



# LA SICUREZZA ELETTRICA IN **BASSA TENSIONE**

# Lezione n°2 2007-2008

Può essere definito sicuro ciò che è esente da pericoli. In altre parole, se si presuppone che una apparecchiatura elettrica possa essere pericolosa, sarà necessario, attraverso opportune contromisure, renderla sicura. Se si considera un insieme di  $N$  apparecchi funzionanti nelle medesime condizioni e si chiama  $g(t)$  l'insieme tra questi apparecchi che presentano un guasto dopo un certo tempo  $t$ , è possibile definire la grandezza  $P(t)$  come il pericolo che si verifichi questo guasto dopo un tempo  $t$ . Il pericolo che questo accada potrà essere espresso da un numero compreso tra 0 e 1 e rappresenta la probabilità che questo evento si verifichi in un tempo  $t$  prestabilito. La grandezza  $S(t)$  viene definita sicurezza rispetto al guasto.

## 1.1 Pericolo e sicurezza

Il pericolo può essere definito come la probabilità che si verifichi un evento sfavorevole da cui possa derivare grave danno. Se  $N$  è l'insieme di apparecchi funzionanti nelle medesime condizioni (tensione, temperatura, tempo, etc....) e  $g(t)$  l'insieme di apparecchi che dopo un tempo  $t$

## Principi di sicurezza

# Lezione n°2 2007-2008

presentano un certo guasto si ottiene:

$$P(t) = g(t) / N \quad S(t) = 1 - P(t)$$

## 1.2 Tasso di guasto

Parlando di sicurezza e rischio di guasto di apparecchiature elettriche, possiamo introdurre una grandezza che definisce la bontà di una apparecchiatura in termini di affidabilità: il tasso di guasto. Il tasso di guasto viene definito come il rapporto tra gli oggetti guasti dopo un tempo  $t$  e il numero di quelli che non hanno presentato il guasto. Se si suppone il tasso di guasto costante nel tempo si può arrivare all'espressione seguente.

$$n(t) = N - g(t) \quad S(t) = n(t) / N = e^{-\lambda t}$$

Dalla 1.1 si deduce che la sicurezza di un sistema o di una apparecchiatura decresce all'aumentare del tempo di esposizione al pericolo. La sicurezza tende a zero per un tempo  $t$  tendente all'infinito anche se  $\lambda$  ha un valore molto piccolo. Si dice che si ha "sicurezza zero" quando non si deve attendere un guasto per il verificarsi di una situazione sfavorevole per le persone ( $\lambda$  tendente a infinito).

Principi di sicurezza

# Lezione n°2 2007-2008

## 1.3 Definizione di rischio

Non sempre come conseguenza di un evento sfavorevole si ha un danno. Questo vuol dire che anche il danno ha una certa probabilità di verificarsi. Dall'espressione del rischio  $r(t)$  si può notare come esso dipenda dal prodotto  $kd$ . Ad un danno maggiore può quindi non corrispondere un rischio maggiore. Il prodotto  $kd$  viene chiamato "danno probabile". Se  $k$  è la probabilità che si verifichi il danno in conseguenza di un guasto e  $d$  l'entità del danno si ottiene:

$$r(t) = P(t) kd \quad (1.2)$$

## 1.4 Affidabilità della sicurezza di un sistema

La probabilità che un'apparecchiatura non presenti difetti o guasti durante un certo tempo prestabilito di funzionamento si dice *affidabilità*. Le parole affidabilità e sicurezza non vanno però confuse tra di loro in quanto non esprimono lo stesso concetto ; la prima si riferisce a tutti i guasti che possono pregiudicare il buon funzionamento dell'apparecchiatura, la seconda si riferisce solo a quelli che pregiudicano la sicurezza della stessa.

Principi di sicurezza

# Lezione n°2 2007-2008

Nella determinazione della sicurezza globale di un sistema si distinguono fondamentalmente due sistemi : sistemi "serie" e sistemi "parallelo". Nel primo caso il tasso di guasto complessivo è pari alla somma dei singoli tassi di guasto per cui la sicurezza risultante è minore della sicurezza del componente meno sicuro. Nel secondo caso la sicurezza aumenta con il numero di componenti ed è maggiore della sicurezza del componente più sicuro.

Principi di sicurezza

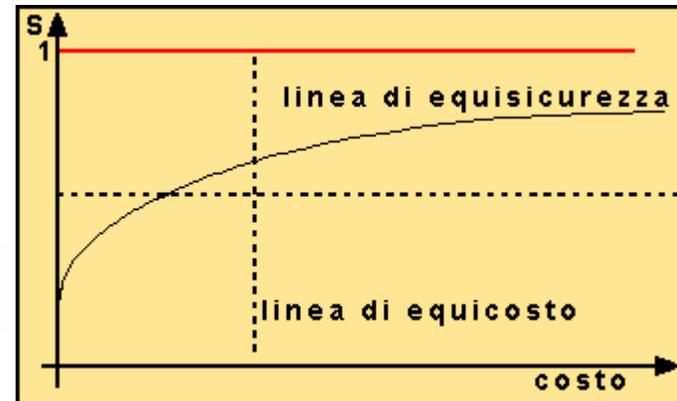


# Lezione n°2 2007-2008

Un danno può verificarsi per cause di natura sconosciuta o non prevedibili (cause di forza maggiore) oppure a causa di un rischio previsto e ritenuto accettabile o per il fallimento delle misure di protezione adottate (cause fortuite). Poiché non è tecnicamente ed economicamente possibile ridurre il rischio a zero occorre definire un "livello di sicurezza accettabile" (vedi figura *Curva sicurezza-costo*).

