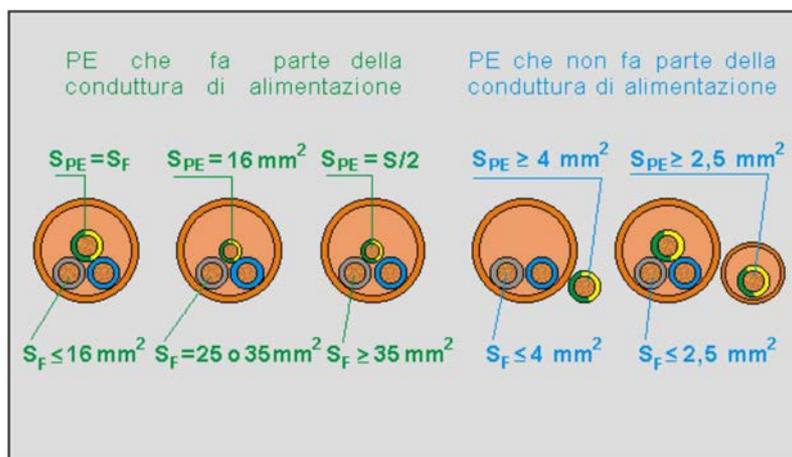


Fig. 9 – Esempio di applicazione delle norme riguardo alla scelta della sezione S_{PE} minima ammissibile dei conduttori di protezione (PE) in rame in funzione della sezione S_F del conduttore di fase e del tipo di posa.

4.5.1 Parti dell'impianto da collegare al PE

Attraverso il PE si devono collegare all'impianto di terra:

- Gli alveoli delle prese a spina.
- Gli involucri metallici delle apparecchiature elettriche ad installazione fissa.
- Gli apparecchi non di classe II.
- I controsoffitti metallici che portano cavi non di classe II o apparecchi elettrici di classe I.
- Gli apparecchi illuminanti di classe I.
- I canali e i tubi protettivi metallici che portano cavi non di classe II. Canali e tubi metallici devono essere in buon contatto elettrico fra loro.

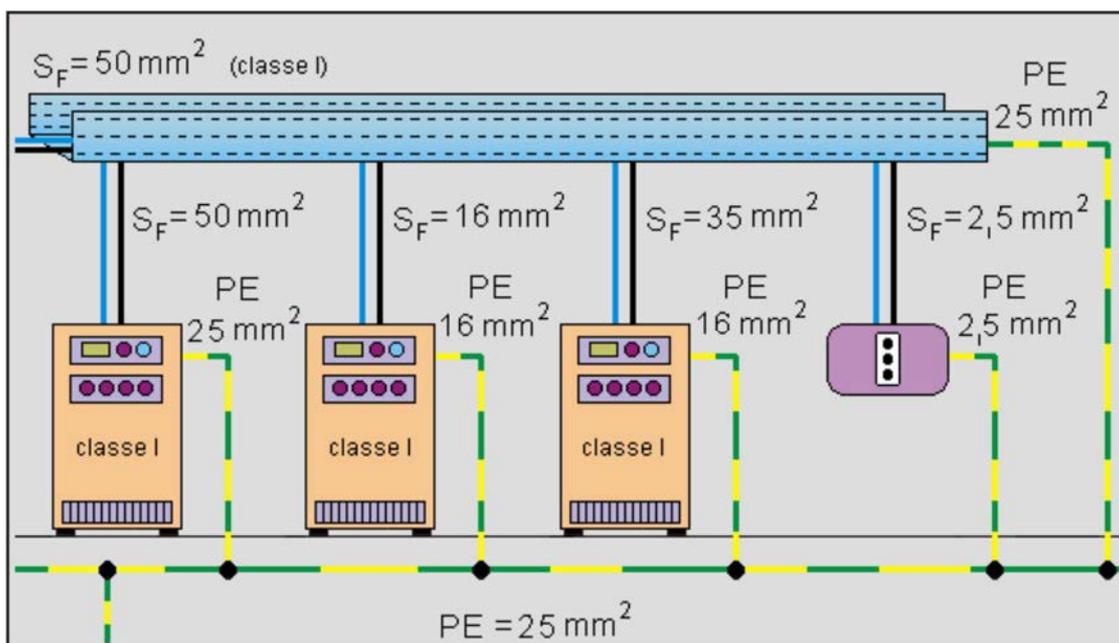


Fig. 10 – Esempio di parti dell'impianto che devono essere collegate all'impianto di terra

4.6 Collegamenti equipotenziali

Sono conduttori che collegano fra di loro parti che normalmente si trovano al potenziale di terra garantendo quindi l'equipotenzialità fra l'impianto di terra e le masse estranee e consentendo di ridurre la resistenza complessiva dell'impianto. Non essendo conduttori attivi e non dovendo sopportare gravose correnti di guasto il loro dimensionamento non segue regole legate alla portata ma alla resistenza meccanica del collegamento. Per gli ambienti ordinari le norme prescrivono le sezioni minime che devono essere rispettata per questi conduttori distinguendo tra *conduttori equipotenziali principali (EQP)* e *conduttori equipotenziali supplementari (EQS)*. Sono detti principali se collegano le masse estranee entranti alla base dell'edificio al nodo principale di terra, sono detti supplementari negli altri casi (fig. 11).

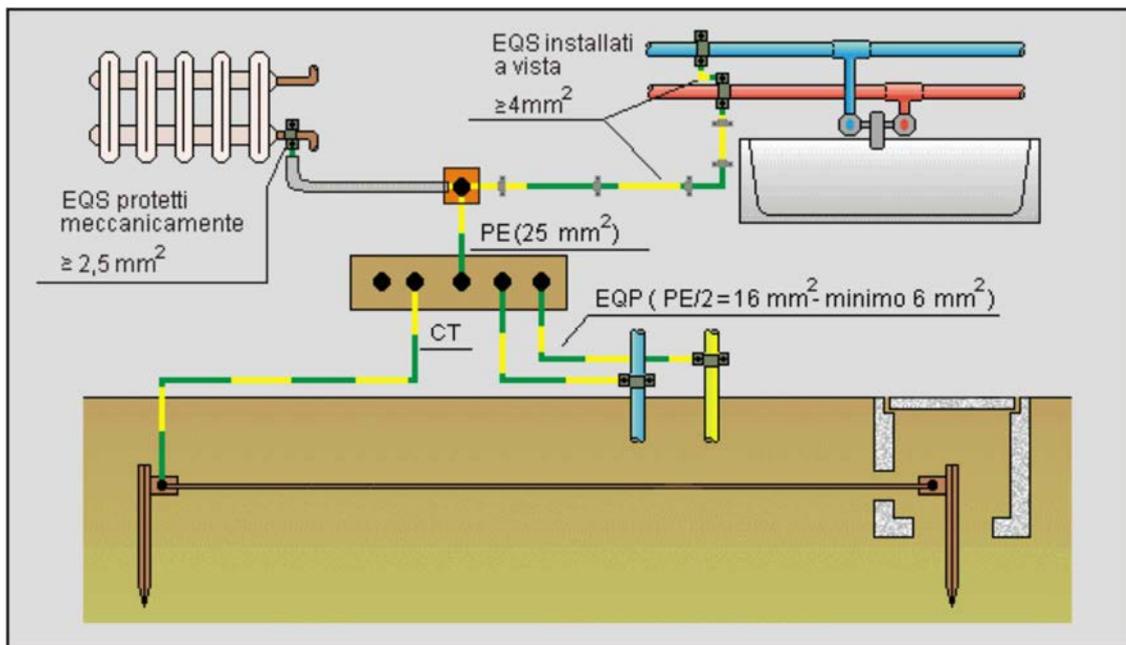


Fig. 11 – Esempio di scelta delle sezioni minime dei conduttori equipotenziali

I collegamenti equipotenziali supplementari sono obbligatori solo in particolari situazioni ambientali come ad esempio nei bagni. Sono necessari anche nei casi in cui la protezione viene attuata senza l'impianto di terra come ad esempio quando si utilizza la protezione per separazione elettrica. Devono essere effettuati utilizzando appositi morsetti a collare (fig. 12) di materiale adatto ad evitare il formarsi di coppie galvaniche che potrebbero favorire la corrosione.

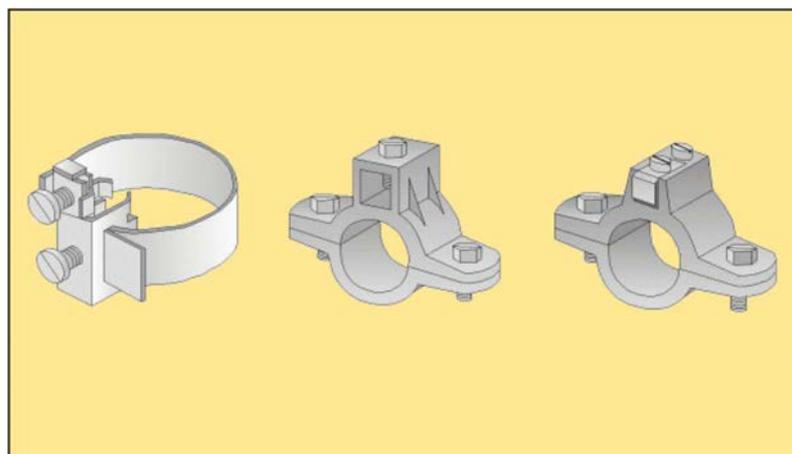


Fig. 12 – Tipici collari adatti per collegamenti equipotenziali

Le sezioni minime prescritte per tali collegamenti sono raccolte nella tabella 5.

<i>Conduttori equipotenziali</i>	<i>Sezione del conduttore di protezione principale PE (mm²)</i>	<i>Sezione del conduttore equipotenziale (mm²)</i>
Principale EQP	≤10	6
	=16	10
	=25	16
	>35	25
Supplementare EQS:		
<i>Collegamento massa-massa</i>	EQS ≥ PE di sezione minore (1)	
<i>Collegamento massa-massa estranea</i>	EQS ≥ 1/2 della sezione del corrispondente conduttore PE. In ogni caso la sezione del conduttore EQS deve essere: ≥ 2.5 mm ² se protetto meccanicamente, ≥ 4 mm ² se non protetto meccanicamente	
<p>(1) É opportuno aumentare la sezione del conduttore EQS sulla base della corrente di guasto effettiva quando le due masse appartengono a circuiti con sezioni dei conduttori di protezione molto diverse. Questo per evitare che sul conduttore EQS, dimensionato in base alla sezione del conduttore di protezione minore, possano circolare correnti di guasto non sopportabili dal conduttore stesso</p>		

Tab. 5 – Sezioni minime dei conduttori equipotenziali

4.7 Connessioni e collettore principale di terra

Ogni impianto di terra deve disporre di un collettore principale di terra (fig. 13) che può essere una piastra metallica in acciaio zincato o in rame stagnato o cadmiato o un'apposita morsettieria.

