

Materiali conduttori

dott. ing. Lucia FROSINI



Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Conducibilità e resistività

Il parametro che caratterizza un materiale nei confronti dei fenomeni di trasporto della corrente elettrica è la:

conducibilità elettrica σ [S/m]

o il suo inverso:

resistività elettrica $\rho = \frac{1}{\sigma}$ [$\Omega \cdot m$]

Nella pratica ingegneristica si usano spesso anche altre unità di misura :

$$[\rho] = \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \quad \Omega \cdot \text{m} = 10^{-6} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

$$[\sigma] = \text{m}/\Omega\text{mm}^2$$

2

Materiale		Resistività a 0°C		Coefficiente α_0 $\times 10^{-3} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
		$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	
Buoni conduttori	Argento	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0,015	4,0
	Rame	$1,6 \cdot 10^{-8}$	0,016	4,2
	Oro	$2,1 \cdot 10^{-8}$	0,021	3,9
	Alluminio	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0,026	4,3
Conduttori	Tungsteno	$5 \cdot 10^{-8}$	0,05	4,5
	Ferro puro	$10 \cdot 10^{-8}$	0,10	6,0
	Ferro dolce	$13 \cdot 10^{-8}$	0,13	4,8
	Piombo	$20 \cdot 10^{-8}$	0,20	4,2
	Manganina	$40 \cdot 10^{-8}$	0,40	0,01
	Ferro-silicio (3% Si)	$50 \cdot 10^{-8}$	0,50	1,0
	Ferro-nichel (25% Ni)	$85 \cdot 10^{-8}$	0,85	0,6
	Nichel-cromo (20% Cr)	$105 \cdot 10^{-8}$	1,05	0,1
Semiconduttori	Carbone	$3000 \cdot 10^{-8}$	30	-0,4
	Germanio purissimo	0,5		negativo
	Solfuro di piombo	10		negativo
	Silicio purissimo	$2,5 \cdot 10^3$		negativo
Isolanti	Ardesia	10^6		
	Bachelite	10^9		
	Olio minerale	10^{11}		
	Porcellana	10^{12}		
	Resine epossidiche	10^{13}		
	Mica	10^{14}		
	Polistirolo	10^{16}		

Materiali conduttori e isolanti

La conducibilità e la resistività elettrica presentano un range di valori molto ampio nei materiali: 24 ordini di grandezza passando dagli isolanti ai buoni conduttori.

$$\Omega \cdot \text{m} = 10^{-6} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

Materiali conduttori e isolanti

Il primo gruppo di materiali è quello che possiede una resistività di valore molto basso, nell'ordine dei $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$: sono i materiali con cui si realizzano i **conduttori**.

Il secondo gruppo presenta valori di resistività un po' più elevati: con questi materiali si costruiscono i **resistori**, ossia quei componenti circuitali che realizzano volutamente resistenze di valore stabilito.

I materiali del terzo gruppo hanno un valore intermedio tra quello dei conduttori e degli isolanti, per tale motivo sono denominati **semiconduttori**.

I materiali del quarto gruppo presentano una resistività elevatissima, non comparabile a quella dei primi due gruppi: sono questi i materiali isolanti, che, anche se sottoposti a differenze di potenziale (tensioni) notevoli, non sono praticamente attraversati da corrente. Con tali materiali si costruiscono gli **isolatori**, che servono a separare elettricamente tra loro i conduttori.

Materiali conduttori

Nelle macchine e negli impianti elettrici, i principali materiali conduttori utilizzati sono il rame e l'alluminio, poiché sono caratterizzati da un basso valore della resistività ρ (dell'ordine di $10^{-8} \Omega \cdot m$) e presentano un costo accettabile (rispetto ad argento e oro):

Materiali	ρ [$\Omega \cdot m$] a 20°C	Peso specifico [kg/dm^3]
Argento	$1,59 \cdot 10^{-8}$	10,5
Rame	$1,72 \cdot 10^{-8}$	8,9
Oro	$2,44 \cdot 10^{-8}$	19,3
Alluminio	$2,82 \cdot 10^{-8}$	2,6

Si noti che la resistività aumenta rapidamente con il contenuto di impurezza del materiale.

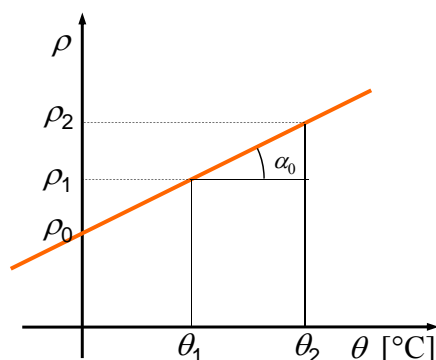
Materiali conduttori

La resistività di un materiale conduttore aumenta all'aumentare della temperatura.

Indicando con ρ la resistività di un materiale conduttore alla temperatura θ e con ρ_0 la sua resistività a 0°C, vale la seguente relazione:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_0\theta)$$

α_0 = coefficiente di temperatura della resistività riferito a 0°C
 $\cong 0,0039$ [$^{\circ}C^{-1}$] per rame e alluminio



Al contrario, la resistività di altri materiali, come ad es. i semiconduttori, diminuisce all'aumentare della temperatura.