Il compromesso tra economia e sicurezza ci fornisce il livello di sicurezza accettabile, tenendo però presente tutti i parametri che determinano il buon funzionamento di un impianto o di una apparecchiatura. La curva sicurezza-costo di figura presenta un asintoto orizzontale per il valore di  $S = 1$  equivalente ad un costo infinito. Poiché tutte le misure che contribuiscono al miglioramento della sicurezza di un sistema comportano un costo è ovvio che si deve stabilire il massimo costo possibile e la minima sicurezza accettabile per poi poter adottare le necessarie misure di protezione.

## Livello di sicurezza accettabile



Normalmente si procede confrontando l'incremento di sicurezza per unità di costo e, dato un tipo di curva sicurezza-costo come quello di figura, quando l'incremento di sicurezza è irrilevante rispetto alle risorse investite si trova il punto voluto.

# Lezione n°2 2007-2008

Quando una corrente elettrica attraversa un corpo umano può produrre effetti pericolosi consistenti generalmente in alterazioni delle varie funzioni vitali, in lesioni al sistema nervoso, ai vasi sanguigni, all'apparato visivo e uditivo, all'epidermide ecc.. Alcuni tra questi effetti risultano essere particolarmente pericolosi.

## **Tetanizzazione**

Si contraggono i muscoli interessati al passaggio della corrente, risulta difficile staccarsi dalla parte in tensione prolungando quindi il contatto e provocando effetti ancora più dannosi - Il valore più grande di corrente per cui una persona è ancora in grado di staccarsi della sorgente elettrica si chiama corrente di rilascio e mediamente è compreso tra i 10mA e i 15mA per una corrente di 50Hz. Da notare che correnti molto elevate non producono solitamente la tetanizzazione perché quando il corpo entra in contatto con esse, l'eccitazione muscolare è talmente elevata che i movimenti muscolari involontari generalmente staccano il soggetto della sorgente.

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

## Arresto della respirazione

Una complicanza dovuta alla tetanizzazione è la paralisi dei centri nervosi che controllano la respirazione. Se la corrente elettrica attraversa i muscoli che controllano il movimento dei polmoni, la contrazione involontaria di questi muscoli altera il normale funzionamento del sistema respiratorio e il soggetto può morire soffocato o subire le conseguenze di traumi dovuti all'asfissia. In questi casi il fenomeno è reversibile solo se si provvede con prontezza, anche con l'ausilio della respirazione artificiale, al soccorso dell'infortunato per evitare danni al tessuto cerebrale.

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

## Fibrillazione ventricolare

E' l'effetto più pericoloso ed è dovuto alla sovrapposizione delle correnti provenienti dall'esterno con quelle fisiologiche che, generando delle contrazioni scoordinate, fanno perdere il giusto ritmo al cuore. Il cuore ha la funzione di pompare il sangue lungo le vene e le arterie del corpo. Per questo scopo, i muscoli del cuore, chiamati fibrille, si contraggono e si espandono ritmicamente a circa 60/100 volte al minuto (sistole e diastole). Questi movimenti sono coordinati da un vero e proprio generatore d'impulsi elettrici ; il nodo seno-atriale. Appositi tessuti conduttori si incaricano di propagare questi impulsi che, passando attraverso il nodo chiamato atrio-ventricolare, arrivano alle fibre muscolari del cuore. Quando gli impulsi elettrici arrivano alle fibrille, queste ultime producono le contrazioni dando luogo al battito cardiaco. Il cuore, proprio a causa della natura elettrica del suo funzionamento, è particolarmente

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

sensibile a qualunque corrente elettrica che proviene dall'esterno, sia essa causata da uno shock elettrico o introdotta volontariamente come nel caso del pace-maker. La corrente generata dal pace-maker è semplicemente un supporto agli impulsi elettrici prodotti nel nodo seno-atriale e non produce anomalie nel normale funzionamento del cuore ma lo aiuta a correggere certe disfunzioni. Una corrente esterna che attraversa il cuore potrebbe in questo caso avere effetti molto gravi per l'infortunato perché potrebbero alterarsi la sincronizzazione e il coordinamento nei movimenti del cuore con la paralisi dell'operazione di pompaggio del sangue. Questa anomalia si chiama fibrillazione ed è particolarmente pericolosa nella zona ventricolare perché diventa un fenomeno non reversibile in quanto il fenomeno persiste anche se lo stimolo è cessato. Meno pericolosa, grazie alla sua natura reversibile, è invece la fibrillazione atriale. La fibrillazione ventricolare è reversibile entro i primi due o tre minuti soltanto se il cuore è sottoposto ad una scarica elettrica molto violenta.

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

Solo così si possono evitare gravi danni al tessuto del cuore stesso, al cervello e nel peggiore dei casi la morte dell'infortunato. Per raggiungere lo scopo viene impiegato il defibrillatore, un'apparecchiatura medica che applica un impulso elettrico al torace dell'infortunato tramite due elettrodi. I fattori che possono rendere probabile l'innescò della fibrillazione ventricolare sono diversi. I più significativi sono:

- L'intensità della corrente che attraversa il corpo di cui una piccola parte passa attraverso il cuore e causa la fibrillazione. E' molto difficile la determinazione di risultati affidabili poiché nonostante i numerosi studi che sono stati realizzati per valutare il minimo valore di corrente che può dare inizio a questo fenomeno, l'impossibilità di realizzare esperimenti diretti con l'uomo rendono molto difficoltosa una raccolta di dati sufficientemente attendibili.

