

$$B = \mu_0 (H + M). \quad \vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H};$$

I materiali di tipo diamagnetico in assenza di campi esterni presentano un momento magnetico nullo. Si ha una compensazione tra il momento magnetico degli elettroni e dei singoli atomi.

In presenza di un campo magnetico esterno intenso il materiale presenta una magnetizzazione complessiva che si oppone al campo magnetico esterno dovuta ad una mancata compensazione tra i due momenti magnetici a carattere smagnetizzante.

In tal caso la suscettività è negativa. Quindi la magnetizzazione del materiale espressa come:

$$\bar{M} = \chi_M H$$

Dove la suscettività assume valori dell'ordine di -10^{-4}

I materiali di tipo paramagnetico in assenza di campi esterni presentano un momento magnetico nullo.

In presenza di un campo magnetico esterno intenso il materiale presenta una magnetizzazione complessiva dovuta ad un allineamento parziale dei dipoli magnetici con il campo magnetico esterno a carattere magnetizzante.

In tal caso la suscettività è positiva. Quindi la magnetizzazione del materiale espressa come:

$$\bar{M} = \chi_M H$$

Dove la suscettività assume valori dell'ordine di 10^{-6}

I materiali da un punto di vista del loro comportamento in presenza di campi magnetici si definiscono:

Diamagnetici;

Paramagnetici;

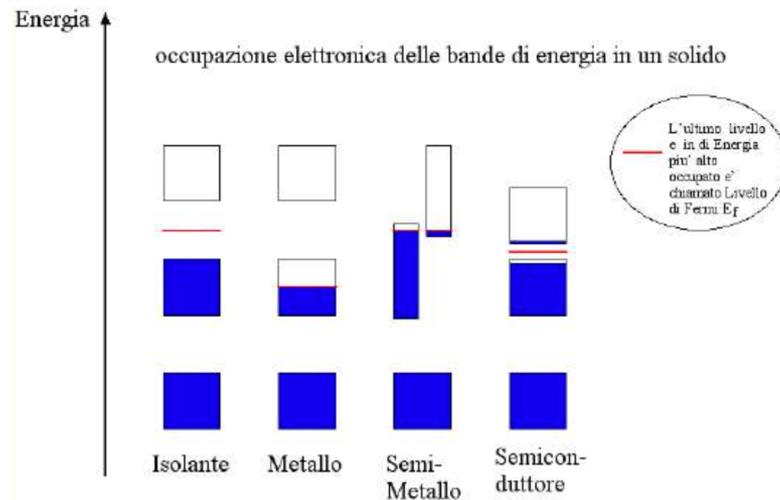
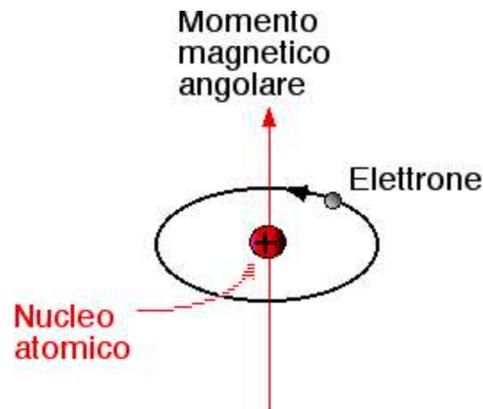
Ferromagnetici;

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89 Ac																
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		

Ferromagnetic
 Antiferromagnetic
 Paramagnetic
 Diamagnetic

Elementi e relativo tipo di magnetismo a temperatura ambiente.

I materiali presentano una struttura nella quale possiamo individuare dei circuiti elettrici a livello atomico il cui comportamento da un punto di vista magnetico dipende dall'occupazione delle bande di energia



I materiali in presenza di una campo magnetico H contribuiscono alla definizione del campo magnetico risultante in virtù della loro intensità di magnetizzazione M ;

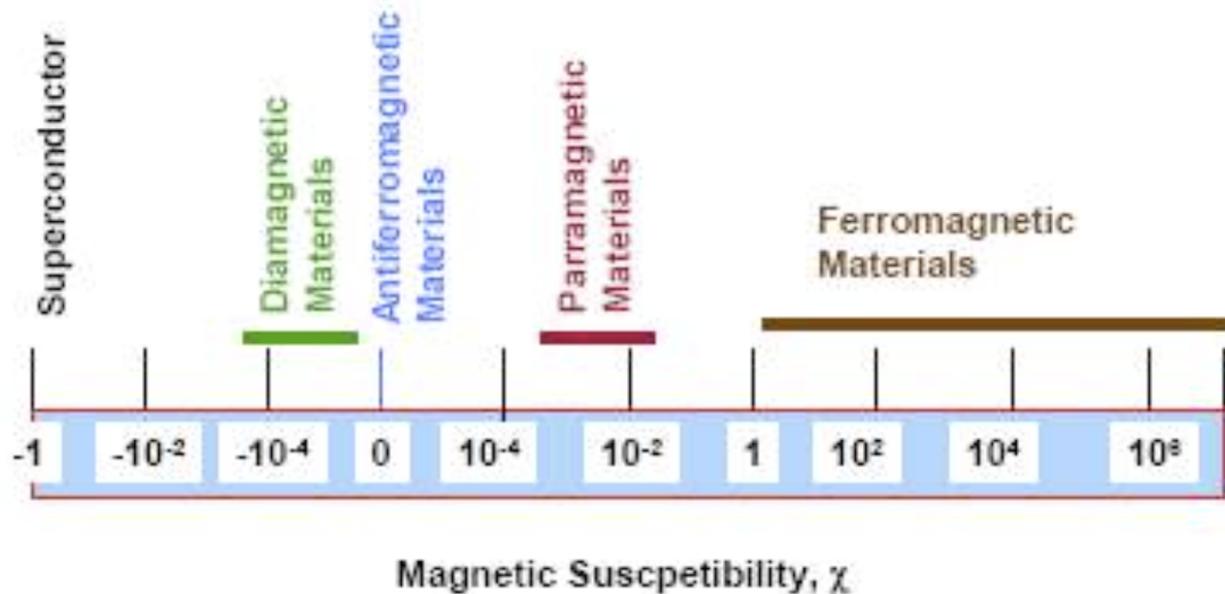
In presenza di materia la relazione tra B e H cambia rispetto al vuoto

$$B = \mu_0 H + M$$

$$M = \chi H \quad \chi \text{ suscettività magnetica}$$

$$B = \mu H = (\mu_0 + \chi) H$$

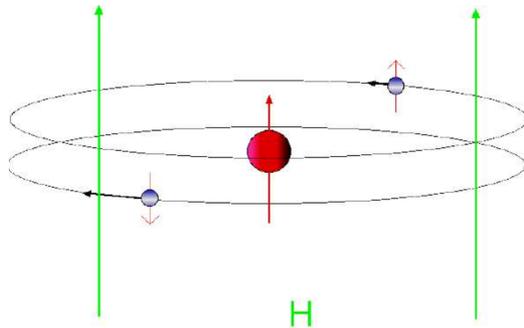
$$\mu_r = \mu / \mu_0 = (1 + \chi / \mu_0)$$



I materiali Diamagnetici presentano una suscettività debolmente negativa.

