

CONDUTTORI

La conduzione elettrica di un materiale dipende da:

- Comportamento elettroni di valenza
- Temperatura (vibrazioni degli atomi nella struttura)

In pratica i conduttori sono cristallini e metallici.:

Legame tra conducibilità elettrica σ e conducibilità termica c
(legge di Lorentz) valida in particolare per i metalli: $c = k T \sigma$

k dipendente dalla temperatura, ma circa costante per i metalli.

Metalli di estrema purezza possono essere per $T \sim 0$ K
superconduttivi ($R \sim 0$)

VALORI CONDUCIBILITA'

Materiale conduttore	Conduttività σ [S/m]
Argento	$6.3 \cdot 10^7$
Rame elettrolitico	$5.9 \cdot 10^7$
Rame di purezza industriale	$5.8 \cdot 10^7$
Oro	$4.5 \cdot 10^7$
Zinco	$1.6 \cdot 10^7$
Tungsteno	$1.8 \cdot 10^7$
Alluminio di purezza industriale	$3.8 \cdot 10^7$
Bronzo fosforoso	$4 \cdot 10^6$
Bronzo al nichel-alluminio	$2 \cdot 10^6$
Piombo	$4.8 \cdot 10^6$
Stagno	$9.2 \cdot 10^6$
Ottone	$1.7 \cdot 10^7$
Acciaio	$1 \cdot 10^7$

Valori validi per materiali isotropi, di purezza industriale ed a 20°C

ISOTROPIA

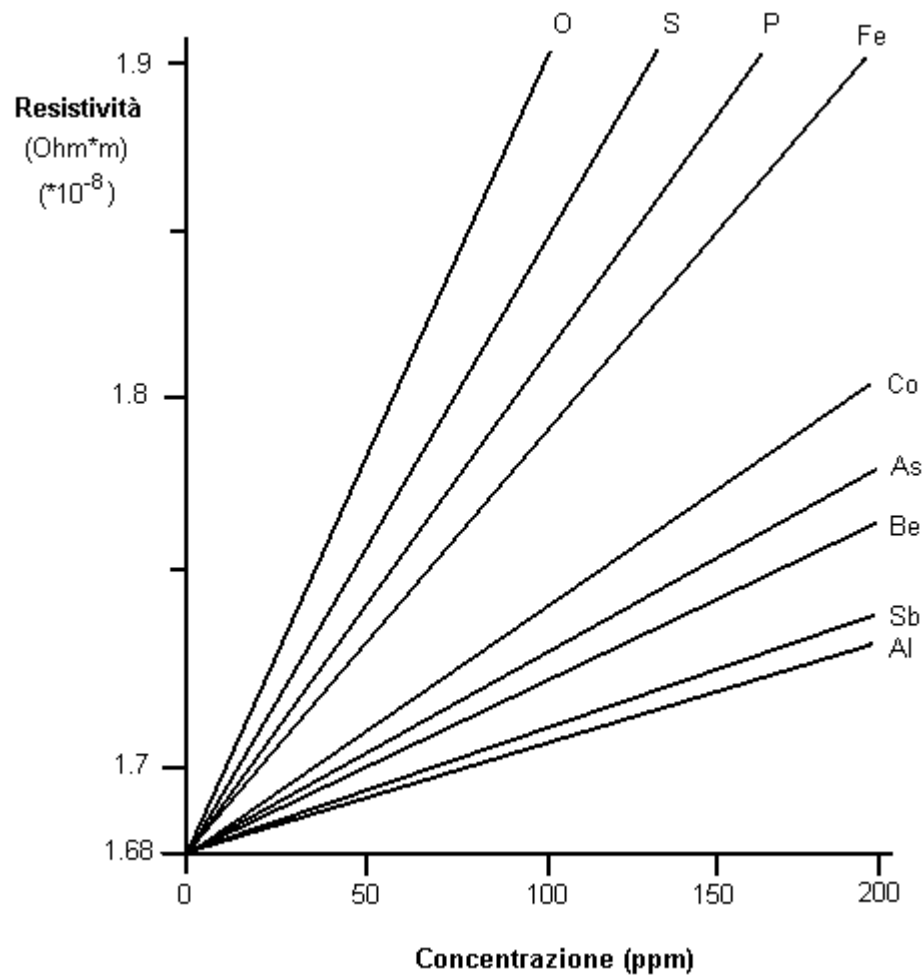
- Nel caso il materiale non sia isotropo, si ha una matrice di conducibilità con valori tutti diversi
- Ci può essere un caso intermedio (ortotropia) in cui il materiale presenta almeno due piani di simmetria ortogonali, in cui le proprietà del materiale sono indipendenti dalle direzioni in ogni piano
- I compositi multistrato e alcuni materiali ferroelettrici (es. sale di Rochelle) sono ortotropici.

SCELTA DEL CONDUTTORE

Metallo	Modulo elastico a trazione E (GPa)	Modulo elastico a torsione G (GPa)	Durezza Brinell (HB)
Argento	78	26	27-30
Rame	124	42	50
Alluminio	70	27	16-40
Acciaio	190-210	79	190-700
Oro	78	27	40 (puro)-70 (lamina)

- Materiale di riferimento: rame temprato (scala IACS, International Annealed Copper Standard)
- Applicazioni speciali: argento (es. satelliti), oro (es. conduttori circuiti stampati)
- Necessità meccaniche (alta tensione): cavi di alluminio in involucro d'acciaio

IMPUREZZE E CONDUCIBILITA'



Rame di purezza elettrica:
eliminazione dell'ossigeno
al di sotto dello 0.04% col fosforo

Nel caso dell'alluminio, un metallo di purezza elettrica deve avere $\text{Al} > 99.5\%$.
Impurezze che hanno minimo effetto sulla conduttività elettrica sono Ni, Si, Zn, Fe,
quelle che hanno un medio effetto sono Cu, Ag, Mg,
mentre hanno un notevole effetto Ti, V, Mn, Cr.