I materiali detti superconduttori, quando vengono portati al di sotto della loro temperatura critica, assumono una resistività praticamente nulla.

Materiali conduttori

La resistenza che un conduttore di lunghezza l e sezione trasversale A presenta al passaggio di corrente vale:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [\Omega]$$

Questa espressione è valida solo se la corrente è distribuita uniformemente nella sezione A del conduttore, ossia quando la corrente è continua.

Si può quindi scrivere la seguente formula che permette di calcolare la resistenza R_2 di un corpo alla temperatura θ_2 a partire dalla resistenza R_1 dello stesso corpo alla temperatura θ_1 :

$$\begin{array}{l} R_1 = R_0(1 + \alpha_0\theta_1) \\ R_2 = R_0(1 + \alpha_0\theta_2) \end{array} \quad \Rightarrow \quad \frac{R_2}{1 + \alpha_0\theta_2} = \frac{R_1}{1 + \alpha_0\theta_1} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R_2 = \frac{1 + \alpha_0\theta_2}{1 + \alpha_0\theta_1} R_1}$$

Materiali conduttori nell'industria elettrica

Proprietà determinanti nella scelta di un conduttore:

- resistività elettrica e sua dipendenza dalla temperatura
- proprietà meccaniche:
resistenza alla trazione, modulo di elasticità, allungamento (parametri importanti nelle linee aeree), resistenza alla torsione e al piegamento, durezza, resilienza (capacità di resistere a forze impulsive).
- proprietà tecnologiche (lavorabilità):
malleabilità, duttilità (importante per ottenere fili sottili alla trafilatura), saldabilità.
- proprietà termiche:
conducibilità termica (sempre elevata nei metalli), coefficiente di dilatazione termica (importante nelle linee aeree e negli avvolgimenti), temperatura di fusione.

Il rame

Il rame è il materiale più usato come conduttore elettrico, grazie alle sue ottime caratteristiche, fra cui:

- elevata conducibilità elettrica, seconda soltanto a quella dell'argento;
- ottime proprietà tecnologiche, in particolare elevata trafilabilità anche in fili molto sottili, facilità di laminazione a caldo e a freddo, saldabilità;
- elevate caratteristiche meccaniche che si mantengono anche alle basse temperature;
- resistenza all'ossidazione a contatto con l'atmosfera (l'ossidazione progredisce in profondità solo se l'ossido formato in superficie viene asportato);
- facilità di riutilizzare i rottami.

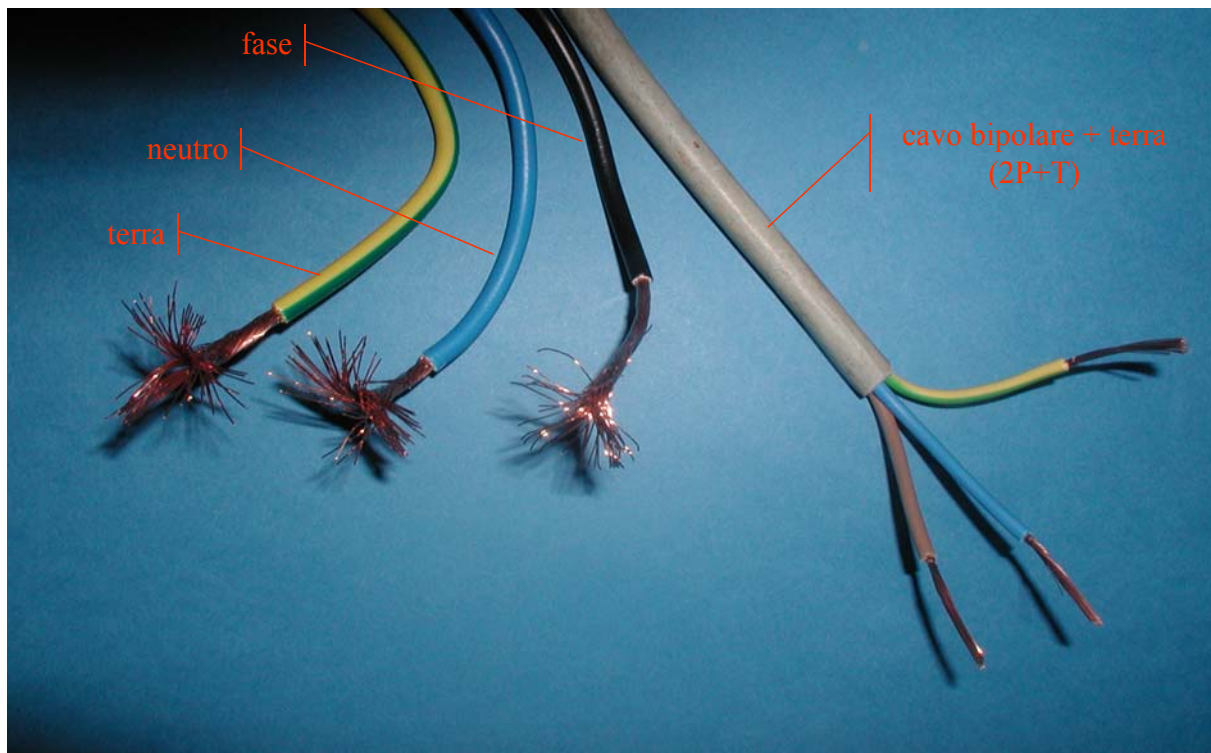
L'alluminio

Rispetto al rame, i vantaggi fondamentali dell'alluminio sono la leggerezza e il costo.