In condizioni di assenza di H

- gli elettroni occupano completamente fino all'ultimo livello energetico hanno momento angolare complessivo **nullo**;
- elettroni accoppiati hanno **spin controrotanti** lungo le orbite;
- correnti microscopiche associate al moto degli elettroni nell'atomo danno luogo a momenti magnetici che si compensano.



In presenza di H:

- $F=evB$ aumenta la velocità di un elettrone e riduce quella dell'altro e per la legge di Faraday nasce un campo che si oppone alla perturbazione
- contribuiscono tutti gli elettroni sotto il livello di Fermi
- **Scompare quando H va a zero**

<i>Diamagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (volume) (SI units)
Aluminum oxide	-1.81×10^{-5}
Copper	-0.96×10^{-5}
Gold	-3.44×10^{-5}
Mercury	-2.85×10^{-5}
Silicon	-0.41×10^{-5}
Silver	-2.38×10^{-5}
Sodium chloride	-1.41×10^{-5}
Zinc	-1.56×10^{-5}

I materiali Paramagnetici presentano una suscettività debolmente positiva.

In condizioni di assenza di H

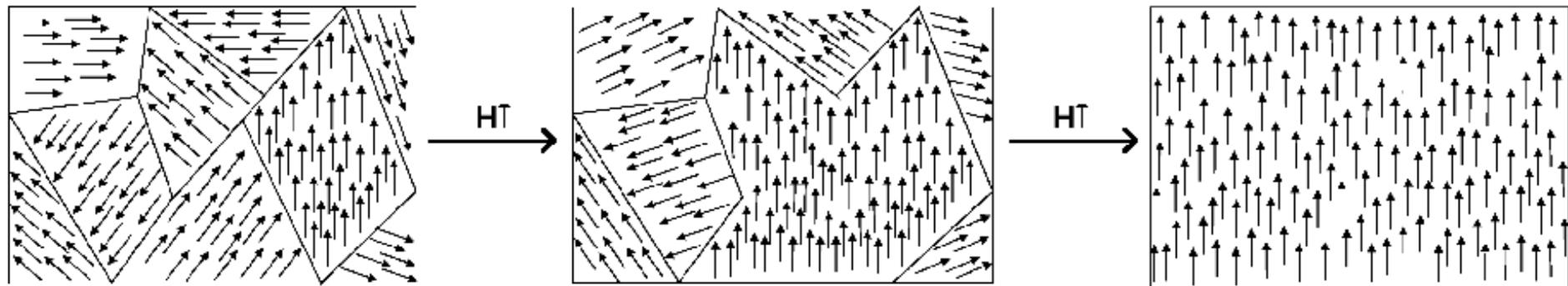
- C'è un elettrone spaiato;
- A temperatura ambiente gli spin a causa dell'agitazione termica presentano delle orientazioni casuali e il momento magnetico complessivo è nullo

In presenza di H:

- si produce una debole magnetizzazione concorde con il campo magnetico applicato
- **Scompare quando H va a zero**

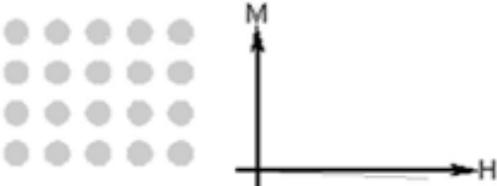
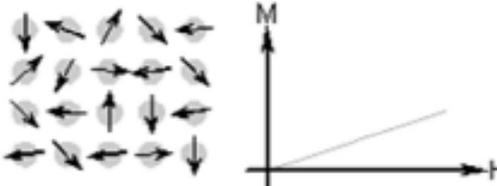
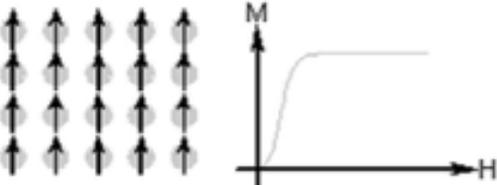
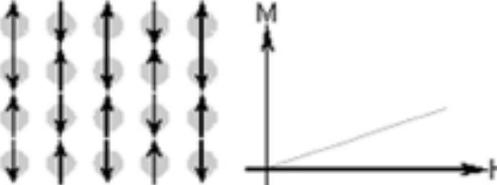
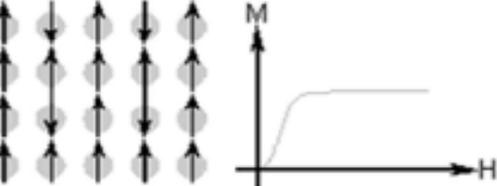
<i>Paramagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (volume) (SI units)
Aluminum	2.07×10^{-5}
Chromium	3.13×10^{-4}
Chromium chloride	1.51×10^{-3}
Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Molybdenum	1.19×10^{-4}
Sodium	8.48×10^{-6}
Titanium	1.81×10^{-4}
Zirconium	1.09×10^{-4}

I materiali di tipo ferromagnetico presentano un comportamento magnetico particolare. Allo stato nativo son presenti dei domini, detti di Weiss di dimensione dai 10^{-3} a 10^{-6} m. Tali domini presentano M orientati in modo da produrre una magnetizzazione macroscopicamente nulla.