RESISTIVITA' E TEMPERATURA

Metallo	Coefficiente di temperatura per la resistività
Acciaio	$4.5-5 \cdot 10^3$
Alluminio	$4 \cdot 10^3$
Argento	$3.8 \cdot 10^3$
Oro	$3.4-3.8 \cdot 10^3$
Rame	$3.9 \cdot 10^3$

$$\rho_t = \rho_{t_0} + (t-t_0)\Delta\rho = \rho_{t_0} [1 + (t-t_0)\alpha_{t_0}]$$

valida per i metalli in un ristretto intervallo di temperatura (ca. ambiente)

Coefficienti molto vicini = Effetto impurezze preponderante

(caso della costantana Cu60/Ni40, materiale per resistenze, a resistività indipendente dalla temperatura, cioè con $\alpha=0$)

TERRENO

Caso intermedio tra conduttore ed isolante

Conoscere la resistività del terreno per:

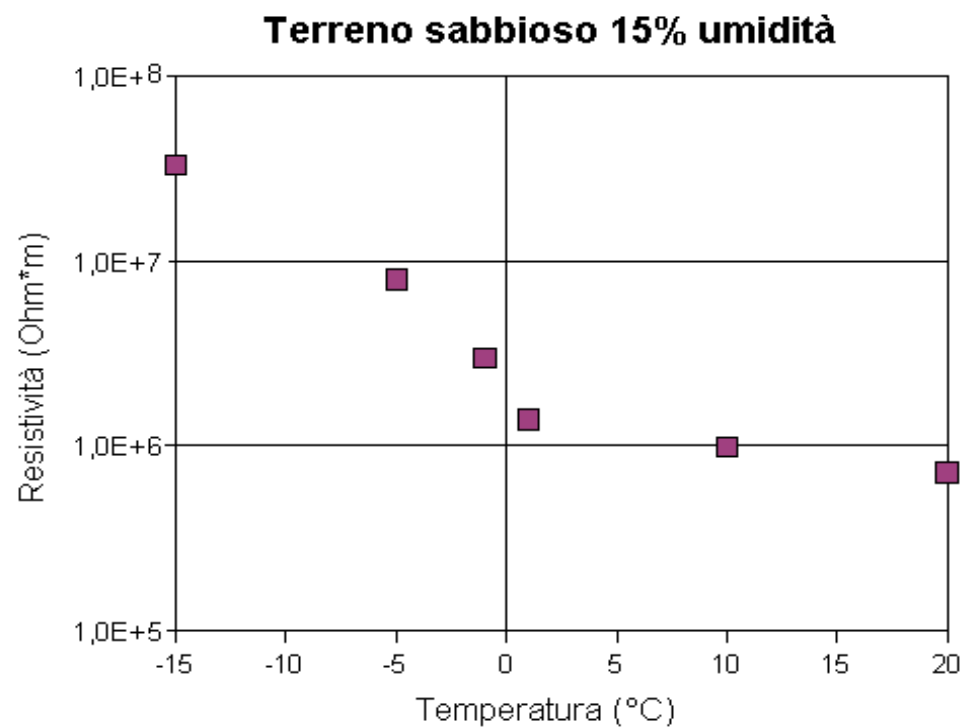
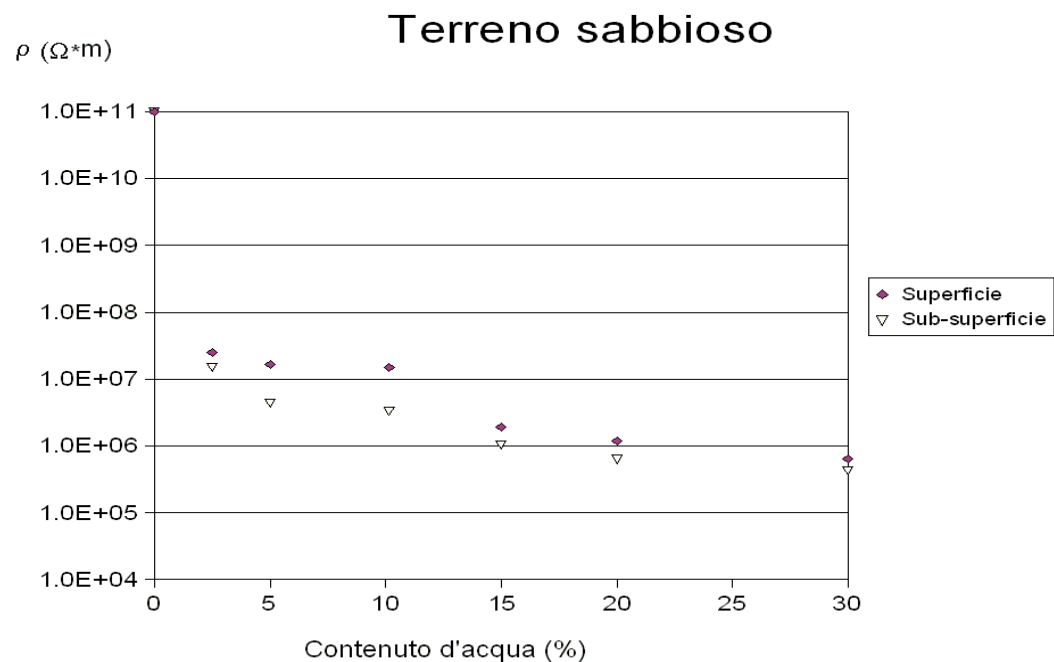
- Progetto impianti di terra
- Valutazione corrosione (dimensionamento anodi sacrificali)

Resistività del terreno dipendente da

- Sali minerali
- Umidità
- Temperatura

Tipo di suolo	Resistività (min-max) ($\Omega \cdot m$)
Ceneri, brina, rifiuti	$6 \cdot 10^4 - 7 \cdot 10^5$
Argilla, terriccio, scisti	$3 \cdot 10^4 - 1.6 \cdot 10^6$
Argilla con variabile contenuto di sabbia e ghiaia	$1 \cdot 10^5 - 1.3 \cdot 10^7$
Ghiaia, sabbia e pietre	$6 \cdot 10^6 - 4.6 \cdot 10^7$