Per quanto riguarda le altre caratteristiche, l'alluminio presenta:

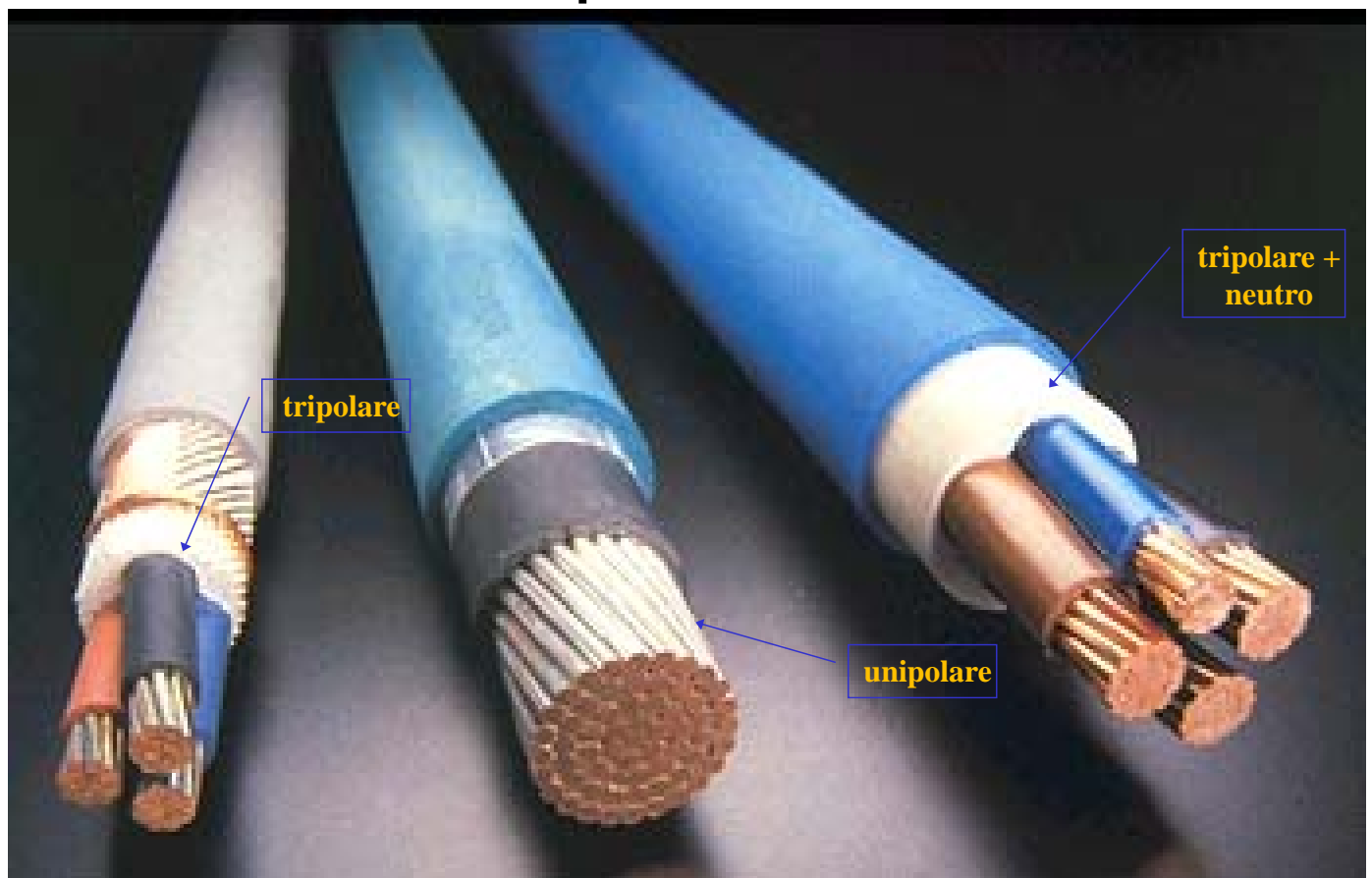
- resistività maggiore di quella del rame: a parità di resistenza elettrica, la sezione di un conduttore di alluminio è del 65% superiore a quella di un conduttore in rame;
- caratteristiche meccaniche decisamente inferiori a quelle del rame (es. modulo di elasticità, carico di rottura a trazione);
- temperatura di fusione minore di quella del rame (658 °C contro 1083°C);
- ottime proprietà tecnologiche, in particolare è ottimo per l'ottenimento di forme per fusione o pressofusione;
- è molto malleabile e come tale può essere facilmente sottoposto a tutte le lavorazioni plastiche, sia a caldo che a freddo; tuttavia qualche difficoltà si ha nella trafilatura, per cui non è molto adatto per la realizzazione di fili sottili.