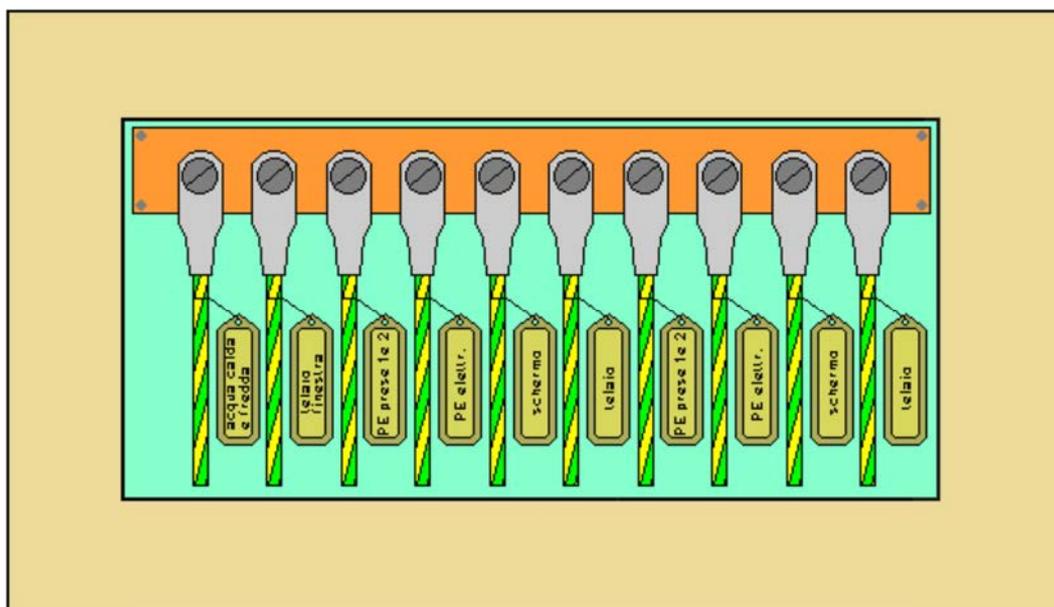


Fig. 13 – Esempio di collettore principale di terra

Le giunzioni e le connessioni fra i vari elementi dell'impianto di terra devono essere eseguite a regola d'arte in modo che sia garantita la continuità elettrica nel tempo. Il contatto deve essere ben saldo per evitare possibili allentamenti (fig. 14 e 15) e, ove necessario, le connessioni devono essere facilmente accessibili e sezionabili per facilitare le operazioni di manutenzione e verifica.

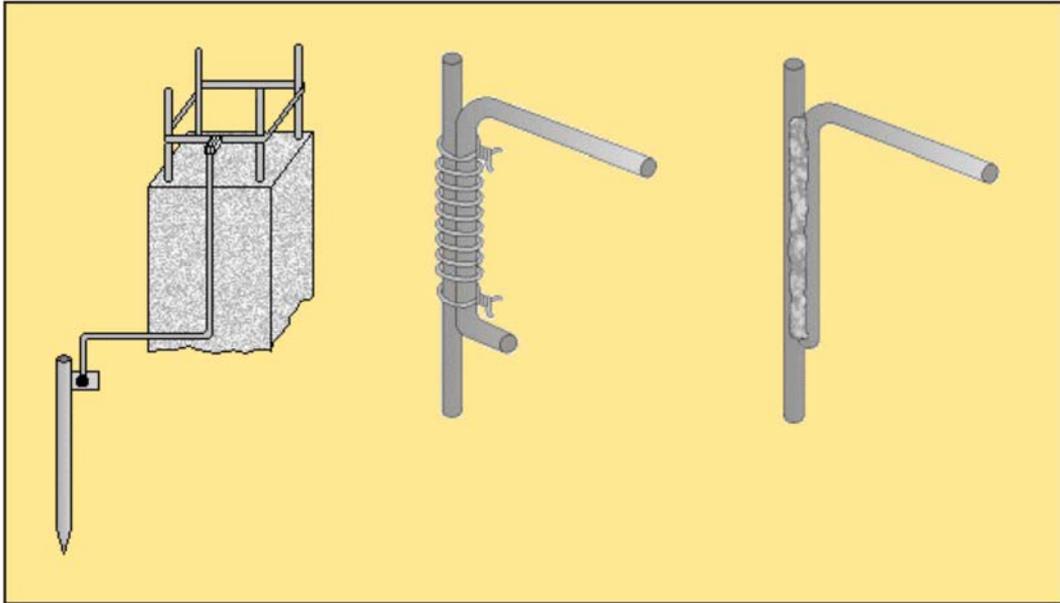


Fig. 14 – Esempi di connessioni a regola d'arte collegamento ai ferri d'armatura – connessione di tondini di ferro mediante legatura – connessione di tondini di ferro tramite saldatura forte

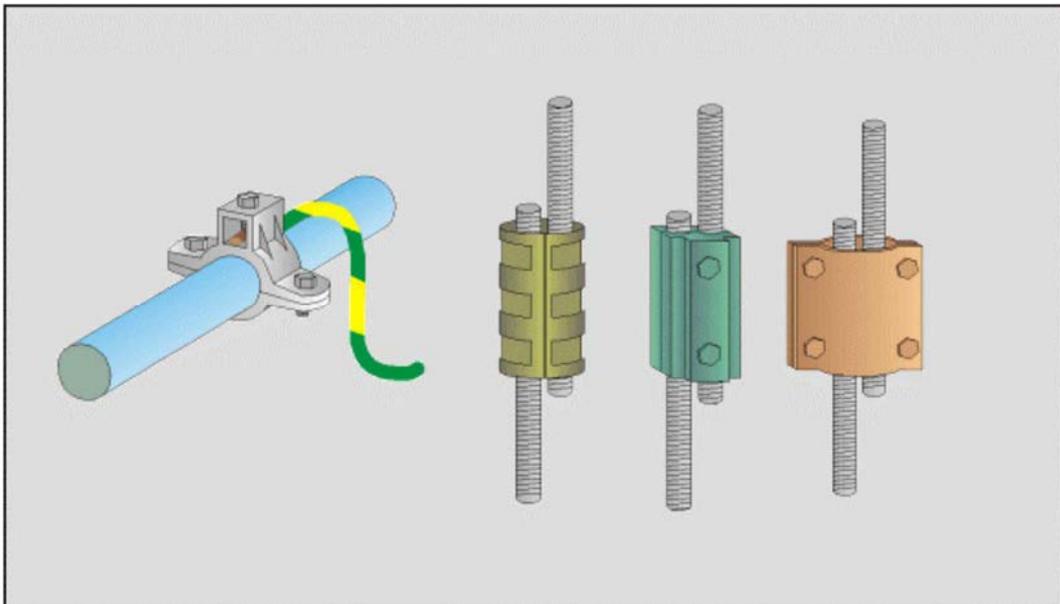


Fig. 15 – Esempi di connessioni a regola d'arte collegamento fra tubo e corda isolata collegamenti fra corde nude

4.8 Come proteggere il dispersore dalla corrosione

4.8.1 Processi di corrosione

Dal punto di vista chimico-fisico i metalli e le leghe, nelle normali condizioni ambientali, non sono in equilibrio ma tendono a trasformarsi nei loro composti: ossidi, idrossidi, carbonati, solfati, cloruri ecc. Si tratta di processi di alterazione cui sono soggetti quasi tutti i metalli, ad eccezione dei cosiddetti metalli nobili, come il platino, l'oro e l'argento, e che si manifestano in seguito ad ossidazione della superficie a contatto con l'ambiente. Alla base di questo fenomeno, chiamato corrosione, vi è quasi sempre lo scambio di elettroni fra una specie chimica che li cede (ossidazione) ed una seconda specie chimica che li acquista (riduzione). In questa reazione, detta appunto di ossidoriduzione, la specie chimica che si corrode è quella che perde elettroni. Non sempre però l'ossidazione conduce alla corrosione. Certi metalli assumono un comportamento, detto passivazione, nel quale si ha la formazione di alcuni prodotti di corrosione non solubili, in genere ossidi, che aderendo intimamente alla superficie del metallo ostacolano il processo di corrosione che si sviluppa quindi molto più lentamente. Due sono i meccanismi fondamentali secondo i quali si esplica la corrosione dei metalli:

- corrosione chimica
- corrosione elettrochimica.

4.8.1.1 Corrosione chimica

La corrosione chimica consiste in una reazione tra un metallo e un liquido o tra un metallo e un gas, come ad esempio il ferro che reagisce a certe temperature con l'ossigeno presente nell'atmosfera producendo i suoi ossidi (fig. 16). In questo caso il metallo cede elettroni all'ossigeno con formazione di ioni metallo carichi positivamente e ioni ossigeno carichi negativamente che si legano determinando la formazione di uno strato, più o meno aderente alla superficie, di prodotti della corrosione. Il processo non è generalmente accompagnato da passaggio di corrente elettrica.

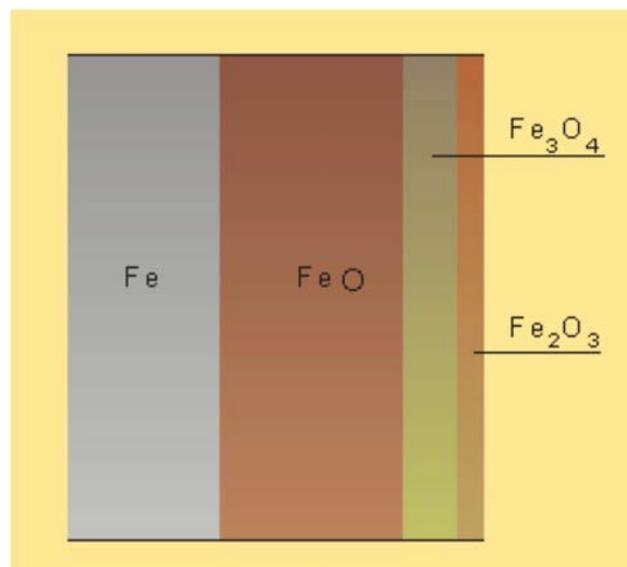


Fig. 16 – La corrosione di tipo chimico avviene a causa della reazione tra un metallo e un liquido o tra un metallo e un gas

4.8.1.2 Corrosione elettrochimica

La corrosione elettrochimica può avvenire, quando i metalli sono immersi in un elettrolita, a temperatura prossima a quella ordinaria attraverso due reazioni principali, una all'anodo e una al catodo (fig. 17):

- Le reazioni anodiche sono reazioni di ossidazione che tendono a distruggere il metallo dell'anodo che si discioglie sotto forma di ioni oppure ritorna allo stato combinato di ossido.
- Le reazioni catodiche sono invece sempre reazioni di riduzione di alcuni ioni con corrispondente consumo degli elettroni prodotti dalla reazione anodica e transitati attraverso il metallo.