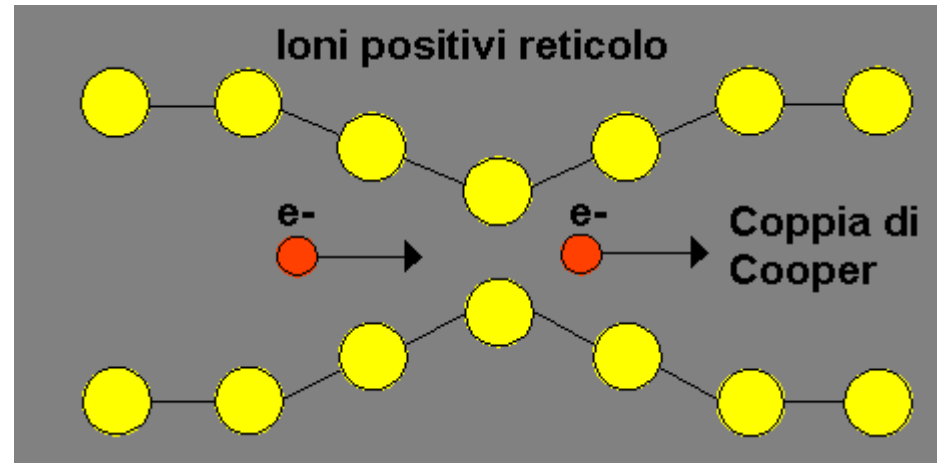
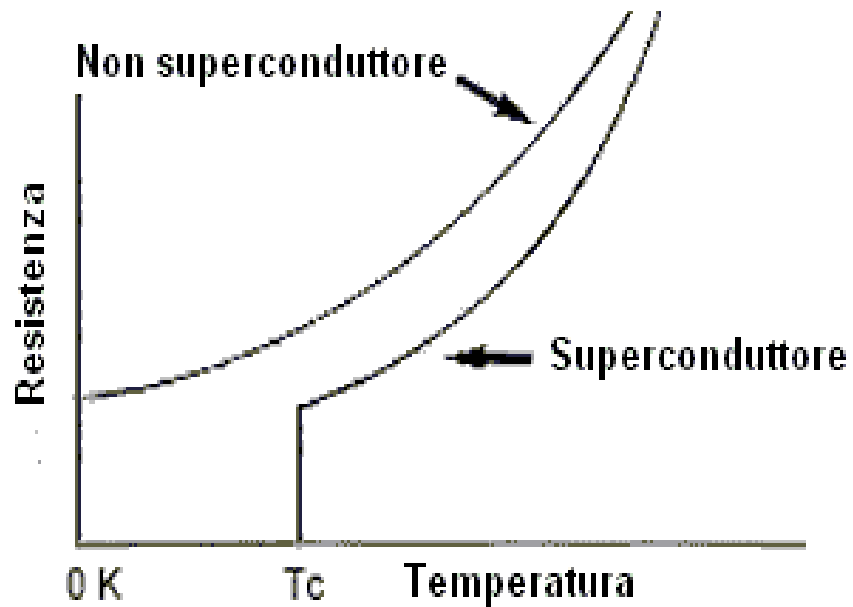
RESISTIVITA' TERRENO SABBIOSO



SUPERCONDUTTIVITA'

- Conduzione con resistenza = 0
- **Effetto Josephson:** quando due superconduttori sono uniti da un dielettrico molto sottile, i doppietti elettronici possono passare dall'uno all'altro senza incontrare resistenza
- **Effetto Meissner:** un debole campo magnetico va rapidamente a zero all'interno di un superconduttore (se un magnete viene portato al di sopra del superconduttore, esso incontra una forza repulsiva: il conduttore si comporta come un perfetto diamagnete)

SUPERCONDUTTIVITA' DI TIPO I

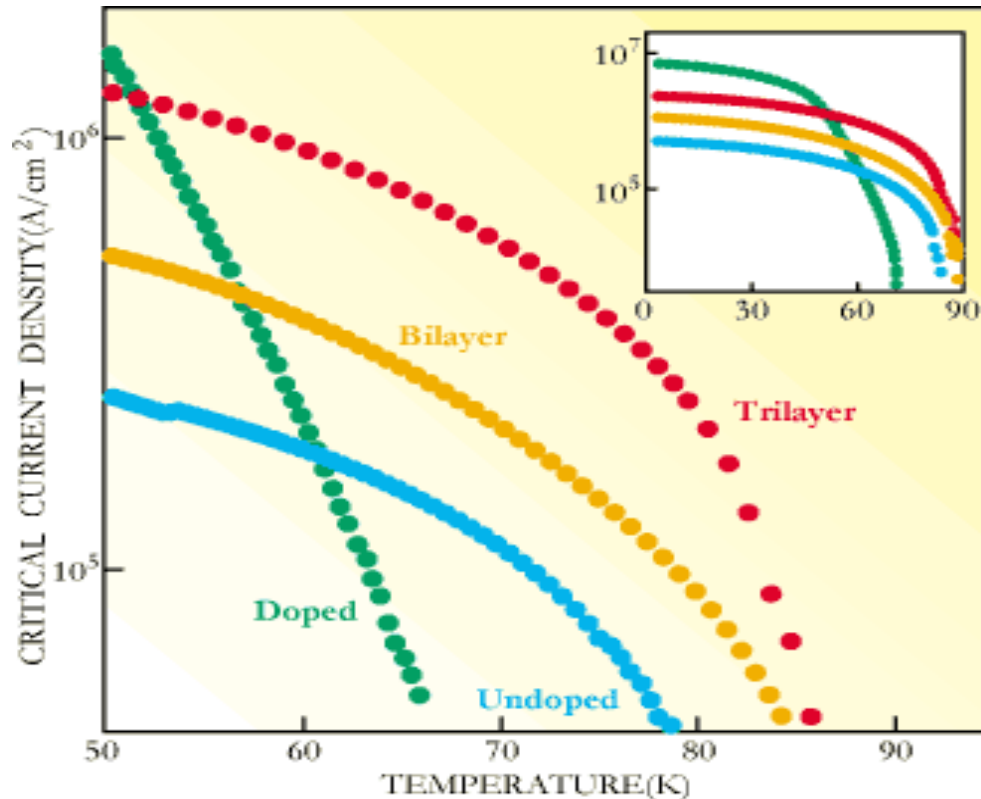


Metallo puro	Punto di resistività zero (K)
Titanio	0.40
Zinco	0.88
Alluminio	1.19
Stagno	3.72
Mercurio	4.15
Piombo	7.20
Niobio	9.46