Cavi in rame per bassa tensione



I colori delle guaine sono stabiliti dalle Norme CEI. La suddivisione del conduttore in conduttori elementari di piccolo spessore serve ad aumentare la flessibilità del cavo

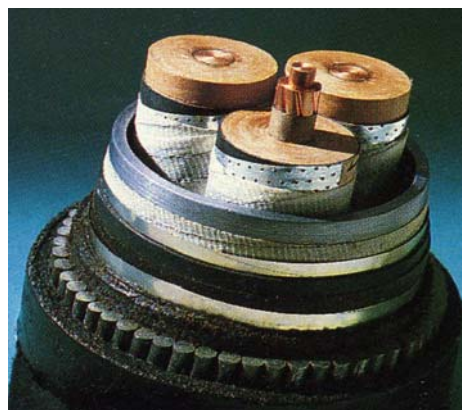
Conduttori in rame per cavi in media tensione



Conduttori in rame in cavi tripolari per alta tensione



cavo in rame, isolato in XLPE – 75 kV

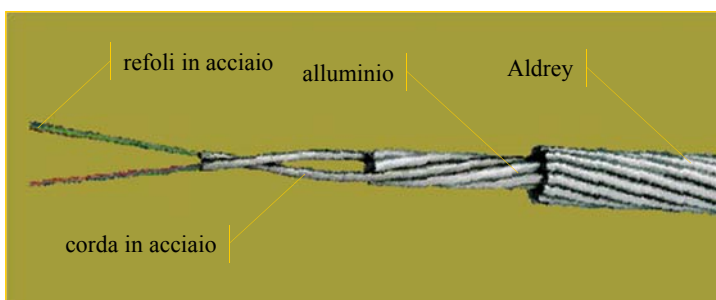


cavo in rame, isolato in carta-olio – 185 kV

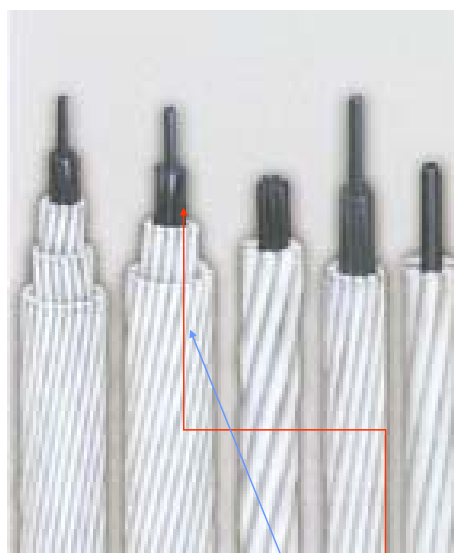
Conduttori in alluminio per linee aeree



conduttore in Aldrey (lega di alluminio)

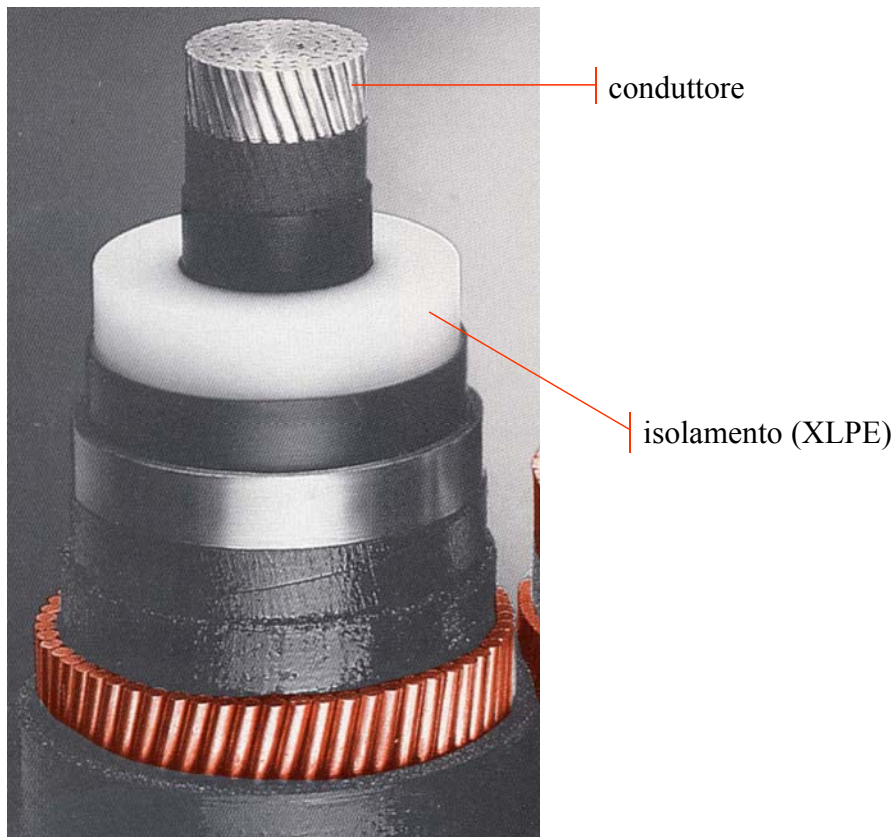


conduttore in alluminio-acciaio



conduttori in alluminio con anima in acciaio

Conduttori in alluminio in un cavo per la trasmissione di grande potenze in alta tensione (145 kV)