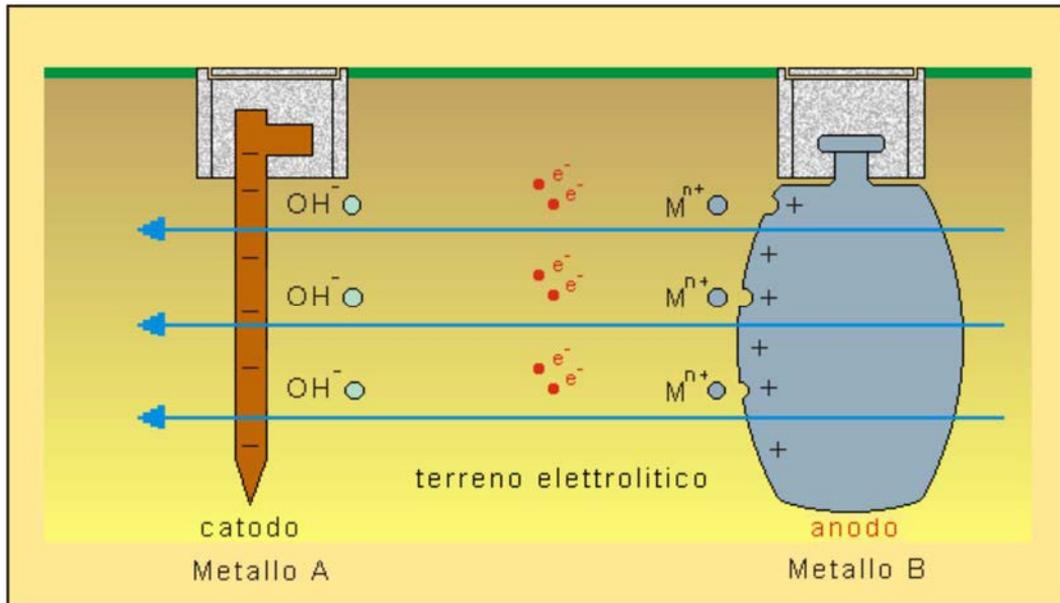


Fig. 17 - Corrosione elettrochimica

Il processo corrosivo di metalli interrati in terreno elettrolitico può sostanzialmente avvenire per i seguenti motivi:

- metalli diversi a contatto fra loro;
- metalli diversi collegati elettricamente fra loro;
- metalli diversi in presenza di correnti continue;
- metallo ricoperto da strati di terreno non omogeneo diversamente permeabili ai gas.

Corrosione di contatto.

Affinché il processo corrosivo accada è necessario che i due metalli siano diversi e che siano in contatto fra di loro. Alla presenza di un suolo elettrolitico, se i due metalli hanno potenziali diversi (tab.5), si crea fra loro una differenza di potenziale (coppia galvanica).

<i>Metallo</i>	<i>Potenziale elettrochimico (V)</i>
Litio	-3,02
Sodio	-2,72
Magnesio	-1,80
Alluminio	-1,45
Manganese	-1,10
Zinco	-0,77
Cromo	-0,56
Ferro	-0,43
Cadmio	-0,42
Nichel	-0,20
Stagno	-0,14
Piombo	-0,13
Idrogeno	0,0
Antimonio	+0,2
Rame +0,35	+0,35
Argento	+0,80
Mercurio	+0,86
Platino	+0,87
Oro	+1,5

Tab. 5 – Scala galvanica dei metalli d’interesse elettrotecnico riferita all’elettrodo d’idrogeno

Gli elettroni si spostano dal metallo a potenziale minore verso quello a potenziale maggiore. In presenza di un ossidante, ad esempio ossigeno contenuto in terreno umido, questo verrà ridotto, anche sulla superficie del metallo a potenziale maggiore, sempre a spese degli elettroni del metallo a potenziale minore. Quanto più è negativo il potenziale del metallo, tanto più facile risulta la sua ossidazione. In figura 18 un collare di rame (catodo), più propenso a ridursi rispetto al ferro, in intimo contatto con un tubo di ferro (anodo), riceve gli elettroni che migrano verso di lui provenienti dal ferro. L’ossigeno che viene ridotto nei pressi del contatto si riduce tutto a spese degli elettroni dell’anodo di ferro mentre il rame funge da catodo inerte provocando l’accelerazione del processo di ossidazione localizzato nei pressi della zona di contatto fra i due metalli. Il rame non partecipa attivamente ad alcun processo, non si ossida e non si riduce, in questo caso l’ossidante è solamente l’ossigeno. Il risultato di tale processo è una circolazione di corrente tra anodo e catodo e una corrosione in prossimità della giunzione tra collare e tubo.

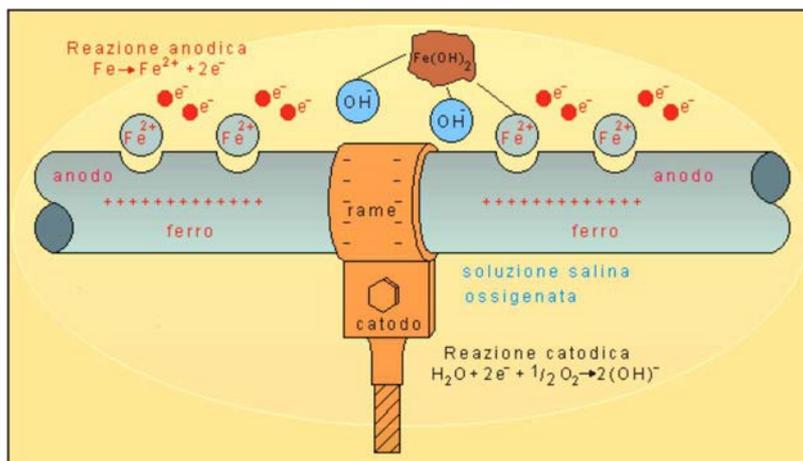


Fig. 18 – Corrosione fra metalli diversi a contatto immersi in soluzione elettrolitica

Corrosione fra metalli diversi collegati elettricamente.

Due metalli diversi interrati in suolo elettrolitico costituiscono una pila la cui forza elettromotrice è pari alla differenza di potenziale elettrochimico degli stessi metalli. Se per qualche motivo i due metalli sono messi fra di loro in collegamento elettrico si avrà circolazione di corrente attraverso l'anodo che si ossida cedendo elettroni e il catodo che si riduce acquistando ioni positivi. La corrosione avverrà tanto più velocemente quanto i metalli saranno distanti nella scala dei potenziali elettrochimici di tab. 5. Il fenomeno dipende infatti dal valore della corrente presente nel circuito che a sua volta è legata in modo direttamente proporzionale alla differenza di potenziale dovuta alla loro distanza nella scala dei potenziali elettrochimici. Nel fenomeno corrosivo riveste un ruolo di notevole importanza anche il rapporto tra le aree delle superfici metalliche degli elettrodi in contatto con l'elettrolita. La corrosione anodica risulterà tanto più celere e invasiva quanto maggiore è la superficie del catodo rispetto a quella dell'anodo. Un metallo che nella scala elettrochimica è molto positivo e di grande superficie non può essere accoppiato, a meno di non subire un'estesa corrosione, con un metallo a potenziale inferiore e di piccola superficie (ad esempio rivetto di ferro su lastra di rame). È invece possibile il contrario, piccole superfici catodiche accoppiate con grandi superfici anodiche non manifestano abitualmente dal punto di vista della corrosione situazioni particolarmente allarmanti (ad esempio rivetto di rame su lastra di ferro). In fig. 19 un serbatoio in acciaio è collegato in equipotenzialità mediante corda di rame direttamente accoppiata con corda di acciaio. Si possono creare delle pile che favorendo la circolazione di correnti galvaniche nel terreno rendono particolarmente vulnerabili alla corrosione metalli come l'acciaio.

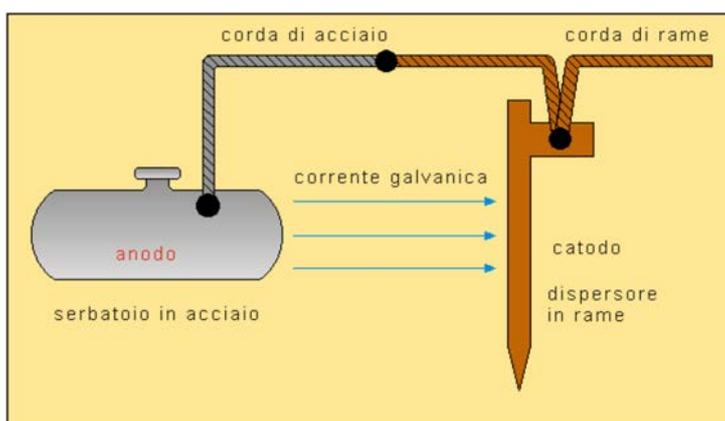


Fig. 19 – I collegamenti equipotenziali possono essere causa di corrosione

Corrosione fra metalli diversi per presenza di correnti continue.

può essere causata dalla presenza in terreno elettrolitico di correnti continue vaganti (il fenomeno si manifesta solo in presenza di correnti continue perché con le comuni correnti alternate a 50 Hz l'anodo e il catodo si alternano cinquanta volte al secondo non permettendo lo spostamento degli ioni metallici) con gli elettrodi che possono essere distanti fra di loro anche di alcuni metri. Le correnti vaganti nel terreno normalmente sono generate da impianti alimentati in corrente continua come impianti di trazione o impianti di protezione catodica. Il fenomeno risulta particolarmente evidente nei pressi delle stazioni di conversione dove tali correnti possono interessare nel loro percorso metalli con diverso potenziale elettrochimico. In figura 20 una grande struttura metallica in ferro interrata a pochi metri da un dispersore di rame può essere corrosa perché le correnti vaganti favoriscono il trasporto di ioni metallici dall'anodo (struttura in ferro) verso il catodo (dispersore in rame).