SUPERCONDUTTIVITA' DI TIPO II

- Leghe di ossidi di rame (perovskiti) con dopanti: YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) (90 K), TlBaCaCuO (138 K), $(\text{InSnBa}_4\text{Tm}_4\text{Cu}_6\text{O}_{18})^+$ (150 K), complessivamente detti HTSC (High Temperature Superconductors).
- Meccanismo non ben noto
- I superconduttori di tipo 2 differiscono da quelli di tipo 1 perché la transizione dallo stato normale ad uno stato di superconduttività avviene gradualmente passando per una regione di comportamento “misto”.
- Quindi un superconduttore di tipo 2 permette una certa penetrazione da parte di un campo magnetico esterno sulla superficie, il che crea alcuni particolari fenomeni mesoscopici, come la presenza di bande di superconduttività sulla superficie e vortici di flusso nella struttura.

DROGAGGIO NEGLI HTSC



Effetto del dopante sulla superconduttività di una lega YBCO

Blu = YBa₂Cu₃O₇ non drogato;

Verde = YBCO drogato con calcio;

Arancio = Doppio strato di YBCO drogato con calcio su YBCO non drogato

Rosso = Triplo strato di YBCO non drogato inserito tra strati singoli di YBCO drogato con calcio.

(wang et al., 1997)

Corrente critica I_c.

Per $I < I_c$ in un superconduttore ideale il voltaggio misurato è zero.

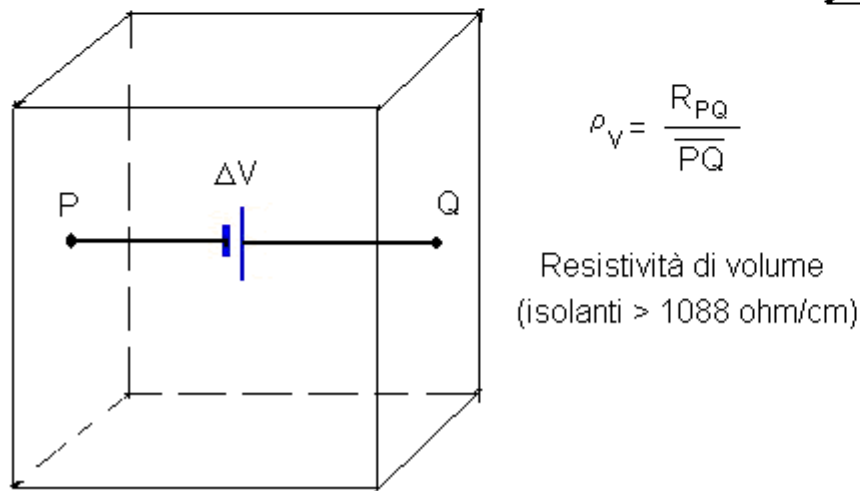
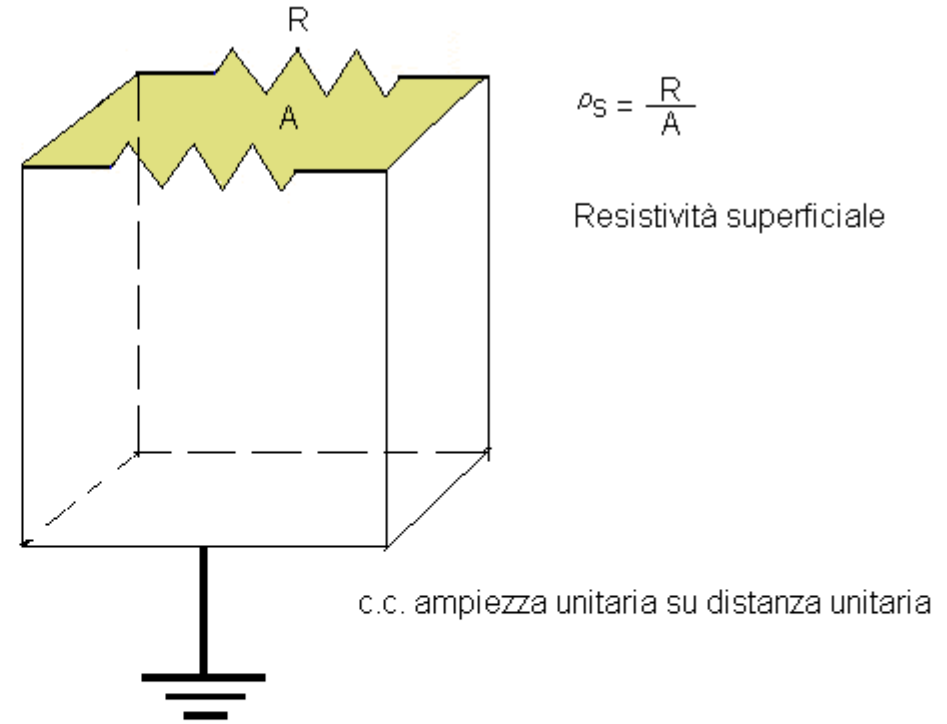
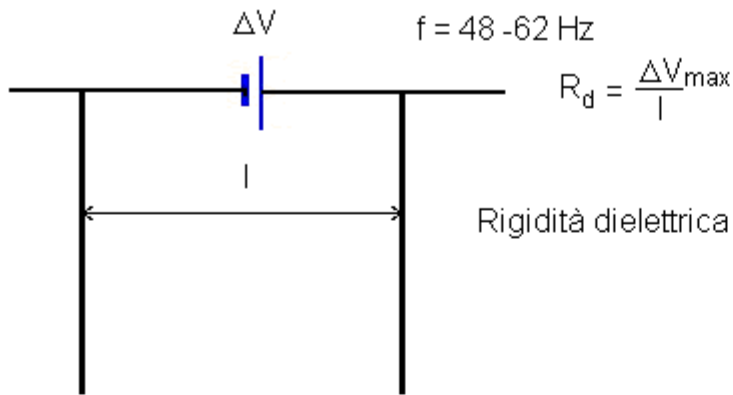
Per $I > I_c$, c'è un voltaggio finito sul superconduttore (il superconduttore sviluppa delle perdite).