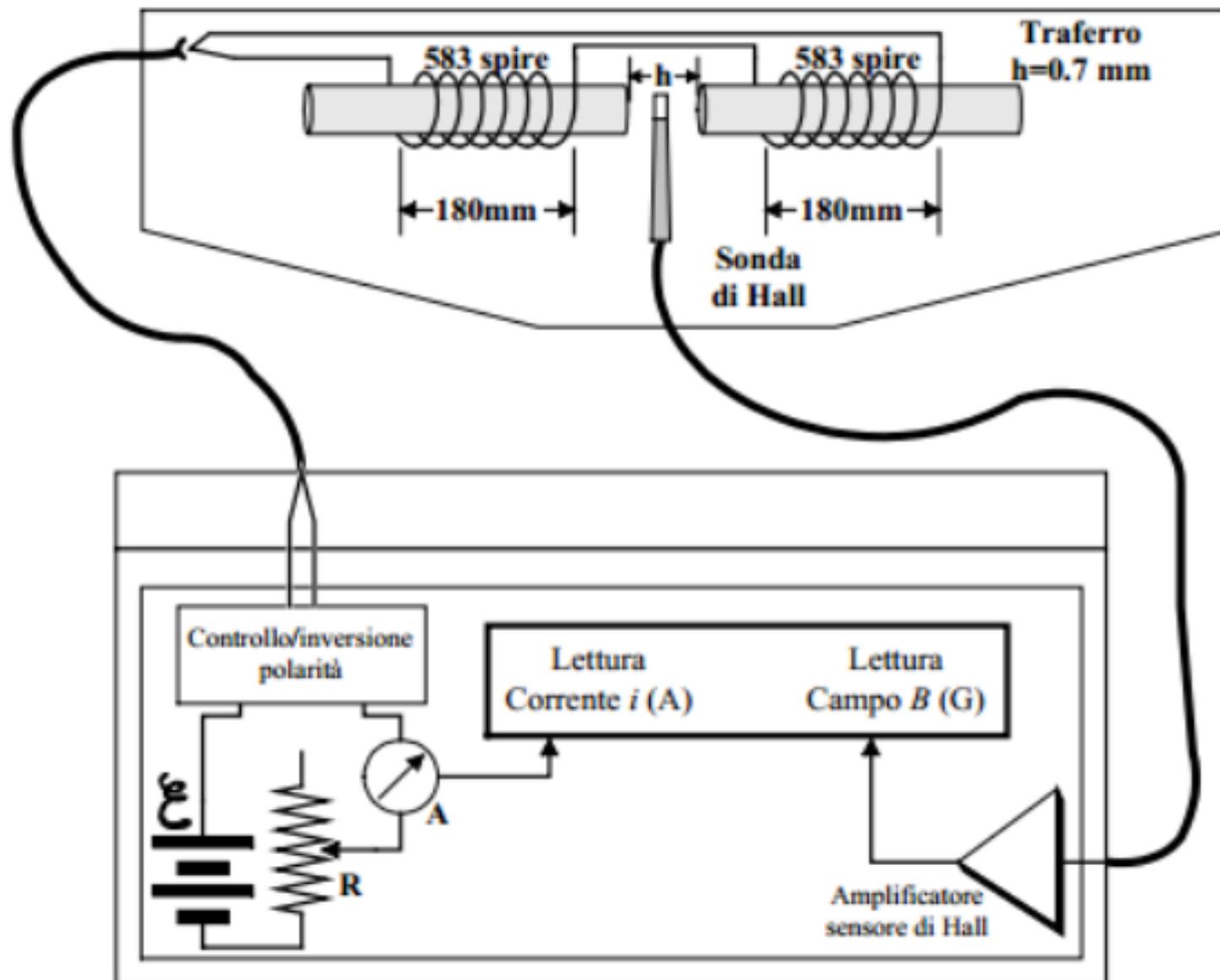


Sotto l'azione di un campo magnetico esterno i domini si orientano in modo da produrre una magnetizzazione. Nel caso di annullamento del campo magnetico esterno i domini conservano il proprio orientamento generando un campo magnetico.

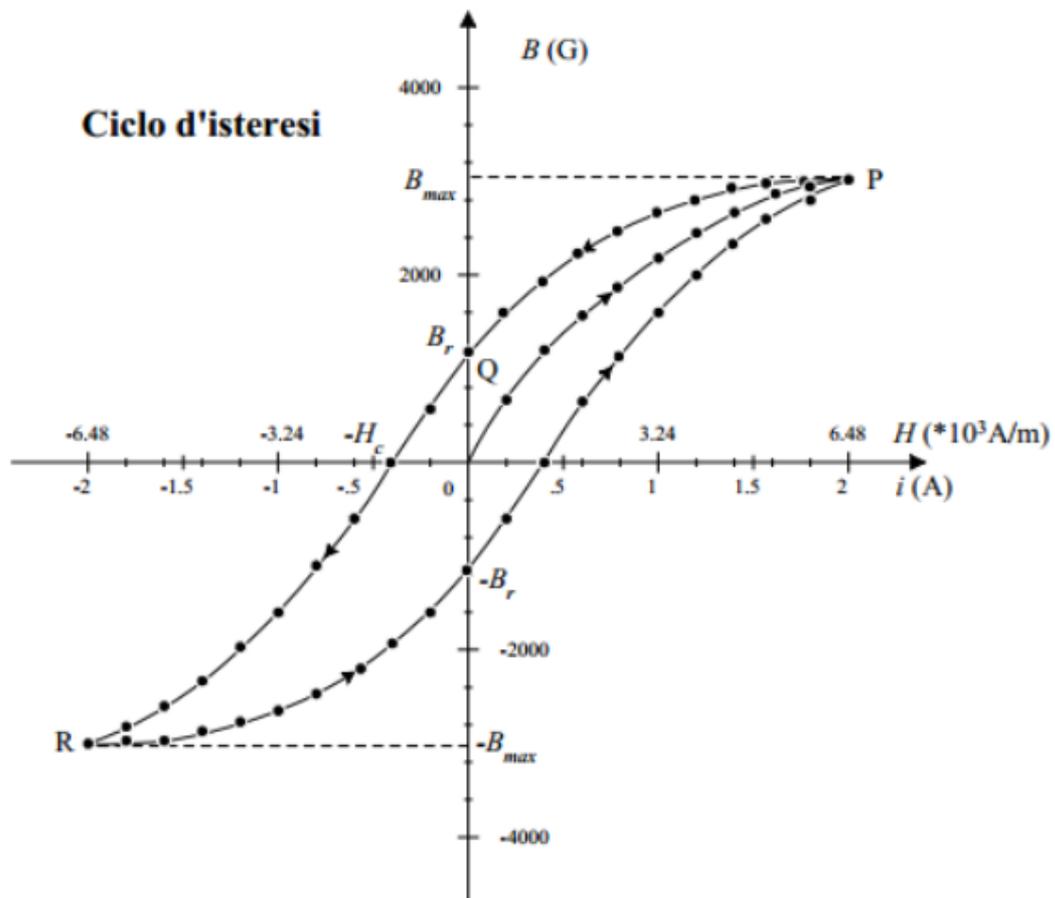
In questo caso la suscettività assume valori molto elevati dell'ordine di

Type of Magnetism	Susceptibility	Atomic / Magnetic Behaviour		Example / Susceptibility
Diamagnetism	Small & negative.	Atoms have no magnetic moment		Au Cu -2.74×10^{-6} -0.77×10^{-6}
Paramagnetism	Small & positive.	Atoms have randomly oriented magnetic moments		β -Sn Pt Mn 0.19×10^{-6} 21.04×10^{-6} 66.10×10^{-6}
Ferromagnetism	Large & positive, function of applied field, microstructure dependent.	Atoms have parallel aligned magnetic moments		Fe $\sim 100,000$
Antiferromagnetism	Small & positive.	Atoms have mixed parallel and anti-parallel aligned magnetic moments		Cr 3.6×10^{-6}
Ferrimagnetism	Large & positive, function of applied field, microstructure dependent	Atoms have anti-parallel aligned magnetic moments		Ba ferrite ~ 3

Schema del dispositivo



Ciclo d'isteresi



Caratteristica di prima magnetizzazione

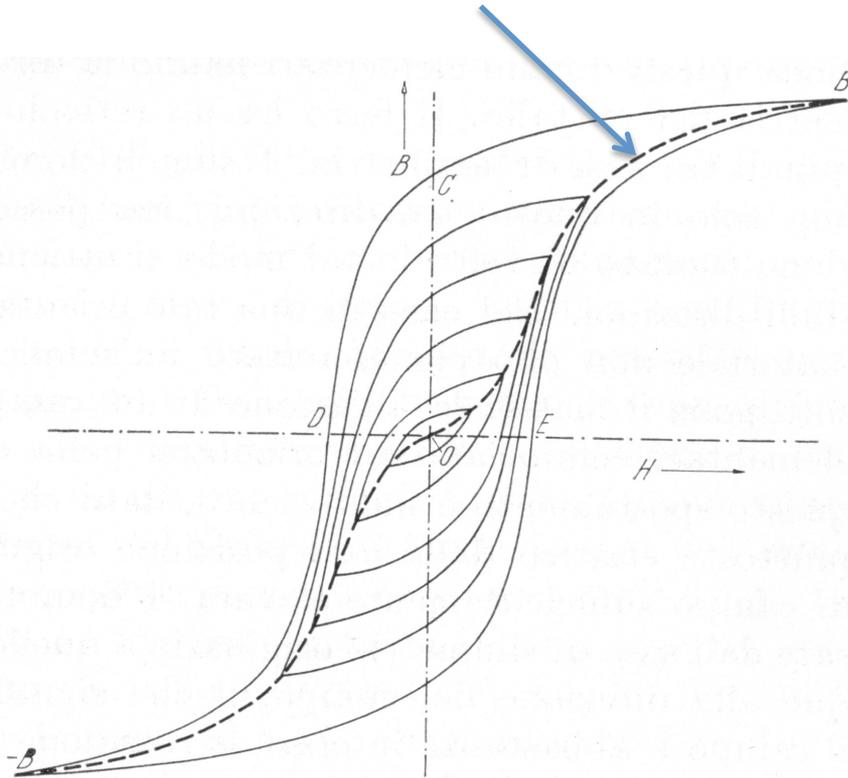


Fig. 6-1. - Cicli di isteresi di materiali ferromagnetici nel caso di magnetizzazione ciclica con diverse intensità di campo; rilievo della curva di prima magnetizzazione.