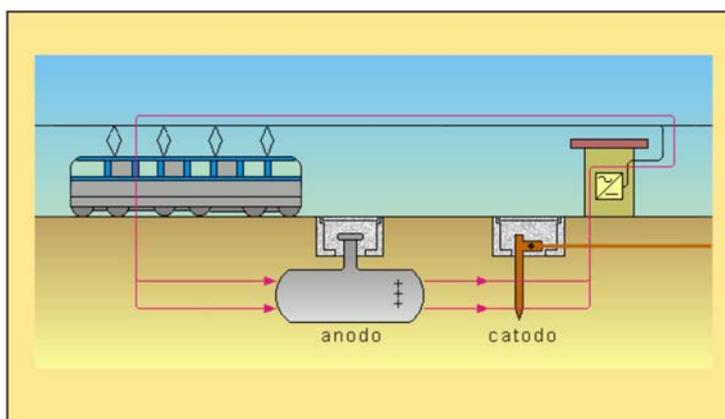


Fig. 20 – Corrosione causata da presenza di correnti continue vaganti

4.8.2 Materiali e accorgimenti per limitare i rischi di corrosione

In fase di progettazione i rischi di corrosione possono essere agevolmente fronteggiati, dopo un attento esame delle condizioni di installazione e posa, scegliendo materiali adatti. Si deve evitare, quando possibile, l'unione di materiali dissimili per evitare che si generino coppie galvaniche con conseguente circolazione di corrente. Quando fosse comunque necessario collegare fra di loro metalli molto distanti nella scala dei potenziali elettrochimici, come ad esempio rame e ferro, devono essere impiegati morsetti dichiarati adatti dal costruttore (fig. 22). Oltre a questo, o se necessario in alternativa, possono essere approntate delle barriere fisiche, mediante nastature con materiali autovulcanizzanti, vernici, resine o catrame, tali da rendere la giunzione impermeabile all'acqua e all'aria.

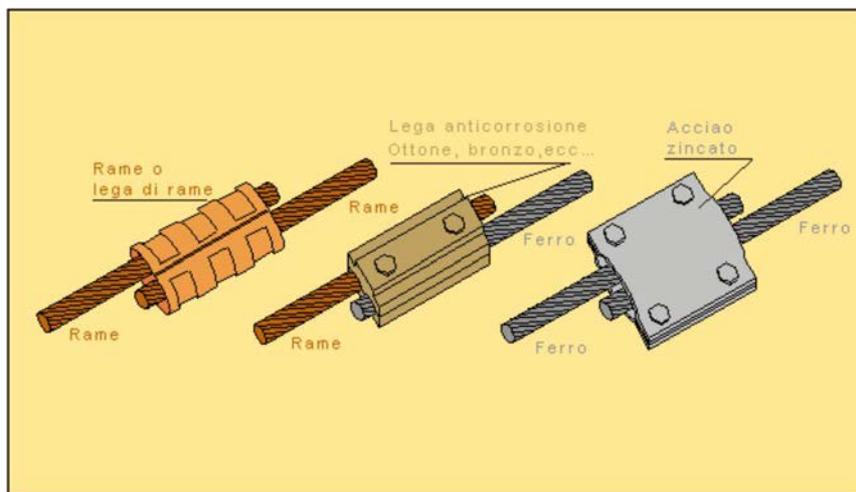


Fig. 22 – Nelle giunzioni fra metalli devono essere impiegati morsetti dichiarati adatti dal costruttore

A tal proposito occorre sottolineare come il pericolo di corrosione sia tanto più elevato quanto maggiore è la superficie del catodo che si riduce rispetto a quella dell'anodo che si ossida corrodendosi (rapporti fra catodo e anodo superiori a 100). Particolarmente vulnerabili possono rivelarsi quelle strutture metalliche che vengono protette contro la corrosione mediante trattamenti superficiali. Può infatti accadere, per piccoli difetti nel trattamento, che piccole porzioni restino scoperte. Se un dispersore in rame che funge da catodo è collegato con una struttura metallica in acciaio e presenta una superficie notevolmente superiore rispetto alle piccole superfici scoperte della struttura stessa, si ha un attacco particolarmente aggressivo sulle piccole superfici non protette che si comportano come anodo. Questo si spiega perché il fenomeno corrosivo è tanto più rapido quanto maggiore è la densità di corrente che fluisce attraverso l'anodo. In grandi superfici senza rivestimento la densità è bassa e la corrosione lenta, in piccole superfici la densità è grande e la corrosione molto intensa. A distanze di pochi metri da strutture metalliche interrate è quindi buona norma non installare impianti di terra costruiti utilizzando metalli nobili come il rame per evitare di incorrere nei fenomeni di corrosione appena descritti. Nei terreni particolarmente acidi è bene evitare l'uso di acciaio zincato e preferire il rame mentre nei terreni salmastri ricchi di cloruri è bene evitare l'uso di acciaio inossidabile. L'uso del rame va evitato in presenza di composti ammoniacali che si trovano in genere nei pressi di scarichi di fognatura o di deiezioni di origine animale (può essere utilizzato rame stagnato o ricoperto di piombo o acciaio zincato a caldo). L'alluminio subisce il processo di passivazione perché è attaccato dalla corrosione solo in superficie e tende a ricoprirsi di un sottile strato di ossido che lo protegge da ulteriore corrosione. L'ossido però è anche isolante e porta a sconsigliare l'uso di tale metallo per la costruzione del dispersore. L'acciaio dolce utilizzato per i ferri d'armatura immerso nel calcestruzzo si nobilita assumendo caratteristiche che raggiungono valori di potenziale simili a quelli del rame che nel calcestruzzo mantiene invece inalterate le sue caratteristiche risultando per questo compatibile con l'acciaio (in alcuni casi per motivi economici si utilizzano corde in acciaio ramato). Particolare cura è invece necessario porre al collegamento dei ferri d'armatura con corde di ferro zincato perché si potrebbe formare una coppia galvanica nella quale il ferro funge da catodo e lo zinco della corda da anodo. Si può evitare la corrosione della corda zincata proteggendo la superficie della giunzione con catrame o resine e nastrandolo con cura la corda fino al collegamento col dispersore (fig. 23).



Fig. 23 – Esempi di corretto collegamento del dispersore ai ferri di armatura

Una giunzione molto comune negli impianti di terra è quella fra acciaio zincato e rame. Per evitare la corrosione fra zinco e rame si può utilizzare per la giunzione un metallo con potenziale elettrochimico intermedio come il bronzo o l'ottone oppure utilizzare capocorda stagnati o cadmiati (fig. 24). In ogni caso, per quanto concerne resistenza meccanica e protezione contro la corrosione, devono essere rispettate le dimensioni minime prescritte dalla norma CEI 11-1 e 64-8.

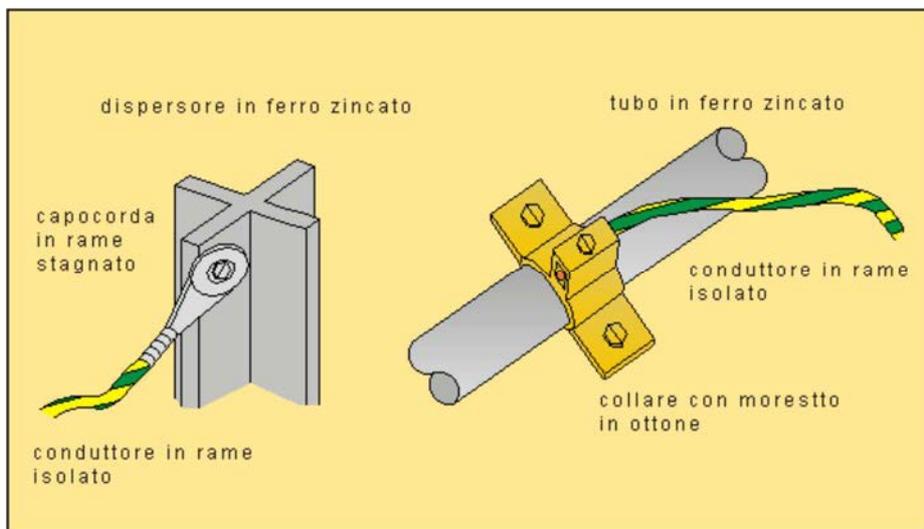


Fig. 24 – Per evitare la corrosione dovuta a giunzioni fra rame e zinco si possono utilizzare capocorda in rame stagnati o morsetti in ottone

4.9 Misura della resistenza di terra

4.9.1 Generalità

I rilievi strumentali da effettuare sugli impianti di terra hanno lo scopo, vista l'importanza che riveste l'impianto dal punto di vista della sicurezza, di accertarne l'effettiva rispondenza alle specifiche di progetto. Accertare l'efficienza di un impianto di terra significa controllare il buono stato dei materiali ed operare le seguenti misure e verifiche:

- misura della resistività del terreno;
- misura della resistenza di terra;
- misura delle tensioni di passo e di contatto;
- verifica dell'equipotenzialità delle masse;
- verifica della pericolosità di eventuali potenziali trasferiti.

La misura della resistività del terreno è preliminare alla stesura del progetto perché, nonostante i risultati della misura siano piuttosto aleatori e variabili, ci permette di calcolare in prima approssimazione il valore che dovrebbe assumere la resistenza del nostro impianto di terra. Ad impianto ultimato, possibilmente nelle normali condizioni di esercizio, si effettua la misura della resistenza di terra il cui valore non si deve discostare troppo da quello calcolato in fase di progetto. Ad impianto funzionante saranno effettuate misurazioni a scadenze periodiche per verificare il mantenimento nel tempo delle caratteristiche originali dell'impianto. Con il presente articolo, trascurando momentaneamente sia la misura delle tensioni di passo e di contatto sia la verifica delle equipotenzialità delle masse e della presenza di potenziali trasferiti, s'intendono approfondire le tecniche di misurazione della resistenza di terra evidenziandone limiti e difficoltà di esecuzione.