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

Ogni individuo reagisce in modo diverso al passaggio della corrente per cui la quantità di corrente necessaria ad innescare la fibrillazione può variare da caso a caso ; nonostante questo, il percorso seguito dalla corrente ha una grande influenza sulla probabilità d'innescio. Per questo motivo è stato definito un "fattore di percorso" che indica la pericolosità dei diversi percorsi seguiti dalla corrente considerando come riferimento il percorso mano sinistra-piedi.

<i>Percorso</i>	<i>Fattore di percorso</i>
Mani - Piedi	1
Mano sinistra - Piede sinistro	1
Mano sinistra - Piede destro	1
Mano sinistra - Entrambi i piedi	1
Mano sinistra - Mano destra	0,4
Mano sinistra - Dorso	0,7
Mano sinistra - Torace	1,5
Mano destra - Piede sinistro	0,8
Mano destra - Piede destro	0,8
Mano destra - Entrambi i piedi	0,8
Mano destra - Dorso	0,3
Mano destra - Torace	1,3
Glutei - Mani	0,7

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

Ogni individuo reagisce in modo diverso al passaggio della corrente per cui la quantità di corrente necessaria ad innescare la fibrillazione può variare da caso a caso ; nonostante questo, il percorso seguito dalla corrente ha una grande influenza sulla probabilità d'innescò. Per questo motivo è stato definito un "fattore di percorso" (vedi tabella) che indica la pericolosità dei diversi percorsi seguiti dalla corrente considerando come riferimento il percorso mano sinistra-piedi.

- Si ha un istante di tempo in cui il ciclo cardiaco normale é molto instabile per cui, se lo shock coincide con questo istante esiste un'elevatissima probabilità di innescò della fibrillazione. Questo periodo d'instabilità si chiama "periodo vulnerabile.

- La probabilità d'innescò della fibrillazione aumenta se l'infortunato é in contatto con la corrente esterna per una durata maggiore del ciclo cardiaco.

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

## Ustioni

Sono prodotte dal calore che si sviluppa per effetto Joule dalla corrente elettrica che fluisce attraverso il corpo (per esempio, se attraverso la pelle si innesca un flusso di corrente la cui densità è di circa 60 milliampere al  $\text{mm}^2$ , questa verrà carbonizzata in pochi secondi).

## Limiti di pericolosità della corrente elettrica

I limiti convenzionali di pericolosità della corrente elettrica sia alternata che continua, in funzione del tempo per cui fluisce attraverso il corpo umano, sono stati riassunti in un grafico tempo-corrente (dati IEC).

Per correnti alternate (fig. 2.4) fino a:

- 0,5 mA (soglia di percezione) il passaggio di corrente non provoca nessuna reazione qualunque sia la durata;
- 10 mA (limite di rilascio - durata qualsiasi) non si hanno in genere effetti pericolosi;

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

# Lezione n°2 2007-2008

- >10 mA non pericolosa se la durata del contatto è decrescente rispetto al valore di corrente.

Il piano tempo corrente è stato suddiviso in quattro zone:

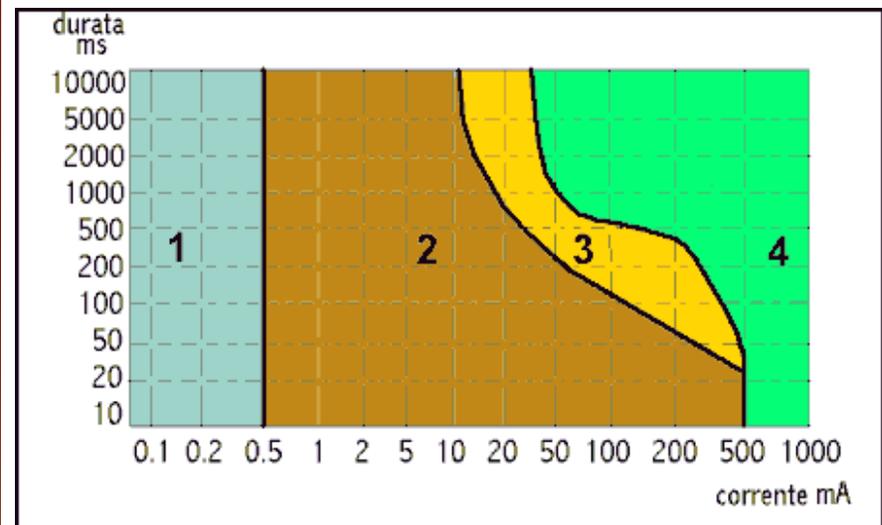
**Zona 1** - Retta "a" di equazione  $I=0,5 A$  in cui normalmente non si hanno effetti dannosi;

**Zona 2** - Tra la retta "a" e la curva "b" di equazione  $I=10+10/t$  (mA), con asintoto verticale  $I=10$  mA non si hanno normalmente effetti fisiopatologici pericolosi;

**Zona 3** - Tra la curva "b" e la curva "c" (soglia di fibrillazione ventricolare) possono verificarsi effetti quasi sempre reversibili che possono divenire pericolosi se a causa del fenomeno della tetanizzazione, che impedisce il rilascio, ci si porta nella zona 4 ;

**Zona 4** - La pericolosità aumenta allontanandosi dalla curva "c" . Si può innescare la fibrillazione con conseguente arresto cardiaco, arresto della respirazione e ustioni.