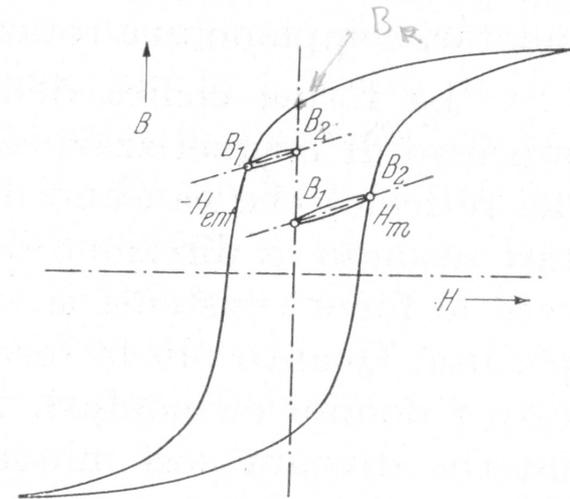
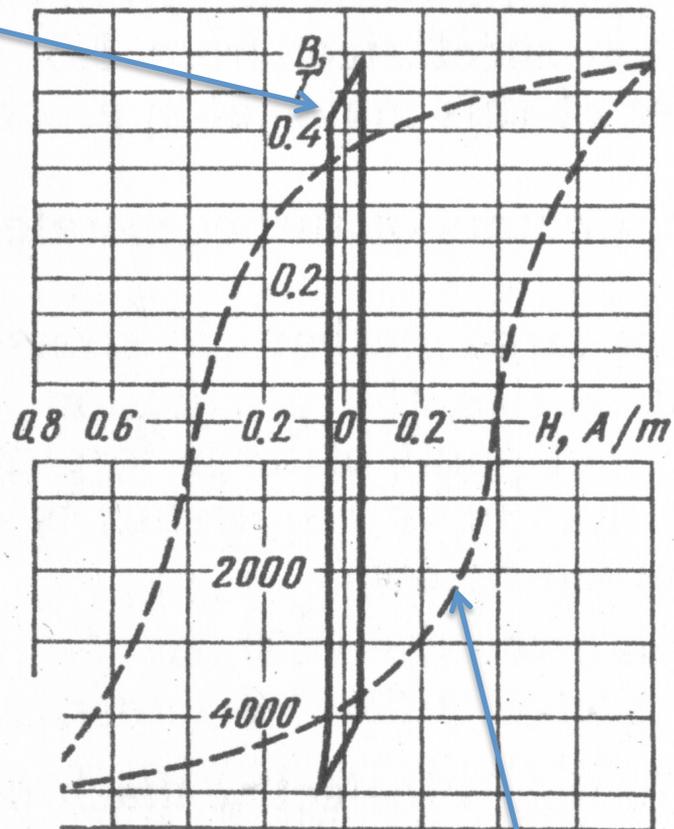


Fig. 6-2. - Come fig. 6-1, ma con magnetizzazione variabile entro i limiti 0 e H_m e 0 e $-H_{ent}$.

Materiali Ferromagnetici dolci:
Elevata permeabilità Magnetica e basso campo coercitivo