4.9.2 La resistenza di terra e i potenziali del terreno

Il terreno funge da conduttore elettrico ogni qualvolta tra due punti viene applicata, attraverso degli elettrodi (dispersori), una differenza di potenziale. La resistenza di terra è quella che esiste tra il dispersore infisso nel terreno ed un punto preso sufficientemente lontano a potenziale indisturbato (potenziale nullo). Il valore di questa resistenza, che coincide praticamente con la resistenza di una certa porzione di terreno che circonda il dispersore (la resistenza di contatto del dispersore col terreno è praticamente trascurabile), può essere rilevato con opportune misure. Con una semplice misura voltamperometrica possiamo esaminare come varia il potenziale del terreno fra i due dispersori E-A in funzione della distanza (fig. 25).

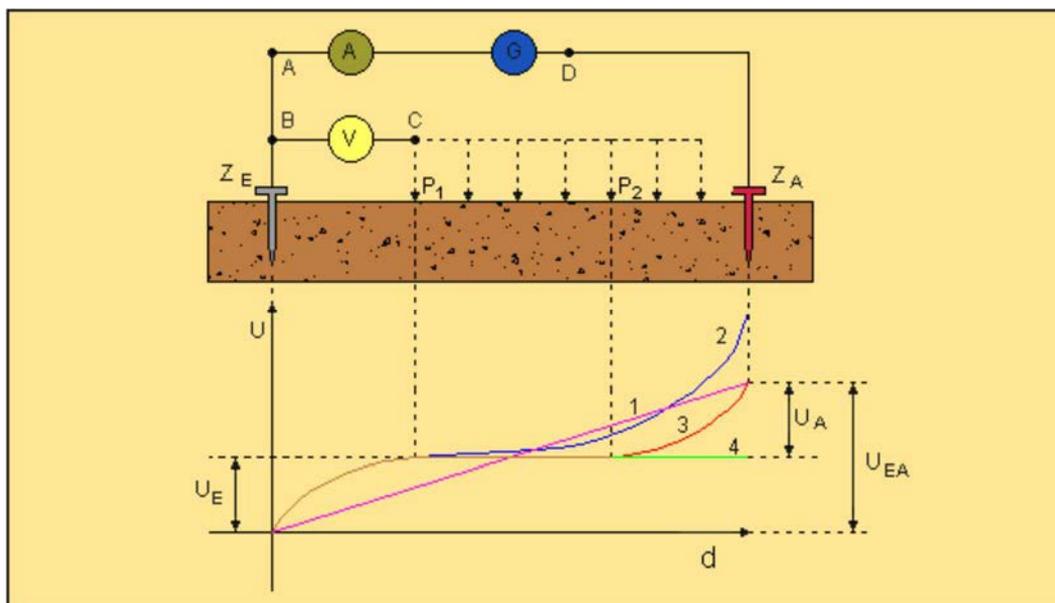


Fig. 25 – Andamento del potenziale nel terreno tra due dispersori collegati allo stesso generatore

1. Se il collegamento fosse ottenuto, anziché attraverso il terreno, con un conduttore a sezione costante
2. In presenza di impedenza (quando la resistenza del dispersore in misura è molto bassa) non trascurabile sull'anello costituito dal circuito di prova
3. Lungo la retta che unisce i due dispersori
4. Lungo la retta, in direzione opposta alla precedente, che esce dal dispersore in misura

Spostando l'elettrodo di tensione dal dispersore E verso il dispersore A, lungo la retta che congiunge i due dispersori, le indicazioni fornite dal voltmetro tendono a crescere in modo non lineare fino a raggiungere il punto P1 (curva n. 3). Tra il punto P1 e il punto P2, la tensione si mantiene costante per riprendere a crescere da P2 verso A sino a quando l'elettrodo di tensione si congiunge col dispersore ausiliario A. Il tratto P1-P2 si può considerare a potenziale nullo o meglio, la resistenza del terreno assume tra P1-P2 valore zero rispetto ai punti E-A. Se l'elettrodo del voltmetro viene spostato lungo la retta che si sviluppa in direzione opposta alla precedente la tensione tende ad aumentare fino a raggiungere un valore asintotico costante rappresentato in figura dalla curva n. 4. Qualora la resistenza di terra del dispersore fosse molto bassa potrebbe non essere più trascurabile la componente induttiva. Si deve allora considerare l'impedenza determinata dall'anello costituito dal circuito percorso dalla corrente di prova e la curva assume la forma n. 2. Abitualmente si parla di resistenza di terra piuttosto che di impedenza di terra perché si considera, come normalmente accade, prevalente l'effetto resistivo rispetto a quello induttivo. La semplificazione risulta accettabile nel caso di impianti di piccole dimensioni (resistenze di terra maggiori di 1ohm), mentre potrebbe non esserlo per gli impianti molto estesi quando presentano valori di resistenza minori di 0,1 ohm.

4.9.2.1 Misura della resistività del terreno

La conoscenza della resistività del terreno risulta fondamentale per una corretta progettazione dell'impianto di terra e influenza in modo determinante il valore complessivo della resistenza che si potrà ottenere. Uno dei metodi di misura più comune è il metodo del Wenner (fig. 26). Il metodo è rigorosamente valido solamente per elettrodi sferici di piccole dimensioni interrati e con connessioni isolate. Ciononostante, se la parte di elettrodo infissa nel terreno a è minima rispetto alla distanza d fra gli elettrodi, i dispersori possono essere assimilati a emisfere e il metodo fornisce risultati sufficientemente attendibili. Si infiggono nel terreno quattro sonde, allineate e ad ugual distanza (d) le une dalle altre, ad una stessa profondità, trascurabile rispetto alla distanza d. Due picchetti, collegati ad un generatore di corrente alternata, sono detti amperometrici, mentre gli altri due, detti voltmetrici sono collegati ad un voltmetro.

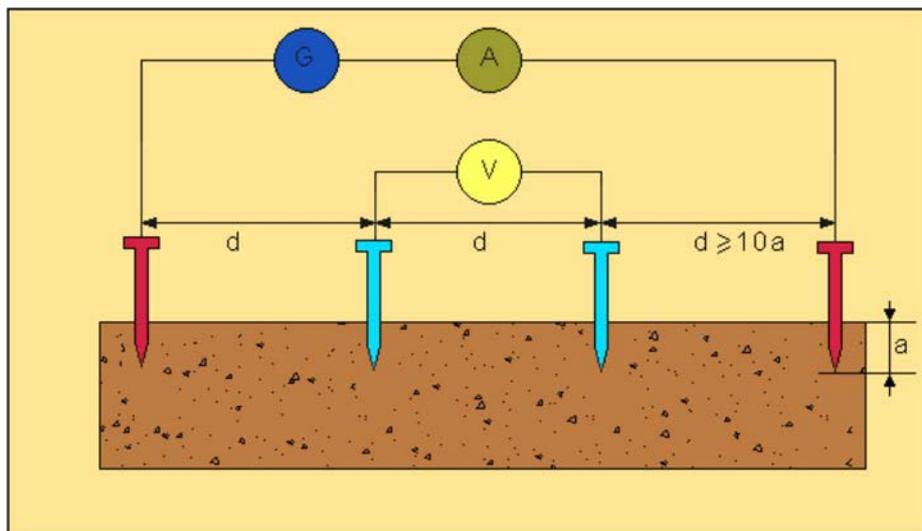


Fig. 26 – Circuito di misura della resistività del terreno col metodo dei quattro punti.

La resistività del terreno può essere ricavata dalla semplice relazione:

$$\rho = 2\pi d \frac{U}{I}$$

dove U è la tensione misurata col voltmetro (ad alta resistenza interna) tra la coppia di elettrodi intermedi, I la corrente di prova iniettata nel terreno attraverso la coppia di elettrodi estremi e d la distanza tra gli elettrodi (per evitare rischi di sovrapposizione di correnti vaganti può essere utile impiegare un'alimentazione a frequenza leggermente diversa da quella di rete).

Poiché normalmente il terreno non è omogeneo la resistività del terreno non risulta uniforme. La resistività varia al variare della distanza fra le sonde e può essere utile effettuare una serie di misure variando la distanza d e mantenendo costante la profondità di infissione a . La distanza fra i picchetti viene proporzionalmente aumentata allargandosi verso l'esterno rispetto ad un punto centrale preso come riferimento. La serie di risultati forniti dalle misure permette di ottenere dati relativi a profondità diverse di terreno aumentando, all'aumentare della distanza fra gli elettrodi aumenta, infatti, anche la penetrazione della corrente nel suolo. La resistività del terreno è data dalla media aritmetica dei valori misurati.

4.9.3 Misura della resistenza di terra

I sistemi di misura della resistenza di terra sono numerosi e le tecniche sono ormai consolidate e in uso da molto tempo. Il metodo più diffuso e consigliato dalle norme CEI è il metodo della caduta di tensione o voltamperometrico (fig. 27).

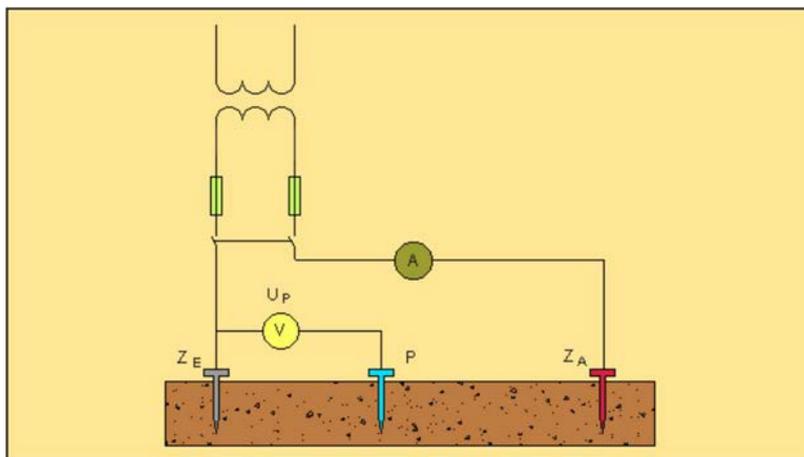


Fig. 27– Misura della resistenza di terra con metodo voltamperometrico

Il metodo prevede di iniettare una corrente alternata (la corrente continua non viene utilizzata perché essendo il terreno un conduttore di natura elettrolitica le misure potrebbero essere viziate da forze elettromotrici di tipo elettrolitico o da correnti continue vaganti) attraverso i dispersori in misura e di permetterne la richiusura attraverso un dispersore ausiliario. La correttezza della misura dipende dalla posizione che assumono il dispersore ausiliario e l'elettrodo di tensione fra di loro e rispetto al dispersore in misura. Il dispersore ausiliario deve essere posto in un punto del terreno sufficientemente lontano rispetto a quello in prova in modo che la misura non sia viziosa dall'influenza reciproca. Si può ritenere con buona approssimazione che ad una distanza di circa cinque volte la lunghezza del dispersore o cinque volte la diagonale se si considera una rete di dispersori cessi la zona di influenza fra i dispersori. L'andamento che assume la curva relativa ai potenziali del terreno in queste condizioni è quella di fig. 28. Tale andamento è giustificato dal fatto che la sezione del "conduttore terreno" che è attraversato dalla corrente di prova non è costante in tutti i suoi punti. La sonda di tensione deve essere conficcata in un punto dove la resistenza può essere considerata trascurabile e il potenziale uguale a zero (zona B1-B2 della curva di fig. 28).