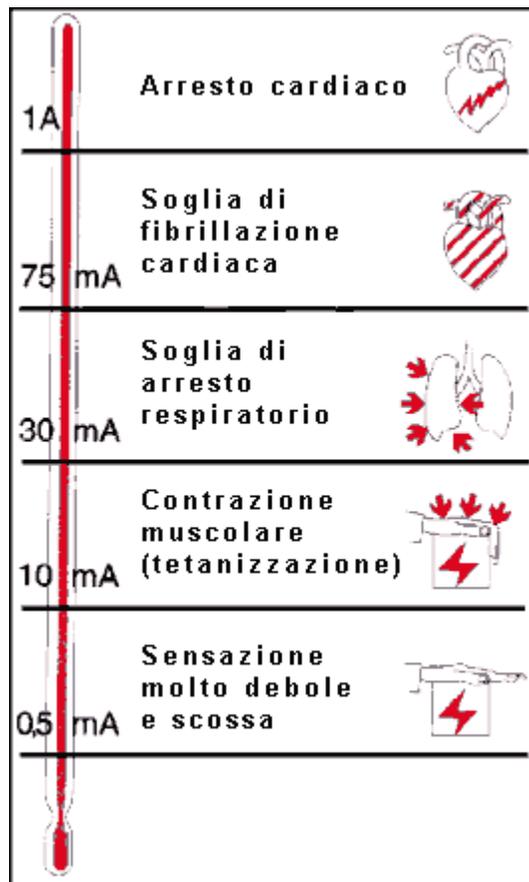
## Effetti dell'elettricità sul corpo umano



# Lezione n°2 2007-2008

In figura sono sintetizzate le conseguenze del passaggio della corrente elettrica nel corpo umano

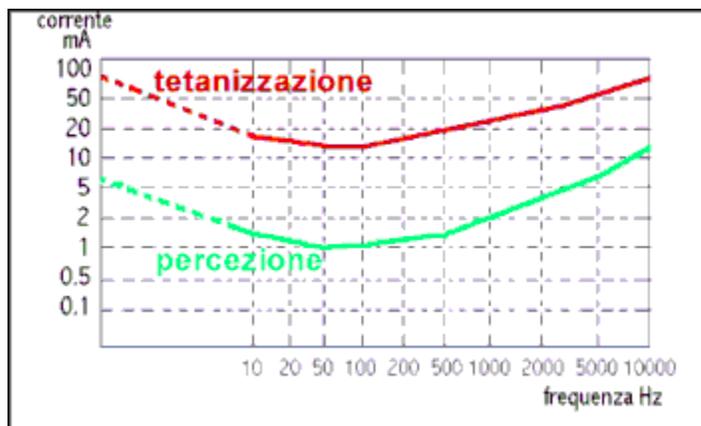
Effetti dell'elettricità sul corpo umano



# Lezione n°2 2007-2008

La pericolosità della corrente diminuisce all'aumentare della frequenza poiché ad alte frequenze la corrente tende a passare solo attraverso la pelle. Il fenomeno si chiama appunto effetto pelle e le lesioni provocate dal passaggio della corrente elettrica sono solo superficiali e non interessano organi vitali. Dalla figura si può notare come le correnti a frequenza di 50 cicli al secondo si trovino nella fascia di frequenze più pericolose.

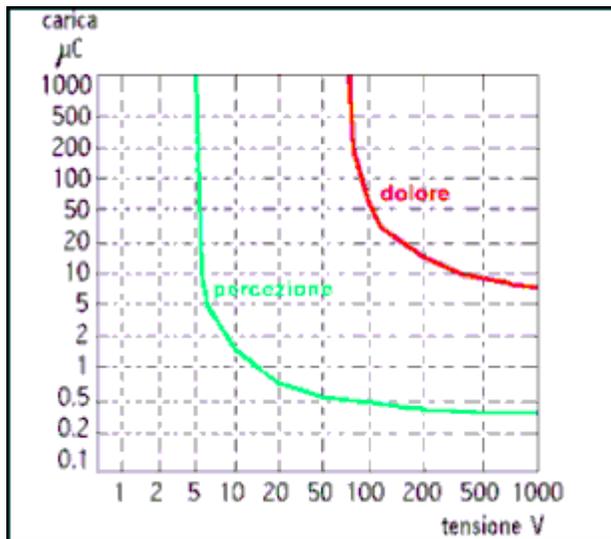
Effetti dell'elettricità sul corpo umano



# Lezione n°2 2007-2008

In figura sono indicate la soglia di percezione e quella di dolore per scariche impulsive (considerando il valore della tensione di picco dell'impulso, sempre minore di 10 ms, e la quantità di carica trasferita)