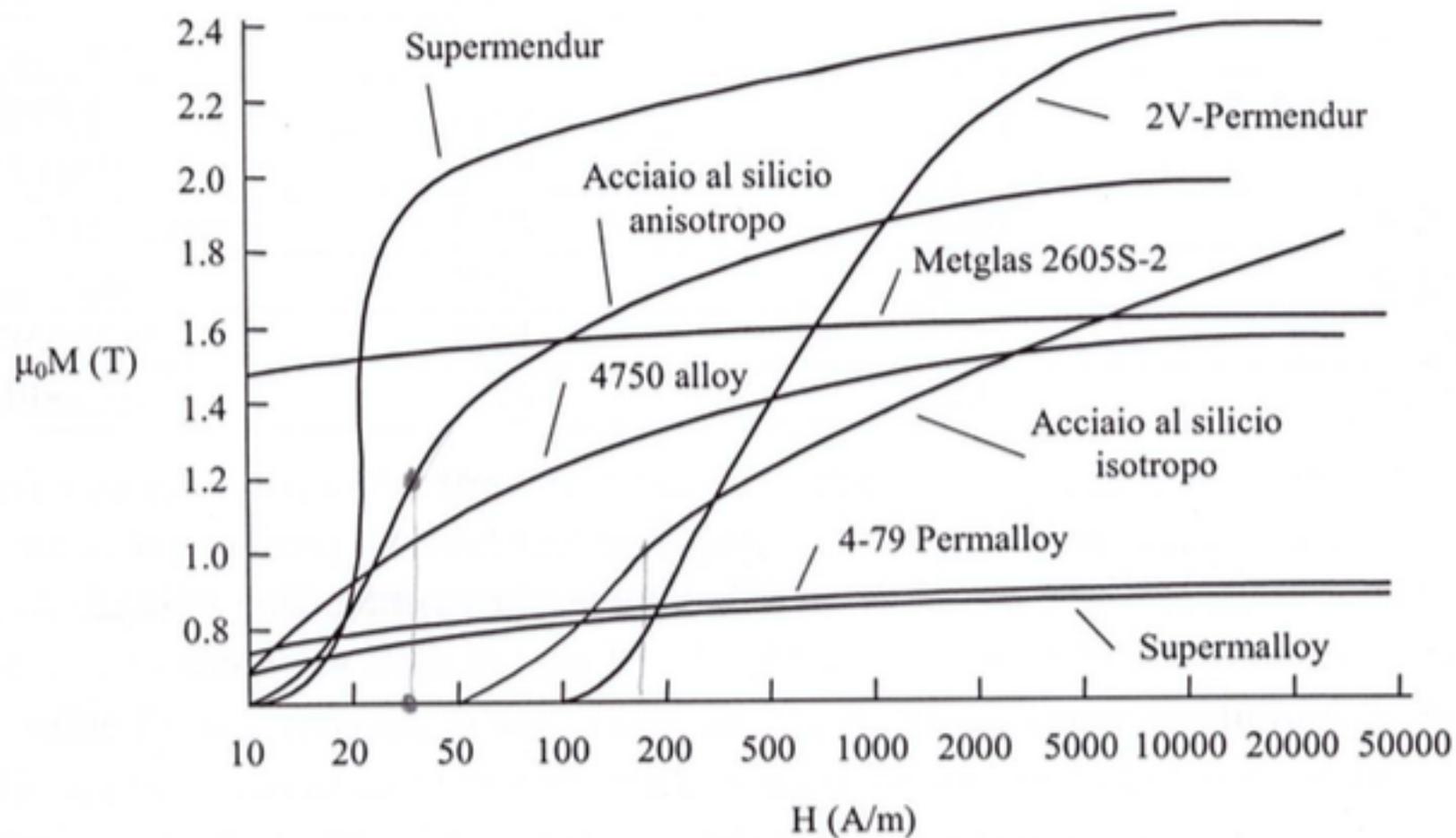


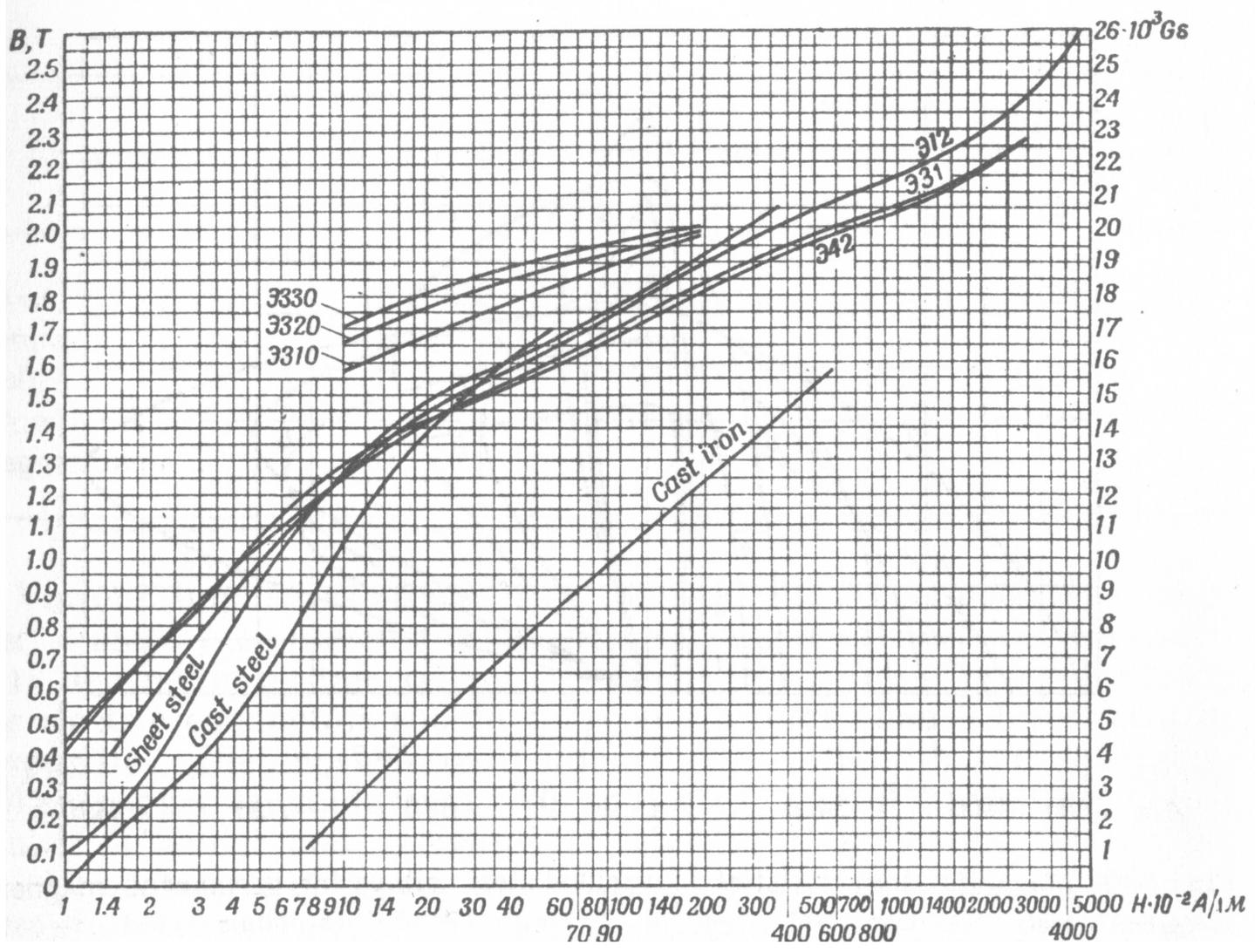
Materiali Ferromagnetici duri:
Elevata Induzione residua e campo coercitivo

Nome	Composizione	μ_r		$P_{m(s)}$ (T)	B_r (T)	H_c (A/m)	σ (S/m)
		iniziale	max				
Cobalto	Co 99.9%	10	175	1.79	0.31	1000	$1.5 \cdot 10^7$
Nichel	Ni 99.9%	400	1100	0.61	0.33	130	$1.4 \cdot 10^7$
Ferro (puro)	Fe 99.9%	10^4	$2 \cdot 10^5$	2.16	1.2	4	$1 \cdot 10^7$
Acciaio (Low Carbon)	Fe 99.5%	200	5000	2.16	1.2	80	$9.5 \cdot 10^6$
Ghisa	Fe, C 1.8÷4.5%	70	600	2.1	1.4	500	$1.1 \cdot 10^6$
Ferro al Silicio (isotropo)	Fe, Si 3%	500	7000	2.14	0.8	40	$2 \cdot 10^6$
Ferro al Silicio (anisotropo)	Fe, Si 3%	1400	$5 \cdot 10^4$	2.14	1.2	7	$2 \cdot 10^6$
4750 alloy	Fe, Ni 48%	$1.1 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	1.55	0.8	2	$2.1 \cdot 10^6$
Permalloy	Ni, Fe 22%	10^4	$5 \cdot 10^4$	1.08	0.6	4	$1.8 \cdot 10^6$
4-79 Permalloy	Ni, Fe 17%, Mo 4%	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	0.8	0.4	1	$1.7 \cdot 10^6$
Supermalloy	Ni, Fe 15%, Mo 5%, Mn 0.5%	10^5	$4 \cdot 10^5$	0.78	0.6	0.4	$1.5 \cdot 10^6$
2V - Permendur	Fe, Co 49%, V 2%	800	$4 \cdot 10^5$	2.4	1.5	400	$4 \cdot 10^6$
Supermendur (elevata purezza)	Fe, Co 49%, V 2%	800	$1 \cdot 10^5$	2.4	2.2	16	$2.5 \cdot 10^6$
Metglas 2605SC	$Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$	-	$3 \cdot 10^5$	1.6	1.4	3	$8 \cdot 10^5$
Metglas 2605S-2	$Fe_{78}B_{13}Si_9$	-	$6 \cdot 10^5$	1.6	1.3	2	$8 \cdot 10^5$
MnZn Ferrite	H5C2 (codice TDK)	10000	-	0.4	0.09	7	6.6
MnZn Ferrite	H5E (codice TDK)	18000	-	0.4	0.12	3	20
NiZn Ferrite	K5 (codice TDK)	290	-	0.3	0.25	80	$5 \cdot 10^{-6}$