Obiettivi della ricerca: operare in superconduzione a T ambiente, oppure con refrigerante industriale, p.es. azoto liquido (temperatura di liquefazione 77 K).

ISOLANTI

- Condizione necessaria, ma non sufficiente, perché un solido sia isolante è che abbia un numero di elettroni di valenza per cella unitaria pari.
- Materiali con basse perdite, nei quali $\sigma/(\omega\varepsilon) \ll 1$
- Conducibilità espressa normalmente da $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/k_B T)$, ove k_B = costante di Boltzmann, e W = energia di attivazione del processo di conduzione.
- Oltre un certo valore del campo elettrico, tale legge decade e si ha conduzione dielettrica (possibile penetrazione o distruzione del dielettrico per effetto Joule)

VARIABILI DEGLI ISOLANTI



FATTORI RIGIDITA' DIELETTICA

- Spessore, omogeneità e umidità del provino
- Dimensioni e conducibilità termica elettrodi
- Frequenza e forma d'onda tensione
- Temperatura, pressione, umidità ambiente
- Caratteristiche elettriche e termiche ambiente

- **Invecchiamento** (formazione arborescenze)
 - Artificial ageing con prove di:
 - Pioggia artificiale
 - Irradiazione UV
 - Riscaldamento
 - Umidificazione
 - Nebbia salina

MATERIALI ISOLANTI

- Plastiche e gomme (fino ad alcuni kV) (es. teflon)
- Vetro, porcellana (specie in passato)
- Materiali ceramici (es. quarzo, biossido di silicio) (non subiscono invecchiamento)

Nei trasformatori:

- Oli minerali (oli dielettrici o apiroli)
- Gas (trasformatori) (esafluoruro di zolfo: SF₆)
- Fluidi siliconici a bassa viscosità (es. dimetilsilossano)

Problema del PCB/PCT (Policloruro bifenile/trifenile) da eliminare entro il 2010 (direttiva europea 96/59) per avere trasformatori privi di alogeni

OLI MINERALI

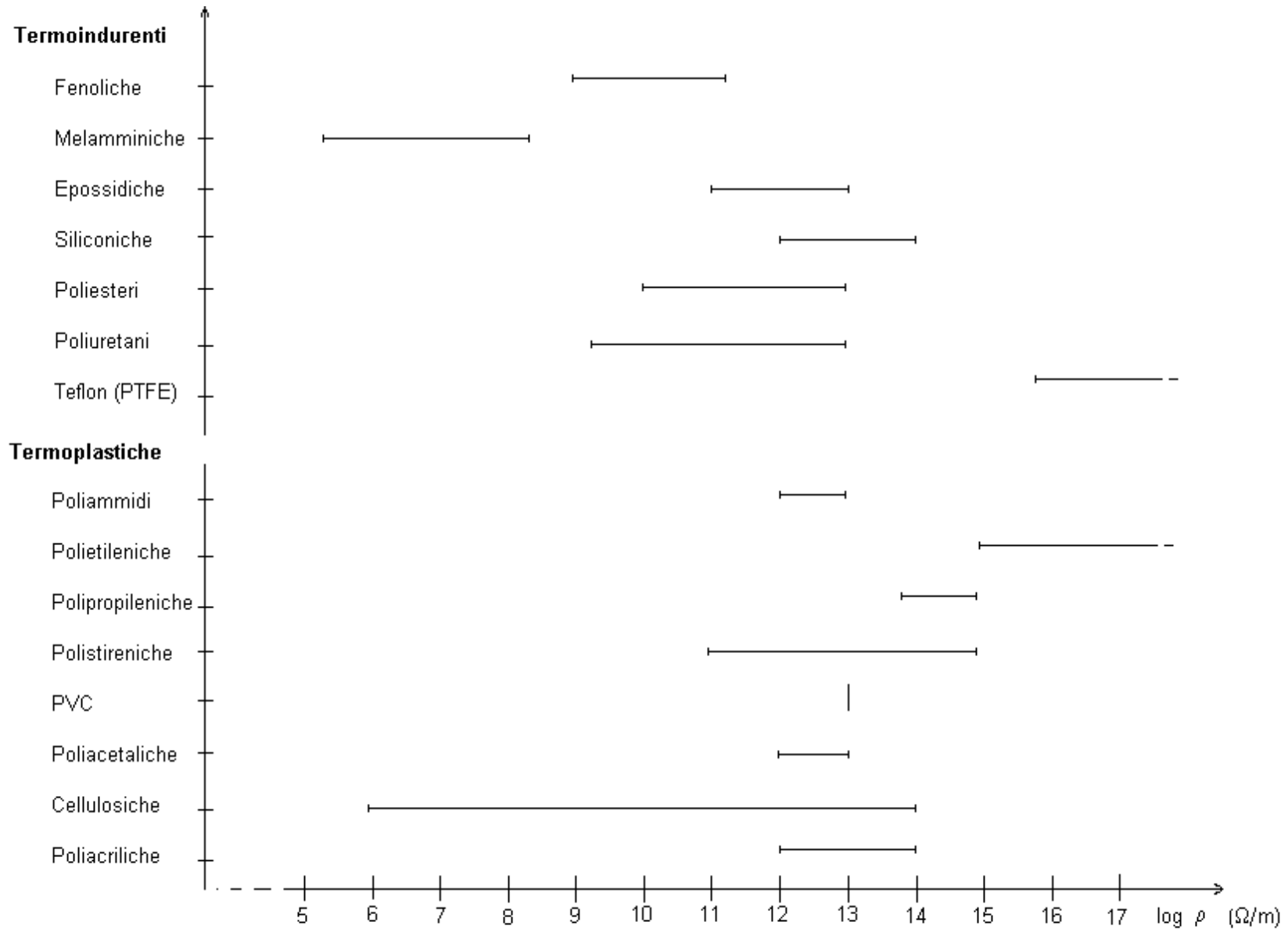
Colore ASTM D-1500	0.5
Densità (kg/dm ³)	0.870
Viscosità (cSt) a 40°C	7
Viscosità (cSt) a - 30°C	580
Punto di Infiammabilità (°C)	145
Punto di Scorrimento (°C)	- 45
Rigidità Dielettrica (kV)	40
Fattore di dissipazione (tan Delta)	0.001