Effetti dell'elettricità sul corpo umano

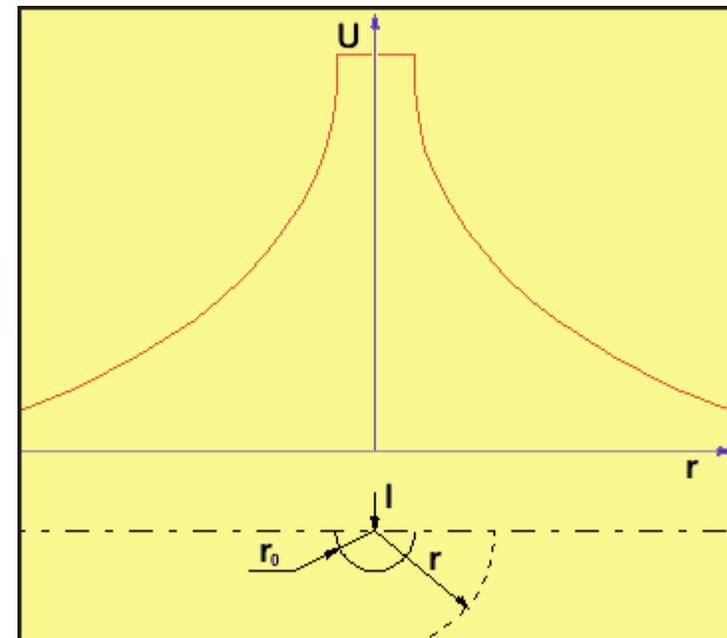


# Lezione n°2 2007-2008

## La resistenza di terra

Se a due elettrodi (dispersori) conficcati nel terreno viene applicata una d.d.p. il terreno svolge la funzione di conduttore elettrico. Ogni porzione elementare del terreno offre una resistenza tanto più piccola quanto più è lontana dal dispersore (per la verifica si è usato un dispersore emisferico di raggio " $r_0$ " perché ad una certa distanza, qualunque sia la forma del dispersore, le linee equipotenziali diventano emisferiche). Si dice resistenza di terra  $R_t$  la somma delle resistenze elettriche elementari di queste porzioni di terreno. Ad una certa distanza dal dispersore la sezione diventa così grande che la resistenza è pressoché nulla mentre nelle immediate vicinanze le sezioni attraverso le quali fluisce la corrente si rimpiccioliscono e la resistenza aumenta. Per quanto detto sopra si definisce equivalente emisferico di un dispersore qualsiasi il dispersore di forma emisferica avente la stessa resistenza.

## Il terreno come conduttore elettrico



# Lezione n°2 2007-2008

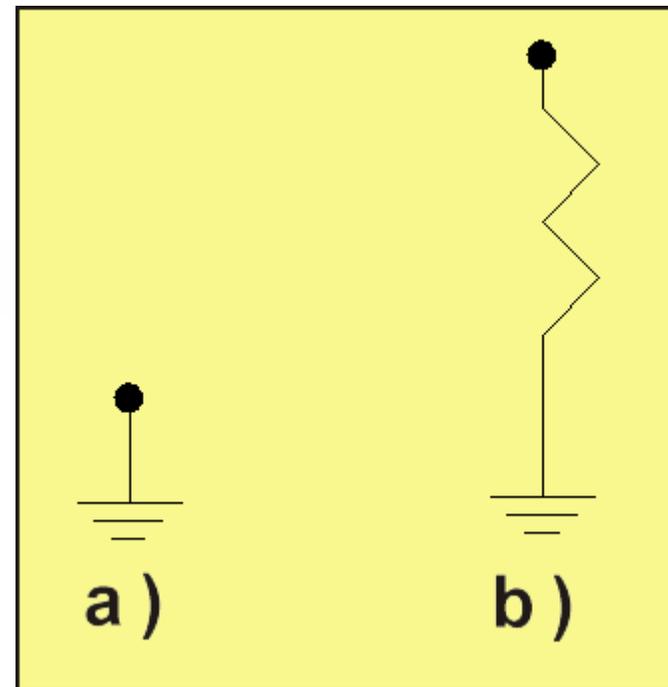
## I potenziali del terreno

Nel circuito (bipolo) equivalente alla  $R_t$  un polo è rappresentato dal dispersore, l'altro da un punto all'infinito a potenziale zero (punto sufficientemente lontano dal dispersore tale da poter essere considerato a potenziale zero).

## Dispensori in parallelo

Due elettrodi possono essere considerati in parallelo quando è zero il potenziale prodotto dall'uno sull'altro. In teoria i dispersori non sono mai in parallelo (solo all'infinito l'influenza reciproca è nulla) anche se in pratica è sufficiente che siano distanti circa  $d > 10r_0$  per poter essere considerati in parallelo ( $r_0$ =raggio dell'equivalente emisferico del dispersore).

## Il terreno come conduttore elettrico



# Lezione n°2 2007-2008

## Resistenza verso terra di una persona

I piedi possono essere assimilati a due piastre circolari di raggio  $r_p$ . Per comodità assumiamo la piastra di raggio  $r_p=1/10$  m per cui la resistenza di terra di ciascun piede vale:

$$R_t = \frac{2\rho}{2r_p} = \frac{2\rho}{5 \cdot 10} = 4\rho$$

( $\rho$ = resistività del terreno in  $\Omega\text{m}$ )

Potendoli considerare come due dispersori in parallelo la resistenza di terra del "dispersore piedi"  $R_{tc}$  di una persona vale circa  $2\rho$ . Se si indica con  $R_c$  la resistenza del corpo umano,  $R_c+R_{tc}$  rappresenta la resistenza della persona e del terreno fino ad un punto preso all'infinito. A questa, se la persona si trova in locale chiuso, andrebbe aggiunta la resistenza del pavimento.