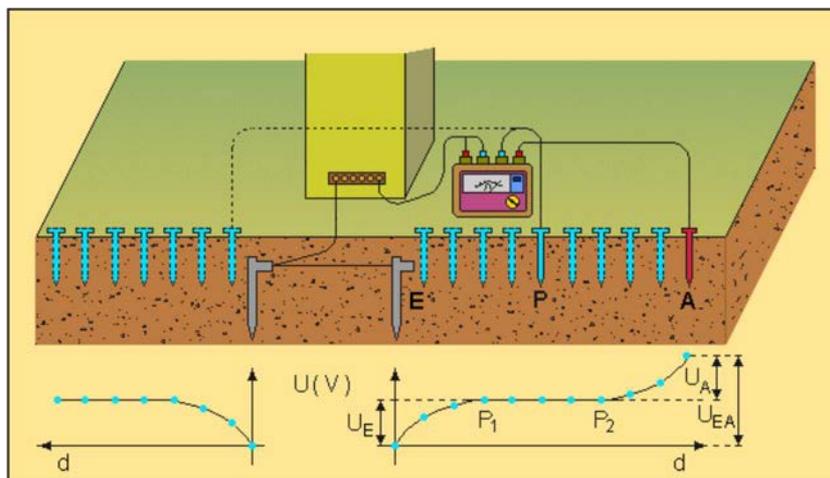


Fig. 28 – Variazione del potenziale del potenziale nel terreno tra due dispersori

Lo schema di collegamento rappresentato in fig. 27 presuppone un'alimentazione dalla rete tramite un trasformatore di sicurezza e l'impiego di un voltmetro e di un amperometro. Innanzitutto, prima di far circolare corrente nel circuito di misura, occorre verificare che il voltmetro non indichi alcuna tensione dovuta a correnti di dispersione estranee al circuito di prova la cui origine, se ne fosse rilevata la presenza, dovrà essere individuata ed eliminata. Si alimenta quindi con un generatore facendo circolare una corrente nel circuito di prova tra il dispersore in misura e il dispersore ausiliario. Se si indica con I la corrente che circola nel circuito e con U_E la tensione indicata dal voltmetro, applicando la legge di ohm si può calcolare la resistenza di terra R_E :

$$R_E = \frac{U_E}{I}$$

La misura può essere considerata attendibile e tale rapporto rappresenta l'effettiva resistenza di terra solo se la sonda di tensione è infissa nella zona di non influenza del dispersore in misura e del dispersore ausiliario di corrente. Per verificarne l'esatta posizione, disposta la sonda di corrente alla maggior distanza possibile dal dispersore in prova, si sposta di alcuni metri la sonda di tensione da e verso il dispersore in prova finché le letture del voltmetro, non subendo più variazioni significative, possono essere considerate attendibili. La misurazione della resistenza di terra è relativamente semplice, ma può comportare difficoltà operative e indurre a incertezze e a errori anche rilevanti. Dal punto di vista operativo si riscontrano difficoltà nell'individuare aree a distanza utile, spesso private e diverse da quelle di proprietà, ove installare il dispersore ausiliario o far transitare le interconnessioni tra i dispersori e nel realizzare un dispersore ausiliario di resistenza adeguata che permetta la circolazione della corrente di prova quando si alimenta in bassa tensione. Per motivi di sicurezza occorre inoltre presidiare e rendere inaccessibile il dispersore ausiliario dove potrebbero stabilirsi tensioni di contatto elevate e pericolose per le persone (fig. 29).

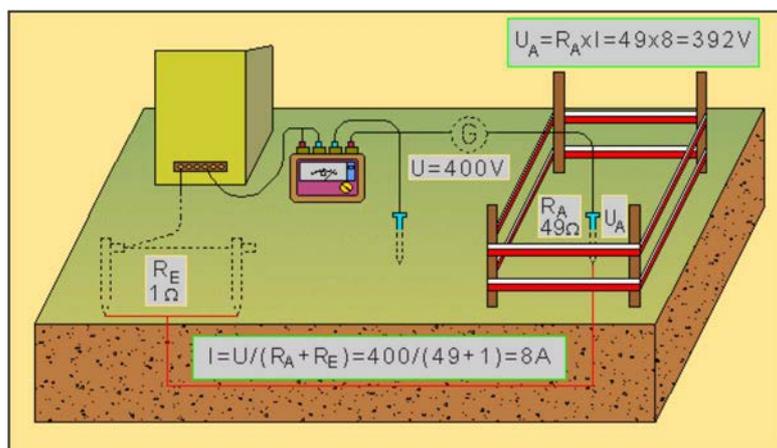


Fig. 29 – Inaccessibilità dell'area del dispersore ausiliario per evitare contatti con tensioni pericolose. Ipotizzando una R_E di 1 ohm, una R_A di 49 ohm e di applicare al circuito di prova una tensione U di 400V sul dispersore ausiliario si stabilisce una tensione pericolosa U_A di 392V

Le difficoltà suesposte e soprattutto la mancanza di spazi adeguati alla realizzazione dei dispersori ausiliari può portare ad eseguire misure non corrette:

- I dispersori sono troppo vicini, le reciproche influenze fanno assumere al dispersore in misura un potenziale che dipende solo da una parte della resistenza di terra (fig.30);

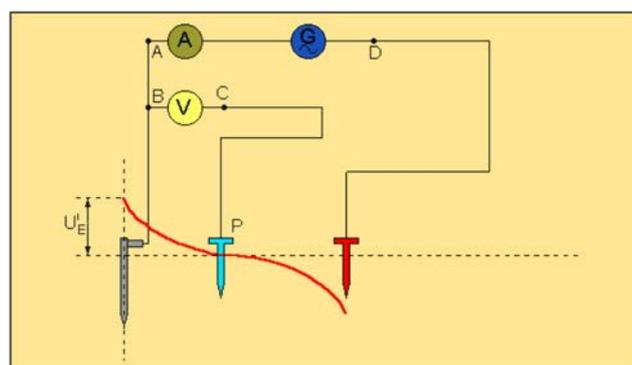


Fig. 30 – Il dispersore ausiliario è posizionato troppo vicino a quello in prova. La tensione misurata è solo una parte della tensione totale di terra U_E ($U_P \neq U_E$).

- La sonda voltmetrica è posizionata troppo vicina al dispersore in prova in un punto a potenziale maggiore di zero e il voltmetro misura solo una parte della tensione totale di terra U_E (fig. 31);

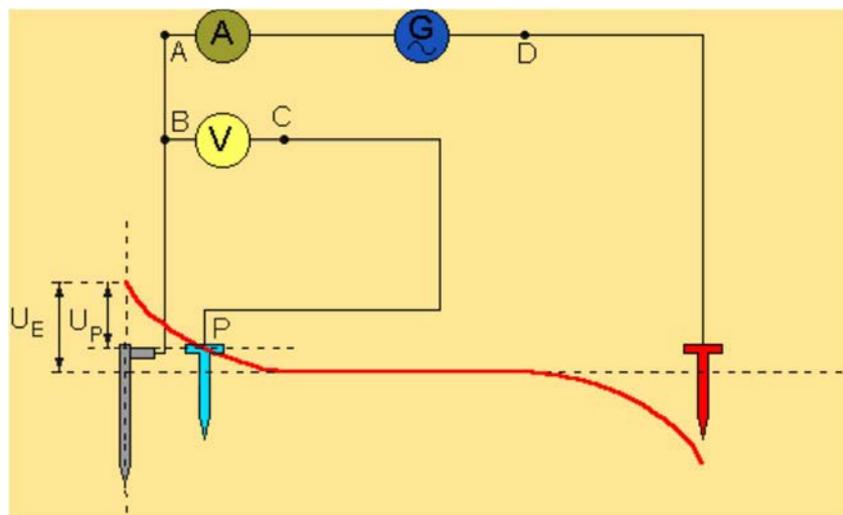


Fig. 31 – La sonda di tensione è infissa in un punto del terreno troppo vicino al dispersore in misura. Il voltmetro misura solo una parte della tensione totale di terra U_E . La misura fornisce un valore errato per difetto ($U_P < U_E$).

- La sonda di tensione è troppo vicina al dispersore ausiliario il voltmetro misura una tensione superiore alla tensione totale di terra U_E (fig.32).

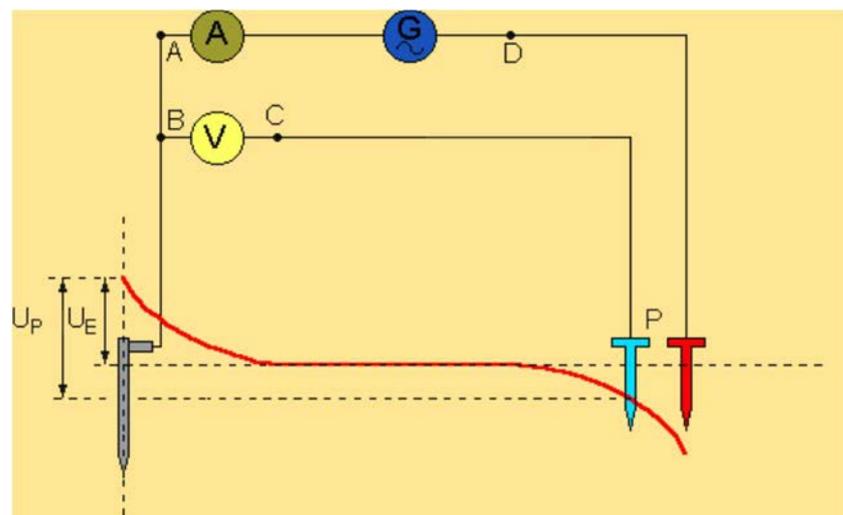


Fig. 32 – La sonda di tensione è infissa in un punto del terreno troppo vicino al dispersore ausiliario. Il voltmetro misura una tensione superiore alla tensione totale di terra U_E . La misura fornisce un valore errato per eccesso ($U_P > U_E$).