Alcuni materiali
ferromagnetici dolci

Caratteristiche di prima magnetizzazione di materiali dolci





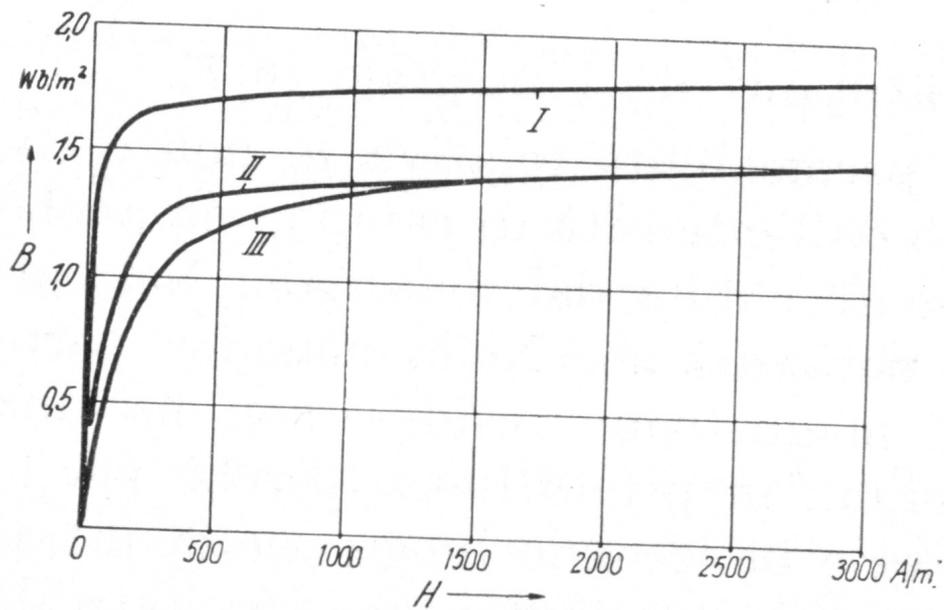


Fig. 6-4. - Curve di magnetizzazione di lamierini laminati a freddo nella direzione longitudinale (I) e in quella trasversale (II) (produzione americana); lamierini laminati a caldo (III) (produzione svedese).

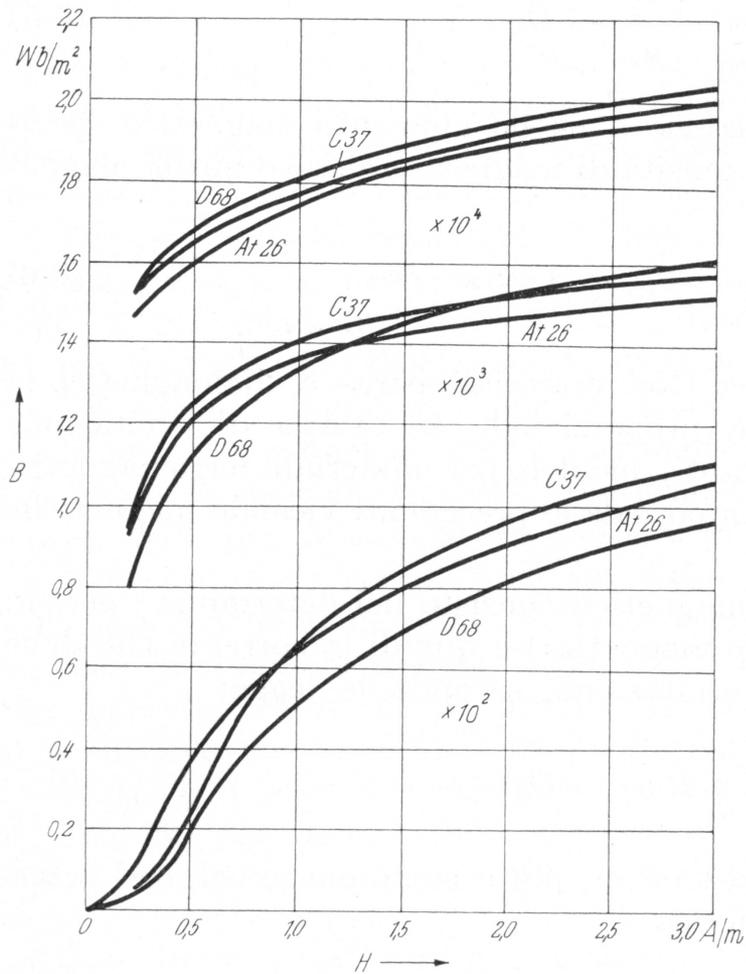


Fig. 6-3. - Curva di magnetizzazione di lamierini al silicio laminati a caldo (produzione svedese).

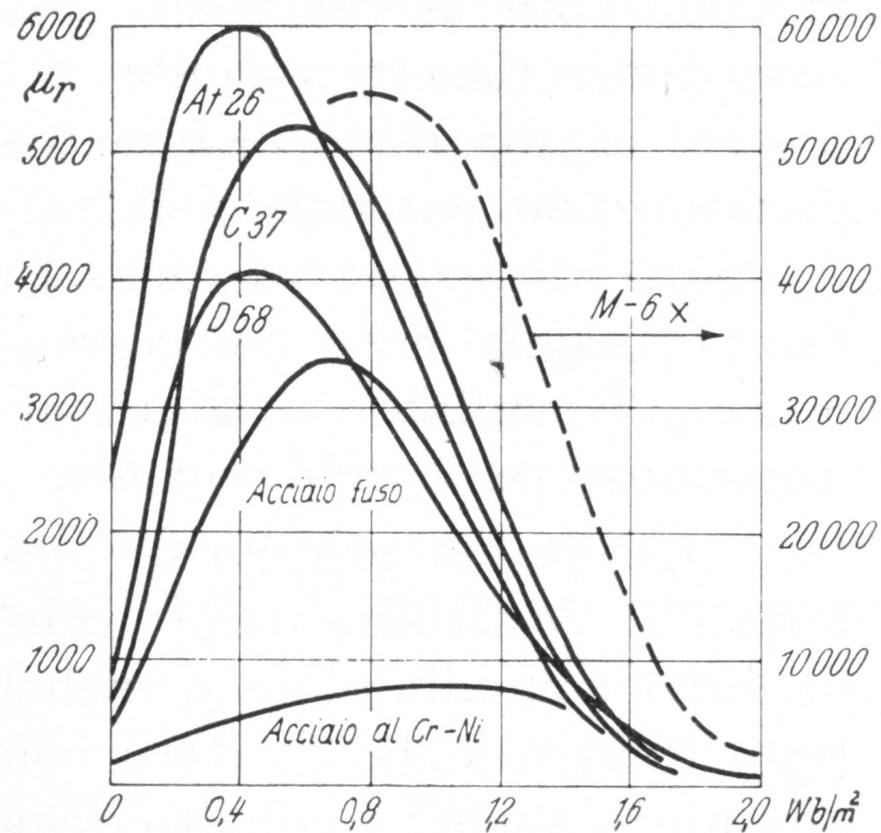


Fig. 6-5. - Curve di permeabilità relativa per diversi tipi di lamiera.