Caratteristiche di un olio minerale per trasformatori

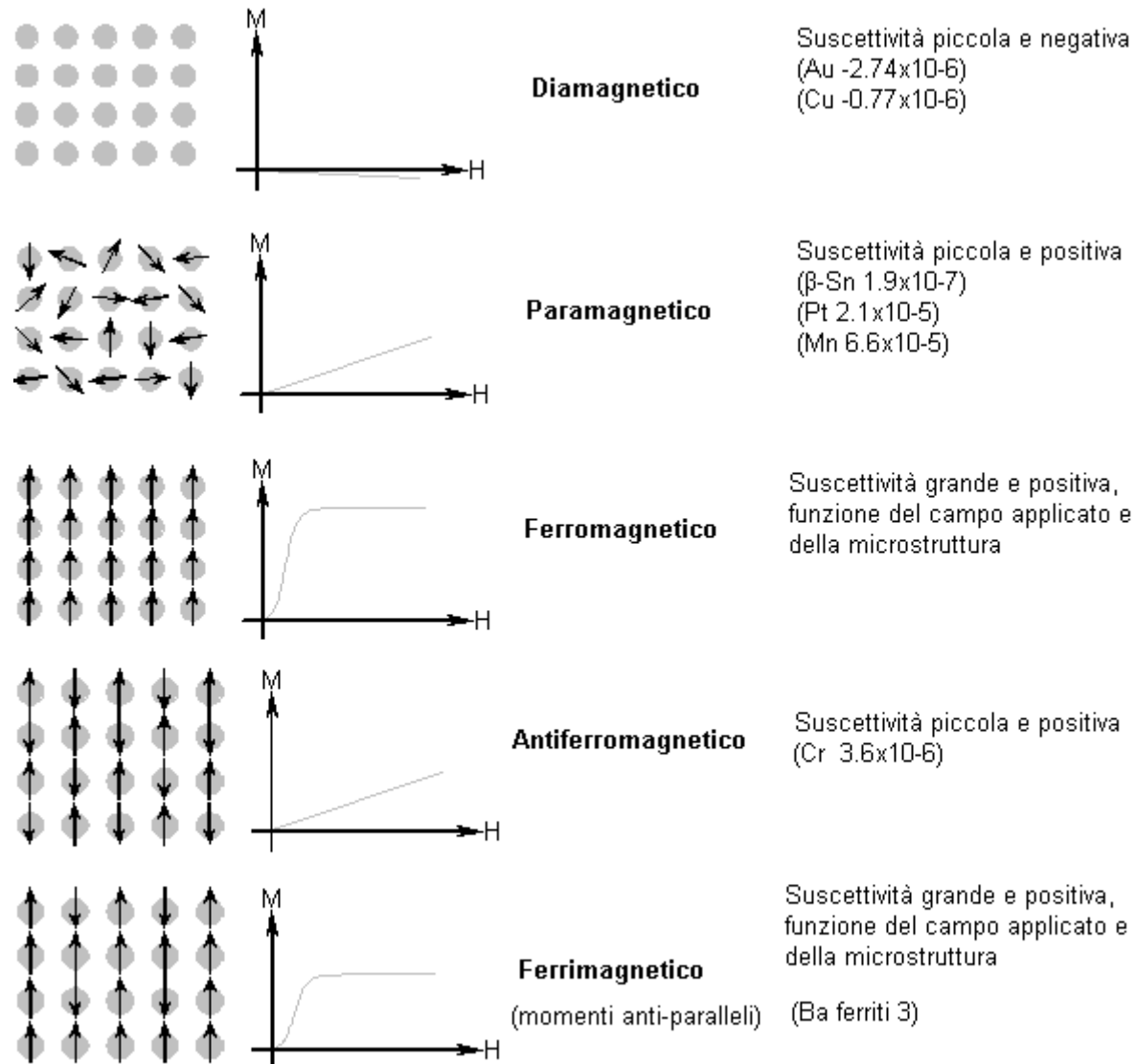
Il punto di infiammabilità è la temperatura più bassa alla quale un liquido infiammabile emette vapori in quantità tale che miscelati con l'aria possono incendiarsi in presenza di una fiamma.

Il punto di scorrimento è la temperatura più bassa alla quale un liquido può scorrere in un condotto senza bisogno di alcuna forza esterna