Il terreno come conduttore elettrico

# Lezione n°2 2007-2008

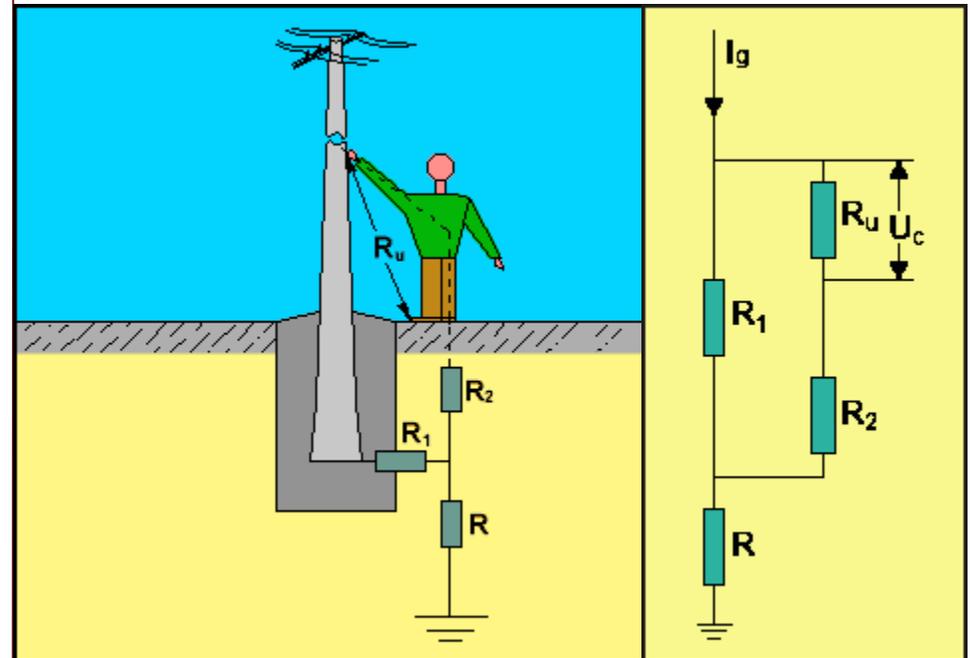
## Tensione di contatto ( $U_c$ ) e di passo ( $U_p$ )

Le tensioni di passo e di contatto sono due grandezze fondamentali per la sicurezza. Si riferiscono infatti ai rischi di fenomeni di elettrocuzione e rappresentano le tensioni alle quali possono essere accidentalmente sottoposti gli esseri umani. La tensione di contatto 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.

Il circuito equivalente consente di risalire con facilità alla tensione  $U_c$ . Ricordando che la corrente che attraversa il corpo umano è una piccola frazione della corrente di guasto  $I_g$  con sufficiente approssimazione si ottiene:

$$U_c = \frac{R_U}{R_U + R_2} \times R_1 \times I_g$$

## Il terreno come conduttore elettrico



# Lezione n°2 2007-2008

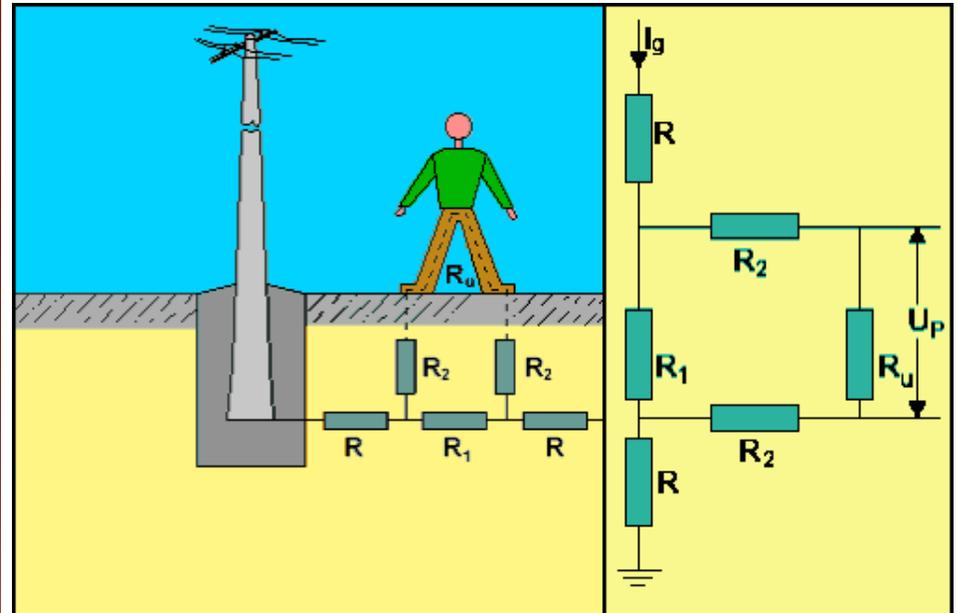
La tensione di passo è la differenza di potenziale che può risultare applicata tra i piedi di una persona alla distanza di un passo (convenzionalmente un metro) durante il cedimento dell'isolamento.