Solo se i dispersori sono posizionati al di fuori delle reciproche influenze (fig. 33) la misura può ritenersi affidabile.

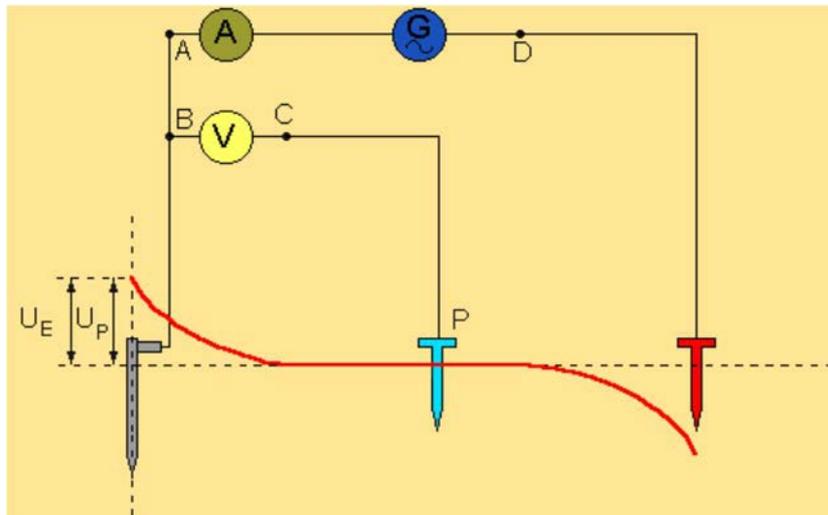


Fig. 33 – Il dispersore in misura e il dispersore ausiliario sono sufficientemente lontani e la sonda di tensione è posizionata correttamente in un punto a potenziale zero.

Il voltmetro misura la tensione totale di terra U_E e la misura può ritenersi corretta ($U_P=U_E$).

Nei casi dubbi è possibile, invertendo il collegamento voltmetrico (in fig. 34 invertendo il collegamento B – A con B - D), misurare la resistenza del dispersore ausiliario per confrontare il valore misurato con quello teorico calcolato. Se la misura non è molto diversa dal valore di resistenza calcolato che ci si aspettava la misura può ritenersi corretta.

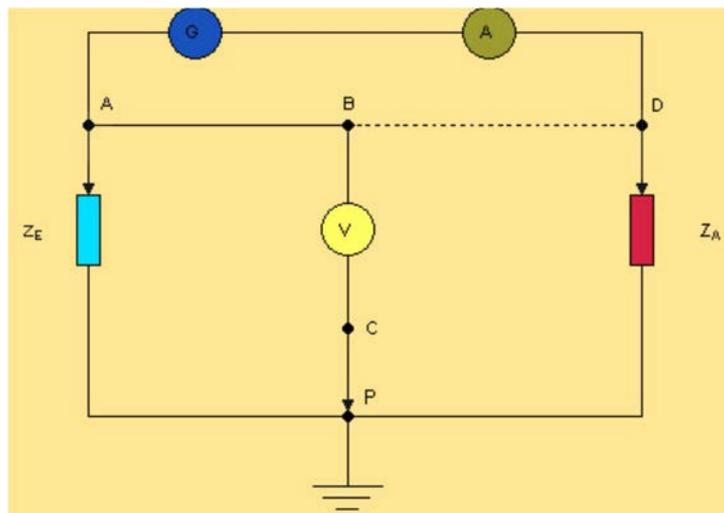


Fig. 34 – Circuito equivalente di misura della resistenza di terra col metodo voltamperometrico

La misura può essere effettuata anche con strumenti portatili, a tre o quattro morsetti dotati di generatore interno, che forniscono direttamente i valori della resistenza di terra. Lo schema di collegamento può essere quello di figura 35 o di figura 36. Nel primo caso lo strumento rileva anche la caduta di tensione sul conduttore che collega il dispersore in misura. Di questo bisogna tener conto quando la resistenza del dispersore è dello stesso ordine di grandezza di quella del conduttore di collegamento. Nel secondo caso la resistenza dei conduttori non influisce sul valore misurato della resistenza di terra essendo il circuito voltmetrico indipendente da quello amperometrico.

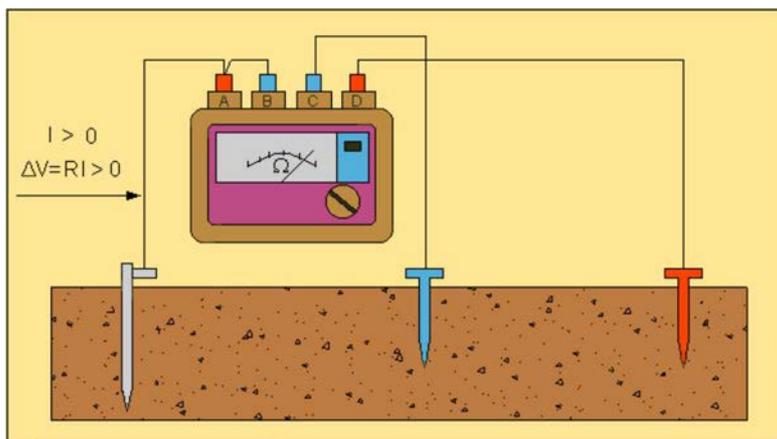


Fig. 35 - Se la resistenza di terra e la resistenza del conduttore di collegamento al dispersore in prova hanno lo stesso ordine di grandezza la misura deve tener conto della caduta di tensione su tale conduttore di collegamento.

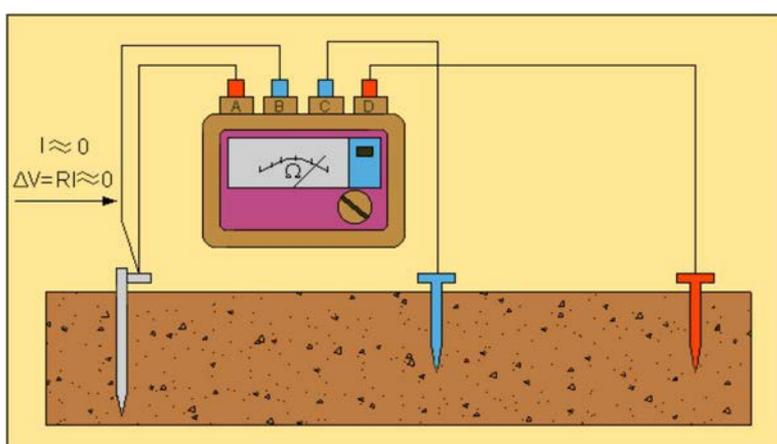


Fig. 36 – Se il circuito amperometrico e quello voltmetrico sono separati la misura della resistenza di terra non comprende la resistenza sui conduttori di collegamento.

In alcune situazioni di difficile operatività e quando è necessario effettuare rilievi preliminari della resistenza di terra (il metodo può rivelarsi affetto da considerevoli errori anche se a favore della sicurezza) si può optare per il metodo dei due punti. Se nei pressi del dispersore in prova è possibile usufruire di un dispersore ausiliario a resistenza trascurabile, facendo attraversare il circuito da una corrente alternata (fig. 3.37) è possibile applicando la legge di ohm determinare un valore di resistenza che è la somma delle resistenza dei due dispersori. La misura può essere considerata attendibile solo se la resistenza del dispersore ausiliario è trascurabile rispetto a quella del dispersore in prova; ad esempio un dispersore in prova poco esteso (uno o due picchetti) ed una tubazione idrica interrata ed estesa.

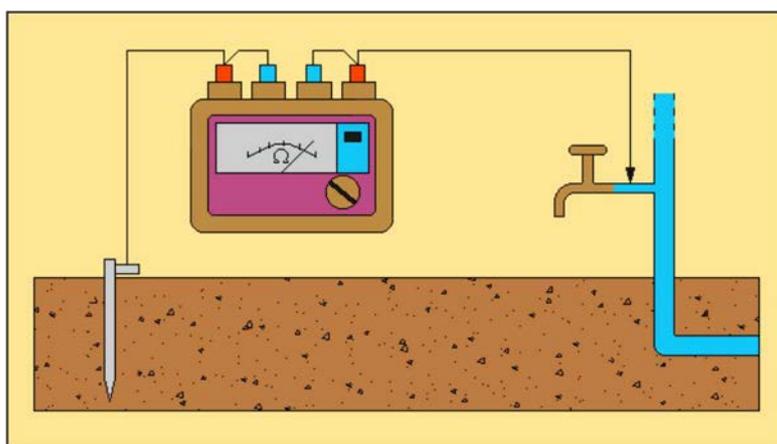


Fig. 37 – Misura della resistenza di terra col metodo del dispersore ausiliario a resistenza trascurabile (metodo dei due punti).

4.10 Contatti indiretti con e senza impianto di terra

In un impianto elettrico il collegamento a terra delle masse è una misura di protezione dai contatti indiretti; è detta anche protezione con interruzione automatica del circuito in quanto viene coordinata con interruttori automatici di massima corrente o differenziali, che aprono il circuito quando si crea una situazione di pericolo.

Gli impianti di terra provvisti di tale funzione sono detti **di protezione**, per distinguerli da:

- **Messa a terra di funzionamento**, avente lo scopo di stabilire un collegamento a terra di determinati punti di circuiti elettrici per esigenze di esercizio, come la messa a terra dei sistemi TT;
- **Messa a terra per lavori**, avente lo scopo di stabilire un collegamento temporaneo di una sezione d'impianto per esigenze di manutenzione o di ispezione, per esempio la messa a terra di un tratto di linea per lavori.

Frequentemente un impianto di terra ha la duplice funzione, di protezione e di funzionamento (sistemi TN). Per capire in che modo si realizza la protezione, si consideri (figura 38a) il caso di cedimento dell'isolamento principale di un'apparecchiatura senza messa a terra (componente di classe 0 e di classe I in un impianto senza terra di protezione).

Per ricavare lo schema elettrico equivalente (figura 38b) si può trascurare l'impedenza delle linee elettriche di collegamento, perché molto piccola rispetto agli altri parametri del sistema e ritenere nulla l'impedenza del guasto: la persona, di resistenza R_B , si viene così a trovare in serie alla sua resistenza verso terra (R_{EB}) e a quella di messa a terra del neutro (R_{EN}). Il circuito è alimentato dalla tensione di fase a vuoto E_0 del trasformatore in cabina.