15

Materiali conduttori

Quando il conduttore è attraversato da una corrente I , uniformemente distribuita nella sua sezione, dissipa sotto forma di calore (effetto Joule) una potenza data da:

$$P_{Joule} = RI^2 \quad [W]$$

e si scalda di conseguenza raggiungendo temperature tanto più elevate, quanto più alta è la corrente. Si definisce densità di corrente il rapporto tra la corrente e la sezione del conduttore:

$$J = I/A \quad [A/m^2]$$

Le perdite per effetto Joule in un conduttore possono quindi essere espresse come:

$$P_{Joule} = RI^2 = \rho \frac{l}{A} (J \cdot A)^2 = \rho \cdot J^2 \cdot (l \cdot A) \quad [W]$$

Questa espressione è analoga a quella delle perdite che si verificano in un materiale ferromagnetico. I valori di B per i materiali ferromagnetici e di J per i materiali conduttori assumono quindi il significato di indici di sfruttamento dei materiali: maggiore è il loro valore, maggiori sono le perdite nei materiali.

16

Portata di un conduttore

Per **portata** di un conduttore si intende la massima corrente elettrica che può attraversarlo in regime permanente.

Questa massima corrente è determinata quasi esclusivamente da problemi termici, nel senso che bisogna verificare che la temperatura raggiunta dal conduttore:

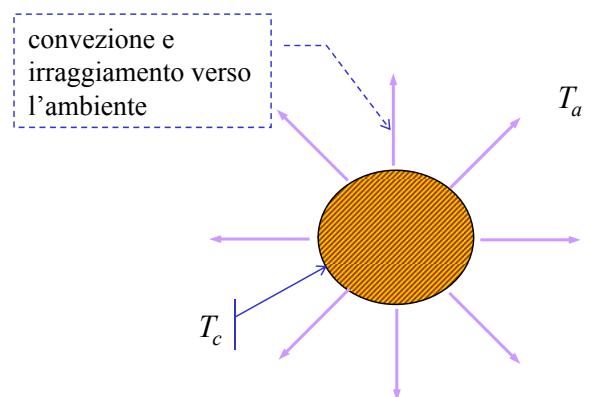
- sia compatibile con altri materiali con cui può venire in contatto (es. isolanti);
- non danneggi il conduttore stesso (una temperatura troppo elevata può deteriorare il materiale, accelerare processi di ossidazione, ecc.);
- non dia luogo a perdite troppo elevate (aumento della resistenza con la temperatura).

La temperatura raggiunta dal conduttore è determinata dai processi con cui il calore generato nel conduttore per effetto Joule viene trasferito all'ambiente.

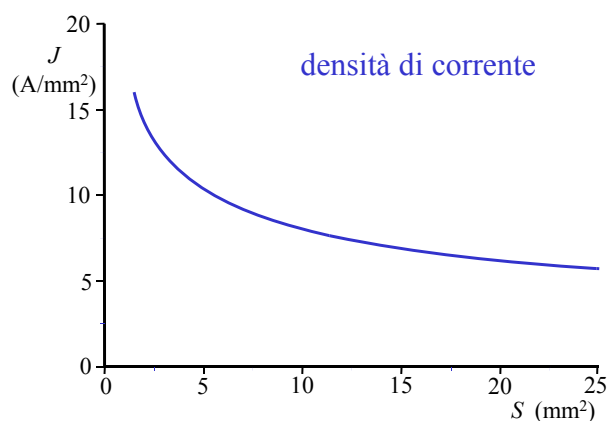
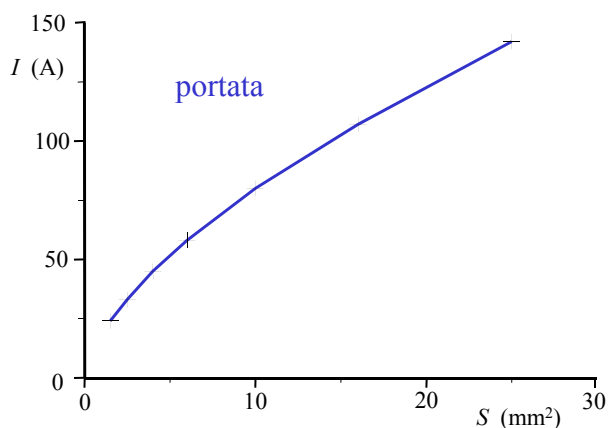
Portata di un conduttore in aria libera

La temperatura T_c del conduttore dipende da:

- quadrato della corrente I ;
- resistenza del conduttore (e quindi dalla resistività e dalla sua sezione, ipotizzando un calcolo per unità di lunghezza del conduttore);
- resistenza termica di convezione e irraggiamento verso l'ambiente (superficie del conduttore, natura di questa superficie, tipo di ventilazione, ecc.);
- temperatura ambiente T_a : si intende la temperatura media giornaliera, convenzionalmente fissata dalle norme (per le nostre regioni) a 30 °C.