Con riferimento allo schema equivalente si può calcolare la  $U_p$  con la formula:

$$U_p = \frac{R_{\text{v}}}{R_{\text{v}} + R_1 + R_2} \times R_1 \times I_g$$

Dagli schemi equivalenti si può rilevare l'importanza che può assumere il valore delle resistenze  $R_2$  (legate alla resistenza dello strato superficiale del terreno) che potrebbe essere, per ottenere un resistività più alta, realizzato con materiali appositi (ghiaia, bitume, ardesia, ecc.).

## Il terreno come conduttore elettrico



# Lezione n°2 2007-2008

## Tensione totale e tensione di contatto

La carcassa di un apparecchio messa a terra (collegata ad un dispersore) che disperde la corrente di guasto  $I_g$  assume una tensione:

$$U_t = R_t I_g$$

$U_t$  = tensione totale di terra

Una persona che toccasse tale carcassa durante un guasto d'isolamento è soggetta ad una tensione  $U_c$  (tensione di contatto) che può essere minore o al limite uguale alla  $U_t$ . La situazione più pericolosa si ha se il contatto avviene lontano dal dispersore in un punto del terreno in cui il potenziale è prossimo allo zero. Se ad esempio il punto di contatto avvenisse tramite una condotta idrica la resistenza di contatto verso terra della persona  $R_{tc}$  sarebbe molto piccola aumentando la tensione di contatto  $U_c$  fino a farla coincidere in modo sensibile alla tensione totale di terra  $U_t$ .

Il terreno come conduttore elettrico

# Lezione n°2 2007-2008

La tensione, preesistente al contatto, che si stabilisce tra la carcassa e il posto che potrebbe essere occupato dalla persona, si chiama tensione di contatto a vuoto  $U_{co}$  che può essere usata, in favore della sicurezza, al posto della  $U_c$ . La tensione di contatto dipende essenzialmente dalla  $R_c$  del corpo umano. Se al limite la  $R_c$  fosse infinita, attraverso il corpo umano non passerebbe alcuna corrente pur avendo applicata la  $U_{co}$  e la sicurezza sarebbe la più elevata possibile. Purtroppo la  $R_c$  non solo non è infinita ma pure di difficile valutazione e quindi si è dovuto raggiungere un compromesso assumendo dei valori di  $R_c$  convenzionali (valori non superati dal 5% della popolazione), in condizioni asciutte con area degli elettrodi di  $80\text{cm}^2$ . La resistenza del corpo umano dipende da diversi fattori ma soprattutto dal percorso della corrente, dalle condizioni ambientali, dalla superficie di contatto degli elettrodi con la pelle e dalla tensione. Normalmente la corrente fluisce in un percorso mani-mani o mani-piedi mentre se è elevata la probabilità che il

Il terreno come conduttore elettrico

# Lezione n°2 2007-2008

percorso della corrente sia diverso si configura il **"luogo conduttore ristretto"** per il quale occorre prendere particolari misure di sicurezza.

Il percorso mano-mano è meno pericoloso del percorso mani-piedi (la  $R_c$  è minore e la probabilità di innescare la fibrillazione cardiaca è minore rispetto al percorso verticale) tuttavia nel percorso verticale la  $R_c$  ha in serie la resistenza verso terra della persona  $R_{tc}$  che è a favore della sicurezza, tanto che per valori di  $R_{tc}$  elevati diventa più pericoloso in certi casi il percorso trasversale mano-mano. Da queste considerazioni per tracciare la curva di sicurezza ci si è prudenzialmente riferiti al percorso mani-piedi di una persona che afferra un apparecchio elettrico con le due mani e con i due piedi appoggiati al suolo.

Sono stati esaminati diversi tipi di pavimenti a secco e a umido ed è stato assunto un valore di  $R_{tc}$  di 1000 W (largamente cautelativo) per i luoghi ordinari e di 200 W in condizioni particolari (all'aperto, in

Il terreno come conduttore elettrico

# Lezione n°2 2007-2008

manca del pavimento, la  $R_{tc}$  equivale a circa due volte la resistività del terreno, identificata come la resistenza di una piastra metallica appoggiata sul terreno di area equivalente a quella dei piedi, e quindi è prudente per resistività del terreno superiori a  $100 \text{ Wm}$  ) trascurando, a favore della sicurezza, la resistenza delle calzature. Nella tabella sono riportati i valori di resistenza in funzione della tensione nel percorso mani-piedi (CEI 1335 P, art.5) dalla quale si ricava per ogni valore di tensione la corrente che fluisce attraverso la resistenza  $R_c + R_{tc}$  . Il valore di corrente così calcolato va riportato sulla curva di sicurezza tempo corrente dalla quale è facile ricavare il tempo per cui può essere tollerato quel valore di tensione.

## Il terreno come conduttore elettrico

<i>Tensione di contatto</i>	<i>Valori di <math>R_c</math> che non sono superati dal 5% della popolazione (percorso mani - piedi)</i>
25 V	875 $\Omega$
50 V	725 $\Omega$
75 V	625 $\Omega$
100 V	600 $\Omega$
125 V	562 $\Omega$
220 V	500 $\Omega$
700 V	375 $\Omega$
1000 V	350 $\Omega$
val. asintotico	325 $\Omega$

# Lezione n°2 2007-2008

Questi valori sono raccolti nella tabella e vengono utilizzati per tracciare la curva di sicurezza tensione/tempo (la  $R_c$  ha lo stesso valore sia in condizioni ordinarie che in condizioni particolari in quanto non è influenzata in modo significativo dalle condizioni ambientali).