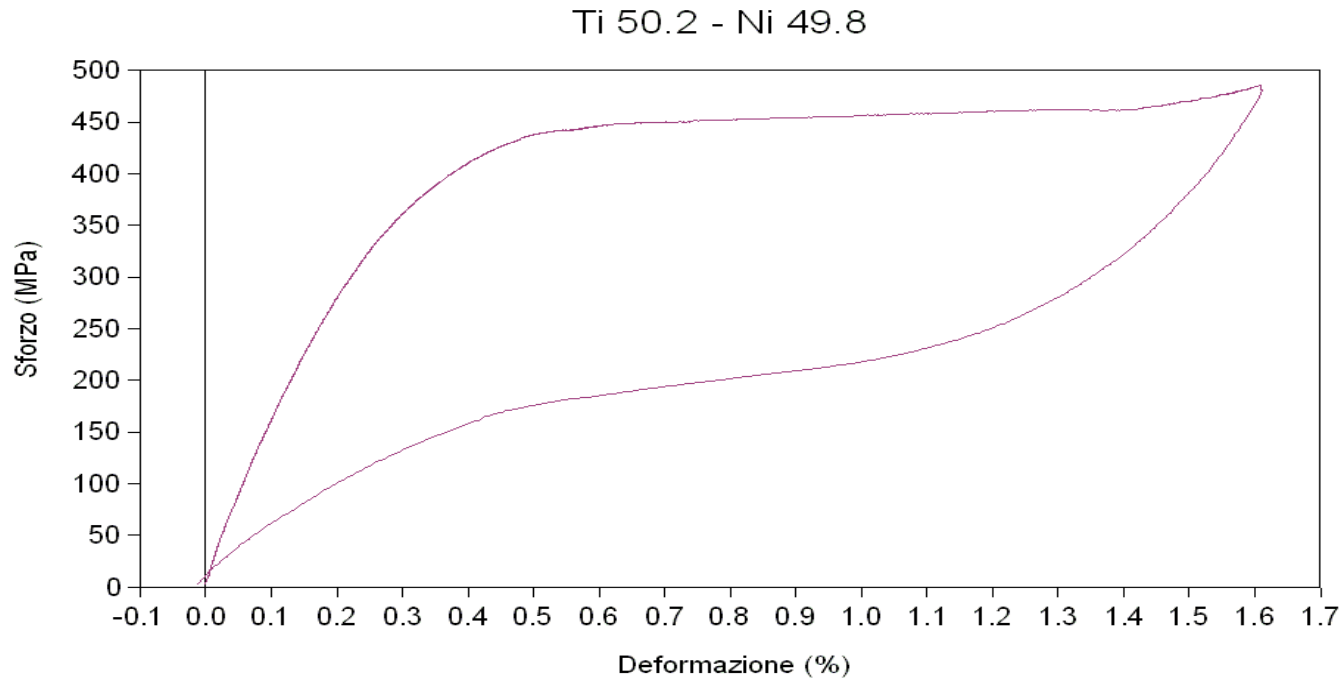
RESINE NEI DIELETTRICI



COMPORTAMENTO MAGNETICO



CONCETTO DI ISTERESI



Isteresi meccanica in un materiale a memoria di forma

La presenza di isteresi implica un ciclo energetico.
L'energia prodotta dall'isteresi può rappresentare:
una perdita (conduzione elettrica)
o un guadagno (magneti permanenti)

PERDITE NEI TRASFORMATORI

- Effetto Joule prodotto dalla corrente che scorre negli avvolgimenti (dette perdite nel rame);
- Induzione di correnti parassite nel nucleo che possono a loro volta dissipare energia per effetto Joule (dette perdite nel ferro);
- Perdita di flusso magnetico al di fuori del nucleo che può indurre correnti su oggetti vicini al trasformatore;
- Perdite per isteresi magnetica;
- Perdite per movimenti meccanici dovuti a forze magnetiche o magnetostrizione, solitamente percettibili come il classico ronzio del trasformatore;

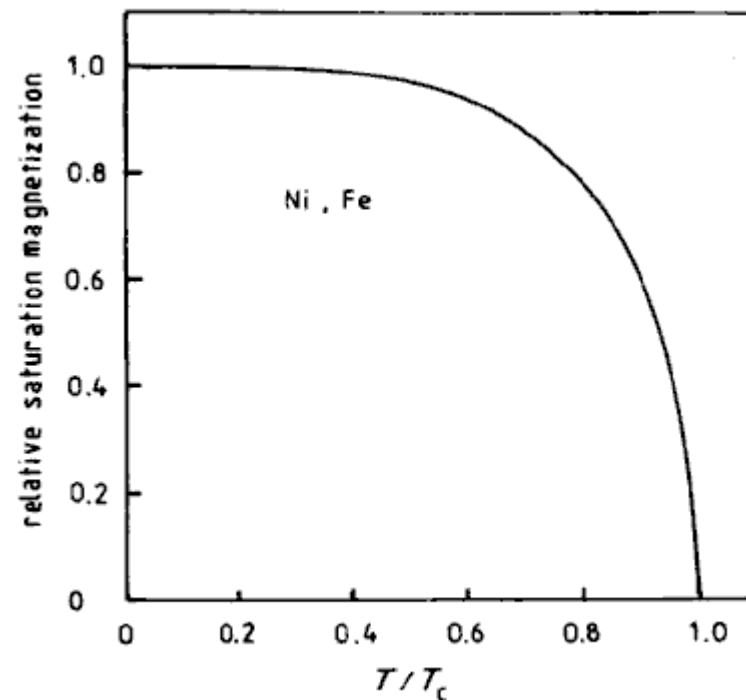
MATERIALI FERROMAGNETICI

Metallo	Conduttività (S/m) (20°C)	Permeabilità magnetica	Temperatura di fusione (°C)	Temperatura di Curie (°C)
Cobalto	$1.7 \cdot 10^7$	70-250	1493	1015
Nichel	$1.4 \cdot 10^7$	110-600	1534	353
Ferro α	$1 \cdot 10^7$	150-200000	1455	905

Caratteristiche:

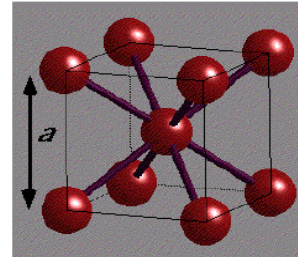
Magnetostrizione (contrazione nella direzione di magnetizzazione)

Anisotropia magnetocristallina (direzione preferenziale)

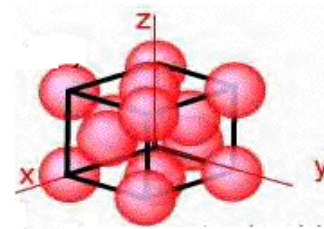


MAGNETISMO E STRUTTURA

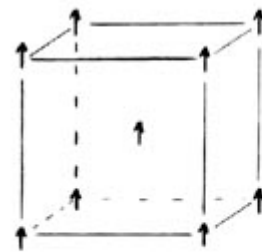
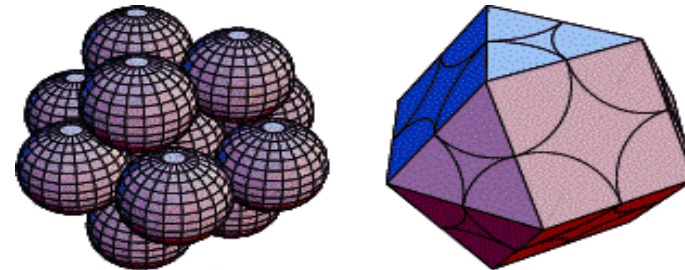
- Cubico corpo centrato (ccc)
(9 atomi per cella unitaria):
ferro α (ferrite), cromo, tungsteno, vanadio