Portata e densità di corrente ammissibile per un cavo in rame con posa in aria libera



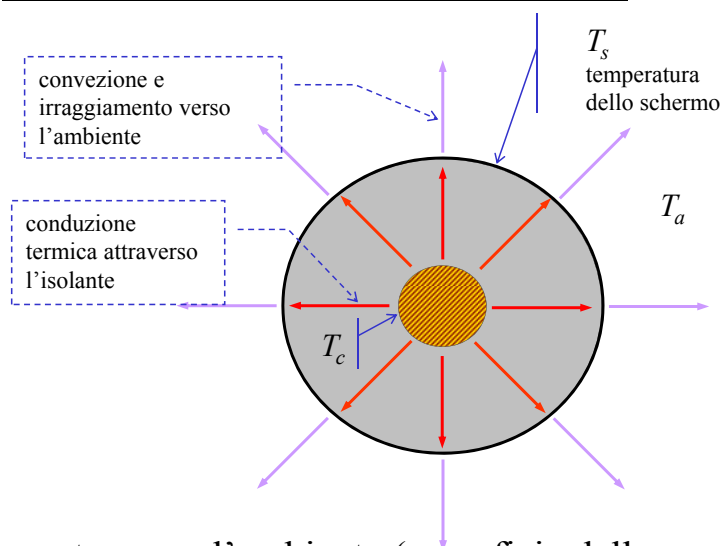
S (mm ²)	I (A)	J (A/mm ²)
1,5	24	16
2,5	33	13,2
4	45	11,4
6	58	9,7
10	80	8
16	107	6,7
25	142	5,7

Portata di un conduttore rivestito di isolamento

Quando il conduttore è rivestito da un isolante, la temperatura T_c del conduttore dipende da:

- ❑ quadrato della corrente I ;
- ❑ resistenza del conduttore;
- ❑ resistenza termica di conduzione dell'isolamento;
- ❑ temperatura ambiente T_a ;
- ❑ resistenza termica di convezione e irraggiamento verso l'ambiente (superficie dello schermo, natura di questa superficie, tipo di ventilazione, ecc.).

La temperatura del conduttore T_c dipende inoltre da tutti quei fattori che possono influenzare lo scambio termico verso l'ambiente, quali le condizioni di posa del conduttore stesso: in canaletta, in condotto, in tubo incassato, un solo conduttore per tubo, più conduttori per tubo, ecc.



Portata di un conduttore rivestito di isolamento

La *massima corrente ammissibile in regime permanente (portata)* è definita dalla corrente I che, con quelle date condizioni di scambio termico, assicura una temperatura del conduttore:

$$T_c \leq T_{max}$$

Dove T_{max} è la *massima temperatura di servizio* determinata sulla curva di vita termica del materiale isolante in corrispondenza del tempo di vita di progetto (dell'ordine di 10÷20 anni)

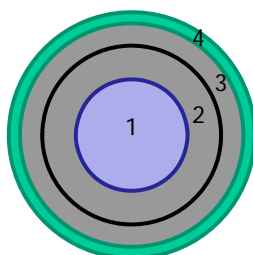
La temperatura massima ammissibile T_{max} viene determinata in modo che non danneggi il conduttore e il suo sistema di posa (dilatazione termica, variazione delle proprietà meccaniche, velocità dei processi di ossidazione, ecc.) e non determini anomali aumenti della sua resistenza elettrica.

Materiali conduttori: effetto pelle

Quando la corrente è alternata o comunque variabile nel tempo, la distribuzione di corrente all'interno del conduttore non è più uniforme, ma tende ad addensarsi sulla sua superficie esterna dando luogo al cosiddetto “effetto pelle”.

Per comprendere questo fenomeno, si pensi di suddividere idealmente la sezione del conduttore in un certo numero di strati concentrici di uguale area, in modo che ciascuno strato presenti la stessa resistenza per unità di lunghezza.

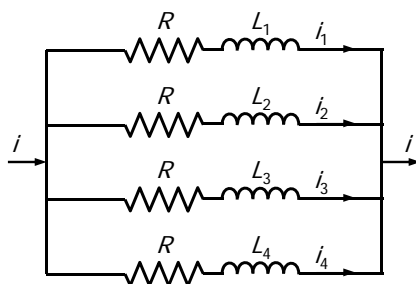
In presenza di corrente elettrica, dentro e fuori dal conduttore si genera un campo magnetico le cui linee di campo concatenano in misura diversa i diversi strati concentrici.



Materiali conduttori: effetto pelle

Gli strati più interni sono circondati da un numero maggiore di linee di campo magnetico degli strati più esterni.