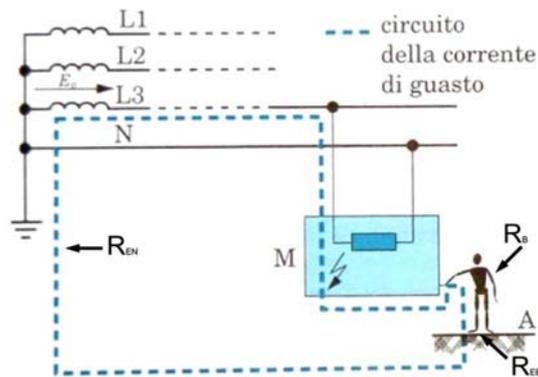
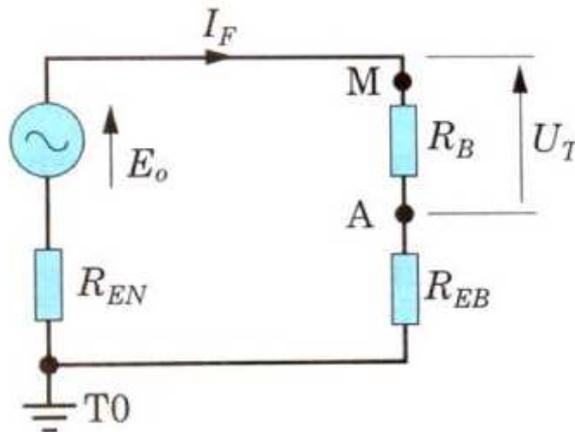


Fig. 38a) Contatto indiretto senza messa a terra



R_{EN} = Resistenza di messa a terra del neutro; R_B = Resistenza della persona; R_{EB} = Resistenza verso terra della persona

Fig. 38b) Schema elettrico equivalente

La corrente di guasto che si richiude attraverso il terreno e che interessa la persona è data da:

$$I_F = \frac{E_0}{R_B + R_{EB} + R_{EN}}$$

Il valore di R_{EN} è piuttosto piccolo, a volte minore di 1Ω e quindi trascurabile; il valore di R_{EB} varia a seconda del tipo di contatto (presenza di pavimento, tipo di calzature, tipo di terreno ecc.), mentre per R_B si è già detto essere pari a 1000Ω .

La situazione non è pericolosa se $I_F \leq 10 \text{ mA}$ e quindi, ponendo $E_0 = 220V$, si deve avere

$$I_F = \frac{220}{R_B + R_{EB} + R_{EN}} \leq 10 * 10^{-3}$$

da cui

$$R_B + R_{EB} + R_{EN} \geq 22k\Omega$$

che è una condizione difficilmente verificata, e pertanto, nella persona fluirà quasi certamente una corrente maggiore del limite di pericolosità convenzionale. In condizioni molto sfavorevoli si può ritenere $R_B + R_{EB} + R_{EN} \cong R_B$ e, considerando $R_B = 1k\Omega$, si ha:

$$I_B = I_F = \frac{E_0}{R_B} = \frac{220}{1000} = 0,220 \text{ A} = 220 \text{ mA}$$

avendo indicato con I_B la corrente nella persona.

Il valore precedente è in grado di produrre fibrillazione ventricolare, ma non è, purtroppo, atto a determinare l'apertura del dispositivo di massima corrente inserito nel circuito, pur sommandosi alla corrente di normale funzionamento.

Applicando la regola del partitore di tensione si ricava la tensione di contatto sulla persona:

$$U_T = E_0 \frac{R_B}{R_B + R_{EB} + R_{EN}}$$

tanto più prossima a E_0 ($220V$) quanto più il rapporto $\frac{R_B}{R_B + R_{EB} + R_{EN}}$ si avvicina all'unità.

La tensione di contatto a vuoto è evidentemente data, aprendo il lato $R_B + R_{EB}$, da:

$$U_{ST} = E_0 = 220 \text{ V}$$

nettamente superiore al valore della tensione di contatto limite convenzionale e comunque non sopportabile per più di 200 ms per cui, non intervenendo in tempo utile o non intervenendo affatto la protezione di massima corrente, la situazione risulta senz'altro di estrema pericolosità.

Quando invece il guasto si verifica in un impianto dotato di messa a terra (figura 39a), lo schema elettrico equivalente è quello della figura 39b, in cui tra la massa M e il punto T0 a potenziale zero vi è la resistenza R_E dell'impianto di terra dell'utente.

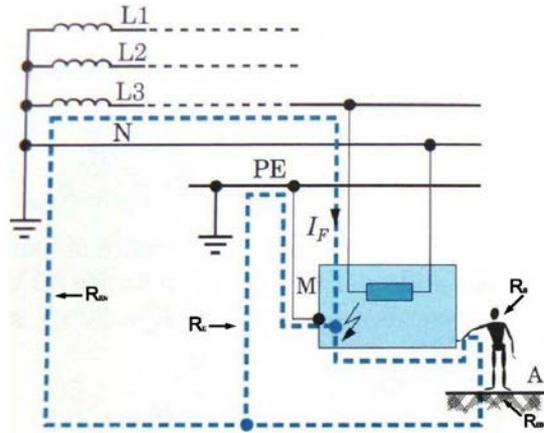
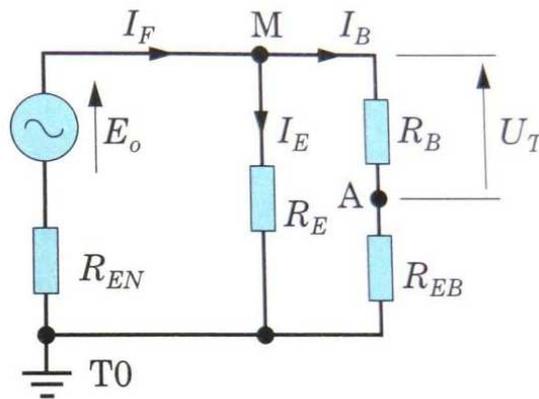


Fig 39a) Contatto indiretto con messa a terra



R_{EN} = Resistenza di messa a terra del neutro; R_E = Resistenza dell'impianto di terra dell'utente;
 R_B = Resistenza della persona; R_{EB} = Resistenza verso terra della persona;

Fig. 39b) Schema elettrico equivalente

La corrente di guasto I_F si ripartisce tra la resistenza R_E e la serie $R_B + R_{EB}$; applicando la regola del partitore di corrente si ha:

$$I_B = I_F \frac{R_E}{R_E + R_B + R_{EB}}$$

La messa a terra è efficace quando il valore della resistenza R_E è alquanto minore della serie $R_B + R_{EB}$ in modo da rendere sufficientemente piccolo il rapporto $\frac{R_E}{R_E + R_B + R_{EB}}$ e avere una corrente I_B di valore inferiore al limite di sicurezza.

La protezione dai contatti indiretti mediante l'impianto di terra si realizza proprio perché si pone in parallelo alla persona una resistenza di piccolo valore, attraverso la quale deve richiudersi la maggior parte della corrente.

Per determinare la tensione U_T si può sostituire alla parte di circuito a sinistra del ramo $R_B + R_{EB}$ il generatore equivalente di Thevenin, ottenendo:

$$V_{(0)} = V_{MT0} = E_{eq} = E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$$

$$R_{MT0} = R_{eq} = \frac{R_E R_{EN}}{R_E + R_{EN}}$$

ed il circuito equivalente diventa (figura 40):

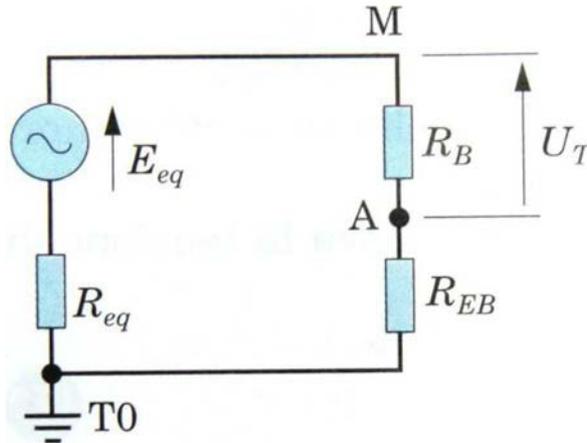


Fig. 40) Circuito equivalente di Thevenin

Il valore di R_{eq} , per la regola del parallelo, è minore del più piccolo tra i valori di R_E e R_{EN} , quindi è senz'altro trascurabile rispetto alla serie $R_B + R_{EB}$, cosicché la tensione U_T diventa (partitore di tensione):

$$U_T = E_{eq} \frac{R_B}{R_{eq} + R_B + R_{EB}} \cong E_{eq} \frac{R_B}{R_B + R_{EB}}$$

Confrontando la U_T appena trovata con quella calcolata in assenza dell'impianto di terra si vede che la sostanziale riduzione di U_T è dovuta al fatto che risulta:

$$E_{eq} < E_0$$

e dall'equazione di E_{eq} si deduce che tale riduzione è tanto più accentuata quanto minore è il rapporto $\frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$; non potendo fare molto affidamento sul valore R_{EN} , di competenza della società fornitrice, occorre che sia piccolo il valore R_E .

Dal circuito della figura 39b si può ricavare la tensione di contatto a vuoto con la regola del partitore di tensione e aprendo il lato $R_B + R_{EB}$; si ottiene:

$$U_{ST} = E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} = E_{eq} < E_0$$

mentre in assenza di messa a terra si aveva $E_{eq} = E_0$.

Considerando per U_{ST} il valore limite 50 V per gli ambienti ordinari della curva di sicurezza e ponendo $E_0 = 220 V$, si dovrà avere:

$$U_{ST} \leq 50 V; \quad E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} \leq 50 V; \quad \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} \leq \frac{50}{220} = 0,227$$

Da cui si ottiene:

$$R_E \leq 2,294 R_{EN}$$

che conferma ulteriormente la necessità di avere piccoli valori della resistenza di terra R_E per assicurare una protezione efficace. Se, per esempio, si ha $R_{EN} = 1\Omega$, dovrà essere $R_E \leq 0,3\Omega$ circa.

È da notare che, data la difficoltà pratica di realizzare impianti con basso valore di R_E , la sicurezza aumenta con elevati valori di R_{EN} , ma, come detto in precedenza, non si può contare molto su questo, in quanto la resistenza di terra del neutro subisce variazioni non note all'utente e inoltre elevati valori di R_{EN} contrastano con le esigenze della società elettro fornitrice.