## Il terreno come conduttore elettrico

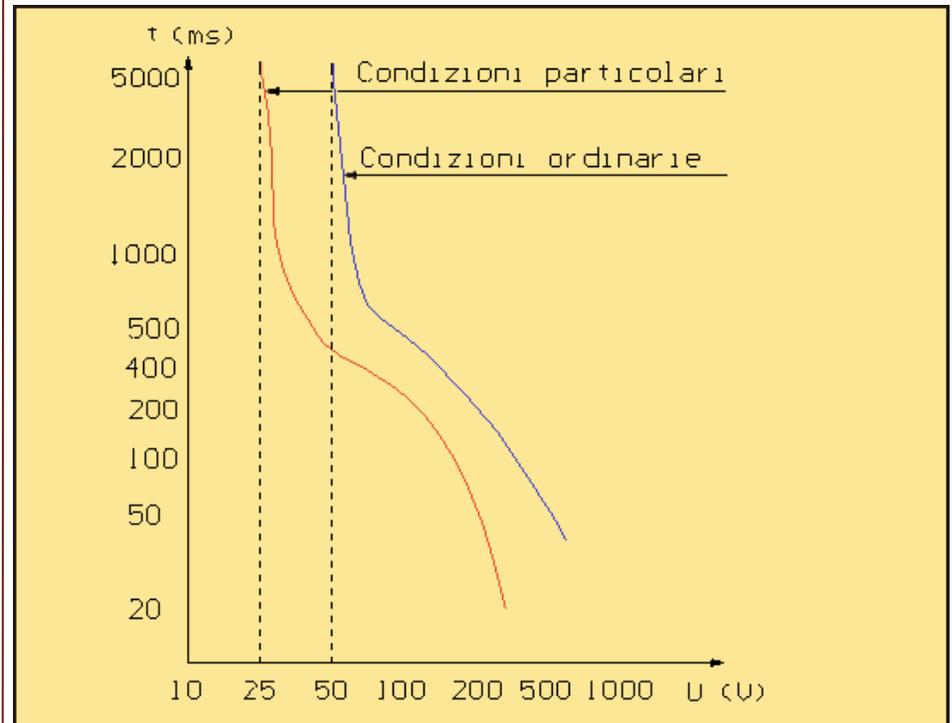
Tensione di contatto	Condizioni ordinarie			Condizioni particolari		
	$R_c+R_{tc}$	$I$	$t$	$R_c+R_{tc}$	$I$	$t$
25 V	-----	-----	-----	1075 $\Omega$	23 mA	5 s
50 V	1725 $\Omega$	29 mA	5 s	925 $\Omega$	54 mA	0,47 s
75 V	1625 $\Omega$	46 mA	0,60 s	825 $\Omega$	91 mA	0,30 s
90 V	1600 $\Omega$	56 mA	0,45 s	780 $\Omega$	115 mA	0,25 s
110 V	1535 $\Omega$	72 mA	0,36 s	730 $\Omega$	151 mA	0,18 s
150 V	1475 $\Omega$	102 mA	0,27 s	660 $\Omega$	227 mA	0,10 s
230 V	1375 $\Omega$	167 mA	0,17 s	575 $\Omega$	400 mA	0,03 s
280 V	1370 $\Omega$	204 mA	0,12 s	570 $\Omega$	491 mA	0,02 s
500 V	1360 $\Omega$	368 mA	0,04 s	-----	-----	-----

# Lezione n°2 2007-2008

## La curva di sicurezza

Per la sicurezza, più che ai limiti di corrente pericolosa, ci si riferisce ai limiti di tensione pericolosa. Ovviamente sia la corrente che la tensione sono legati dalla legge di Ohm:  $R_c$  e  $U_c$  oppure, a favore della sicurezza,  $R_c + R_{tc}$  e  $U_{co}$ . Poiché i valori di  $R_c$  variano a seconda del percorso della corrente nel corpo umano per semplificare l'individuazione delle tensioni pericolose si sono stabiliti in modo convenzionale valori prudenziali di  $R_c$  e di  $R_{tc}$  tali da ottenere i valori massimi delle tensioni di contatto a vuoto sopportabili dal corpo umano in funzione del tempo. Si è in questo modo costruita una "curva di sicurezza" dei limiti tensione-tempo in condizioni normali e in condizioni particolari. La tensione corrispondente al tempo 5s è denominata tensione di contatto limite  $U_L$ . Questo è il limite superiore delle tensioni che possono permanere su una massa per un tempo indefinito senza pericolo per le persone.

## Il terreno come conduttore elettrico



# Lezione n°2 2007-2008

In condizioni normali si considera  $U_L=50V$  mentre in condizioni particolari  $U_L=25V$  (Ad esempio ambienti bagnati, strutture adibite ad uso zootecnico, ambienti ad uso medico).

## Il terreno come conduttore elettrico

<i>Tensione di contatto (c.a.)</i>	<i>Tensione di contatto (c.c.)</i>	<i>Tempo di sopportabilità</i>
<50 V	< 120 V	infinito
50 V	120 V	5 s
75 V	140 V	1 s
90 V	160 V	0.5 s
110 V	175 V	0.2 s
150 V	200 V	0.1 s
220 V	250 V	0.05 s
280 V	310 V	0.03 s