Poiché l'induttanza è definita come il rapporto tra flusso auto-concatenato e la corrente che circola nel conduttore, si può quindi affermare, in modo qualitativo, che gli strati più interni sono caratterizzati da una induttanza maggiore rispetto agli strati più esterni.



Quando il conduttore è attraversato da una corrente costante nel tempo, il ruolo delle induttanze è nullo, la corrente tra gli strati viene ripartita in ragione inversa delle resistenze e la distribuzione di corrente risulta uniforme.

Materiali conduttori: effetto pelle

Se la corrente che percorre il conduttore è alternata sinusoidale di pulsazione ω , la corrente nei vari strati si ripartisce in ragione inversa delle singole impedenze $R + j\omega L_i$.

A causa del diverso valore della parte induttiva delle impedenze dei diversi strati, la corrente tende ad addensarsi verso la parte più esterna del conduttore.

La disuniformità di distribuzione si accentua al crescere della frequenza della corrente ed, in conseguenza di questo fatto, la resistenza apparente e le perdite del conduttore per effetto Joule aumentano.

Infatti, si può ritenere che a causa dell'addensamento superficiale della corrente non tutta la sezione del conduttore venga utilizzata per il passaggio della corrente e quindi nella formula che definisce la resistenza, l'area utile A risulta ridotta rispetto all'area geometrica.

Conseguenze dell'effetto pelle sul dimensionamento dei conduttori

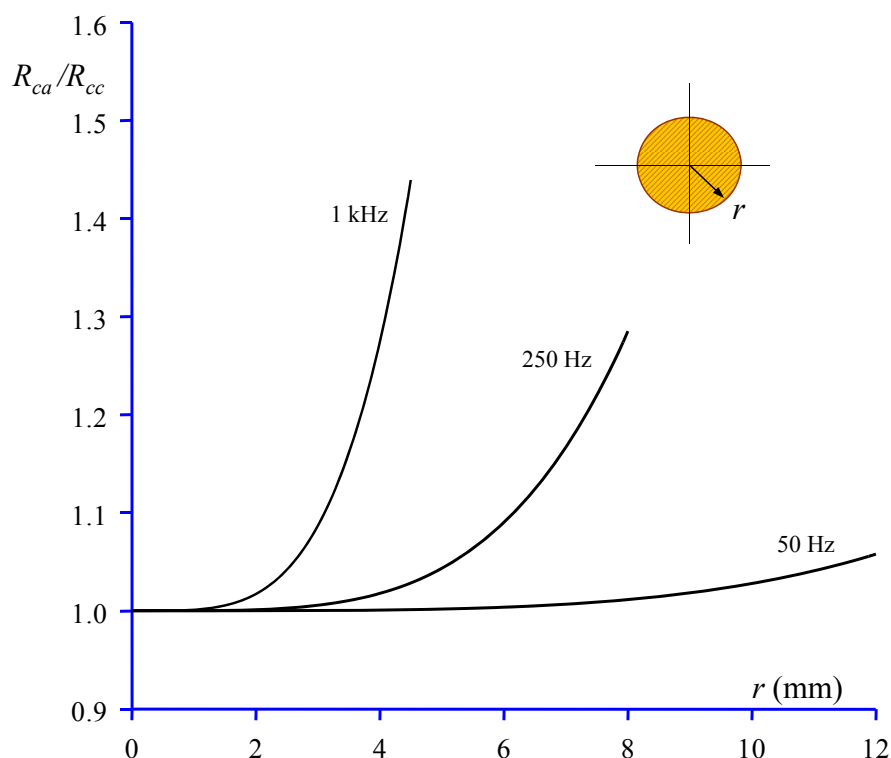
È possibile dimostrare che, alla frequenza di 50 Hz:

- le conseguenze dell'effetto pelle nei conduttori di piccola sezione sono molto piccole e possono essere in genere trascurate.
- sono invece importanti per i conduttori di sezione maggiore, quali quelli utilizzati in grosse macchine elettriche o in cavi per il trasporto di grandi potenze.