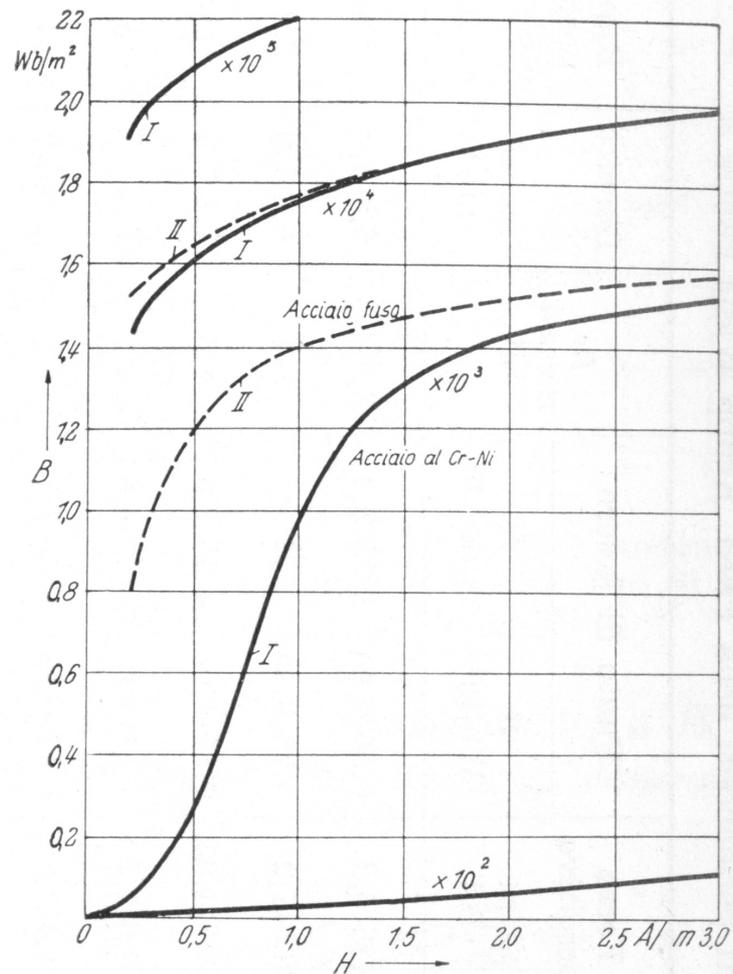
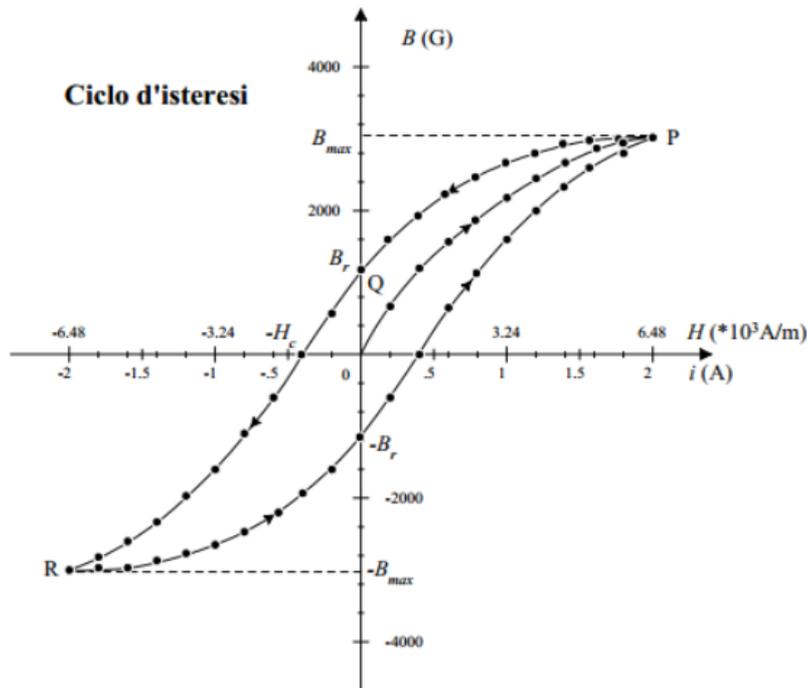


Fig. 6-6. - Curve di magnetizzazione di acciaio al cromo-nichel (I) e di acciaio fuso (II).

Perdite per isteresi

Le perdite per isteresi sono connesse alla magnetizzazione del materiale. Considerando un processo ciclico di magnetizzazione che ci porta da valore P (Hmax, Bmax) ad R e poi a P il lavoro compiuto è pari all'integrale dell'energia magnetica.



L'integrale è non nullo ed è pari all'area interna al ciclo.

Questa viene rappresentata dalla

$$E_{ist} = K_{ist} B_M^n$$

n varia tra 1,6 e 2

Perdite per isteresi

Le perdite per isteresi sono connesse alla magnetizzazione del materiale.

Esse dipendono :

- Dal tipo di materiale
- Dal valore dell'induzione massima
- Dalla frequenza

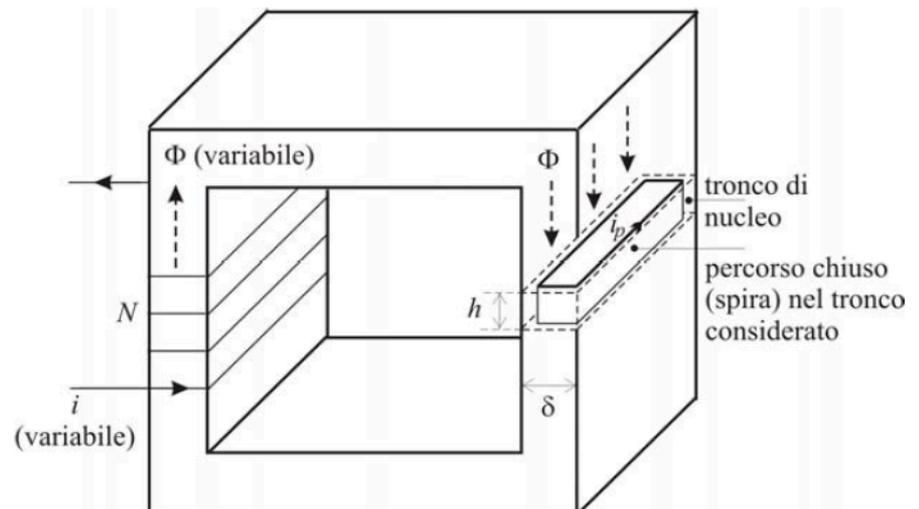
Formula di i Steinmetz $P_{ist} = K_{ist} \cdot f \cdot B_M^n \cdot V$

Le perdite specifiche vengono espresse in W/kg e rappresentano le perdite per isteresi per unità di peso di materiale