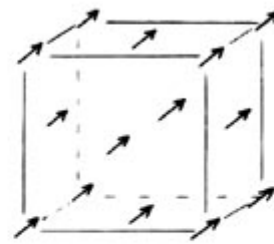
- Cubico facce centrate (cfc)
(14 atomi per cella unitaria):
nichel, ferro γ (austenite), alluminio



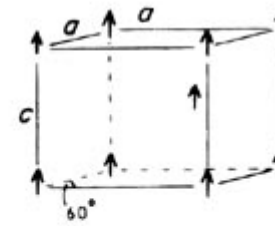
- Esagonale compatto (es.c.)
(17 atomi per cella unitaria):
cobalto, magnesio, zinco, titanio α



α -Fe, $T_c = 1043$ K



Ni, $T_c = 631$ K



Co, $T_c = 1404$ K

Ferromagnetic ordering in *bcc* α -Fe, *fcc* Ni and *hcp* Co

FERROMAGNETICI IN USO

Materiali a bassa coercitività (magneti dolci, per trasformatori):

permalloy (lega ferro-nichel 20/80 o 45/55, oppure 17/81 con 2% di molibdeno)

isoperm (ferro-nichel 50/50)

ferro puro

acciai a basso tenore di carbonio,

leghe ferro-silicio, ferro-cobalto, ferro-alluminio-silicio

materiali amorfi ottenuti per solidificazione ultrarapida.

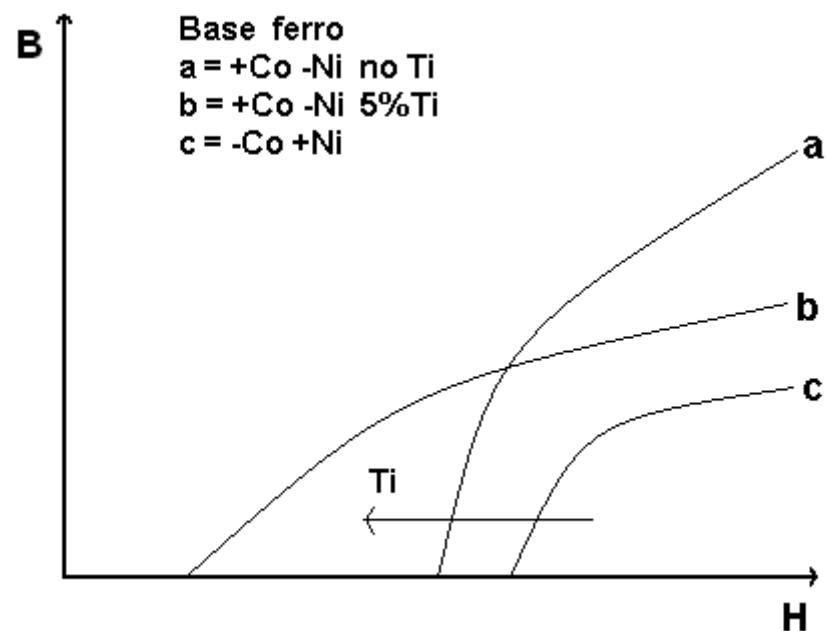
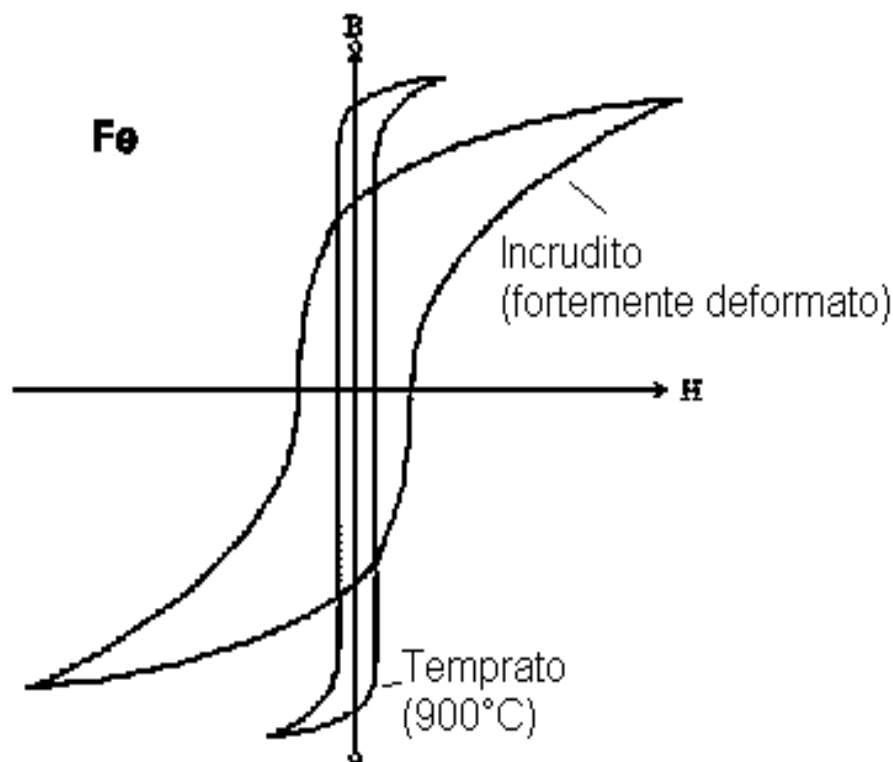
Materiali ad alta coercitività (magneti duri, per magneti permanenti):

Leghe ferrose Alnico (con alluminio, nichel e cobalto ed a volte rame e titanio)

Acciai martensitici

Composti intermetallici contenenti terre rare e metalli di transizione.

MODIFICHE CICLO ISTERESI



Effetto del titanio su una lega per magneti

Il ciclo di isteresi può essere modificato agendo sulle proprietà meccaniche del materiale (tempra, incrudimento) oppure cambiando la composizione chimica della lega