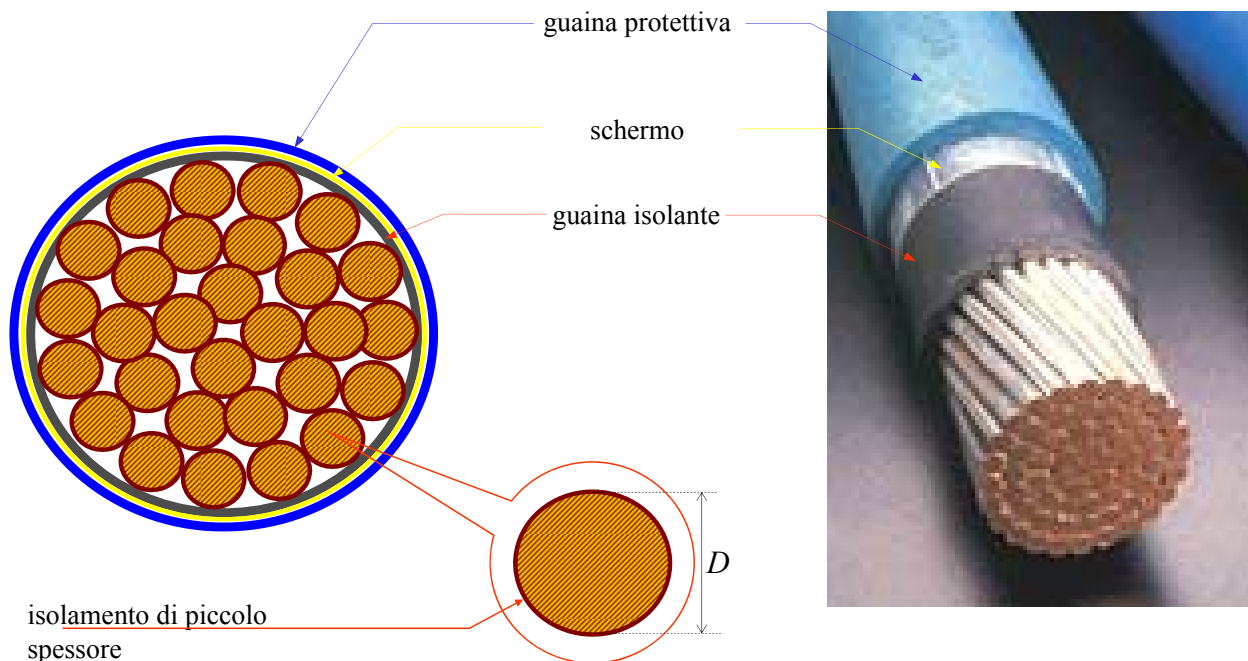
Per ridurre le conseguenze dell'effetto pelle in conduttori di grande spessore, conviene suddividere il conduttore stesso in tanti conduttori (ovviamente tutti in parallelo) di piccola sezione isolati fra di loro.

Bisogna comunque tener presente che l'effetto pelle assume importanza fondamentale in alta frequenza.

Rapporto R_{ca} / R_{cc} in un conduttore di rame

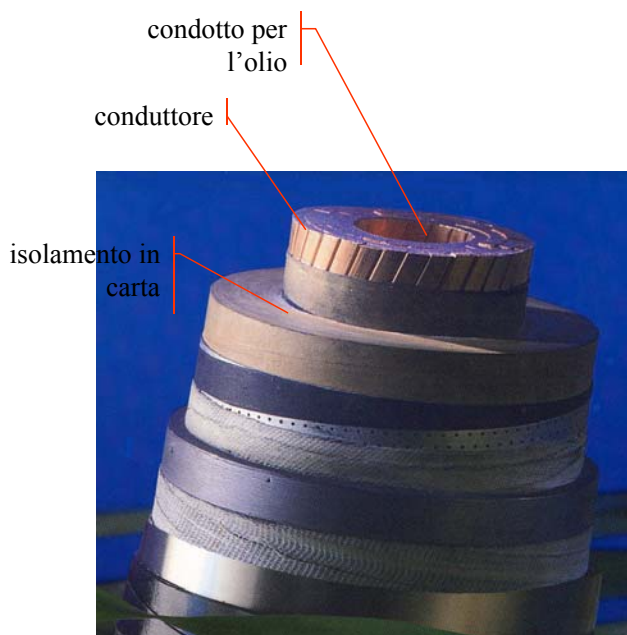


Suddivisione del conduttore di un cavo elettrico

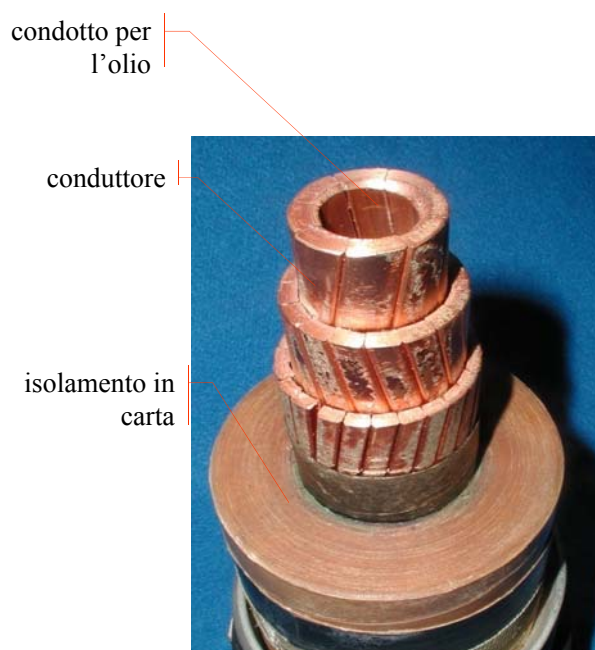


la suddivisione del conduttore in conduttori elementari di piccolo diametro viene fatta anche per aumentare la flessibilità del cavo

Suddivisione del conduttore per la trasmissione di grandi potenze



cavo sottomarino isolato in carta-olio, 420 kV



cavo isolato in carta-olio, 400 kV

La suddivisione del conduttore viene anche fatta per garantire una adeguata flessibilità del cavo (indispensabile per la posa del cavo stesso)