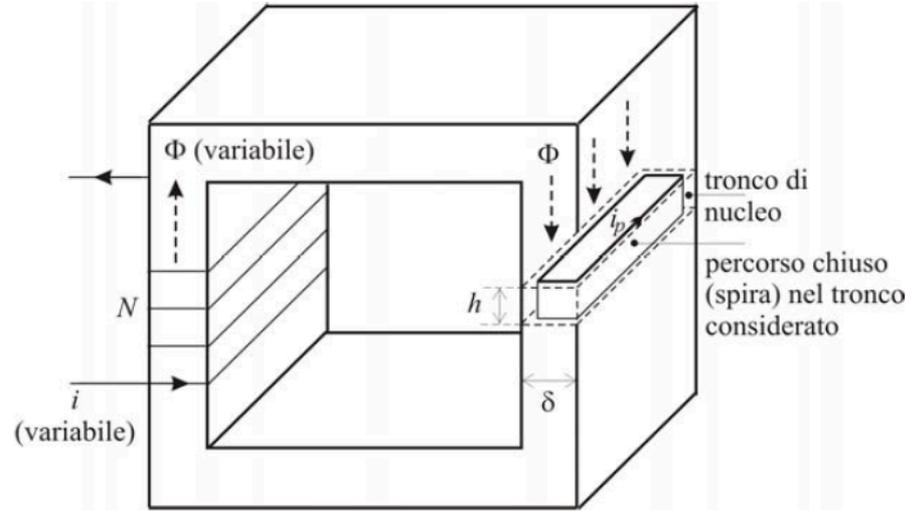
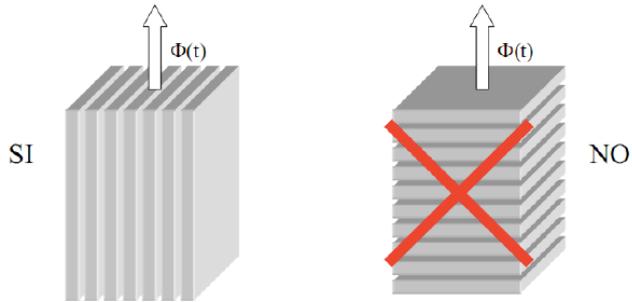
Perdite per correnti parassite

$$P_{cp} = \frac{e^2}{R} = \frac{(\omega \cdot B_M \cdot A)^2}{R} = \frac{(2\pi f \cdot B_M \cdot \delta \cdot l)^2}{\rho \cdot \frac{2l}{h \cdot \delta}}$$

$$P_{cp} = \frac{2\pi^2}{\rho} (f \cdot B_M \cdot \delta)^2 \cdot V = K_{cp} \cdot f^2 \cdot B_M^2 \cdot V$$



Perdite per correnti parassite



$$P_{cp} = \frac{e^2}{R} = \frac{(\omega \cdot B_M \cdot A)^2}{R} = \frac{(2\pi f \cdot B_M \cdot \delta \cdot l)^2}{\rho \cdot \frac{2l}{h \cdot \delta}}$$

$$P_{cp} = \frac{2\pi^2}{\rho} (f \cdot B_M \cdot \delta)^2 \cdot V = K_{cp} \cdot f^2 \cdot B_M^2 \cdot V$$

Materiali utilizzati per ridurre le perdite per correnti parassite

Per ridurre le perdite per correnti parassite

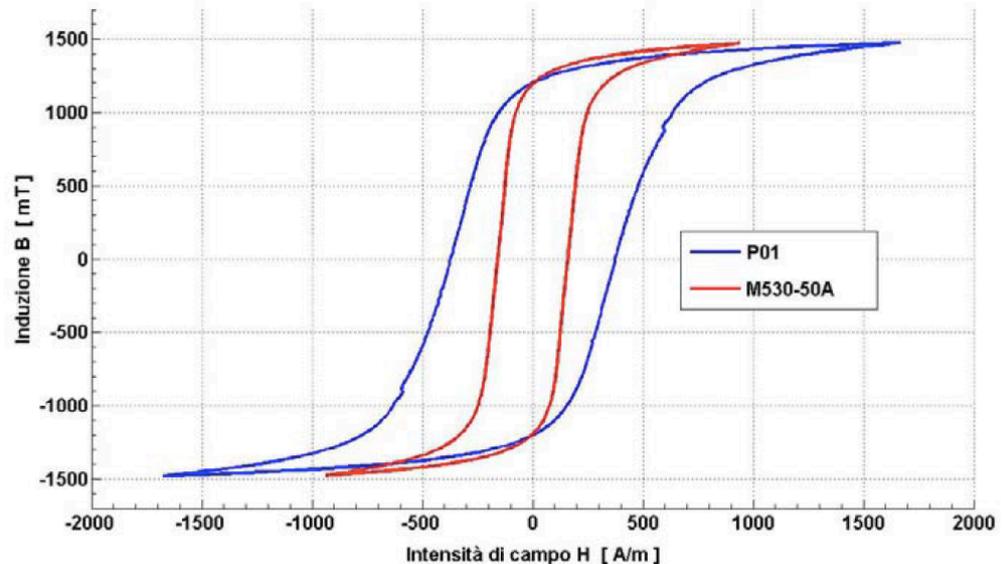
- Laminazione nella direzione di evoluzione delle linee di flusso (gli spessori dei lamierini magnetici commerciali sono compresi tra 0,35 e 0,5 mm)
- Utilizzo di leghe ferromagnetiche al silicio

Perdite complessive specifiche nel ferro

$$\frac{P_{fe}}{V} = K_{cp} f^2 B_M^2 + K_{ist} f B_M^2$$

Quali sono i vantaggi delle leghe Ferro-Silicio ?

Confronto tra le caratteristiche dinamiche di due lamierini ferro P01 (spessore 0,65 mm) lega ferro silicio M530-50 A (spessore 0,5 mm) Frequenza 50 Hz



Materiali utilizzati per ridurre le perdite per correnti parassite

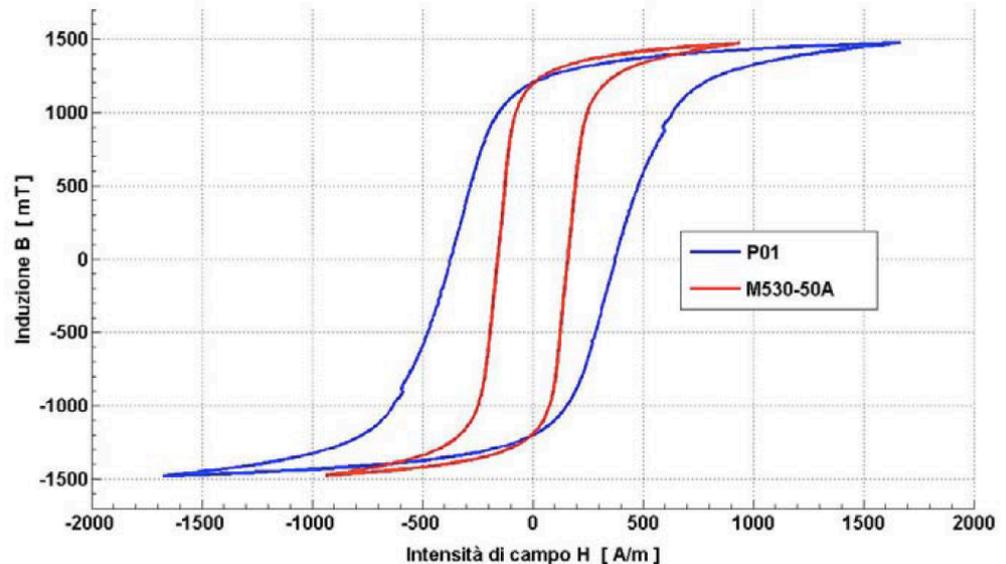
Per ridurre le perdite per correnti parassite

- Laminazione nella direzione di evoluzione delle linee di flusso (gli spessori dei lamierini magnetici commerciali sono compresi tra 0,35 e 0,5 mm)
- Utilizzo di leghe ferromagnetiche al silicio

Quali sono i vantaggi delle leghe Ferro-Silicio ?

Confronto tra le caratteristiche dinamiche di due lamierini :

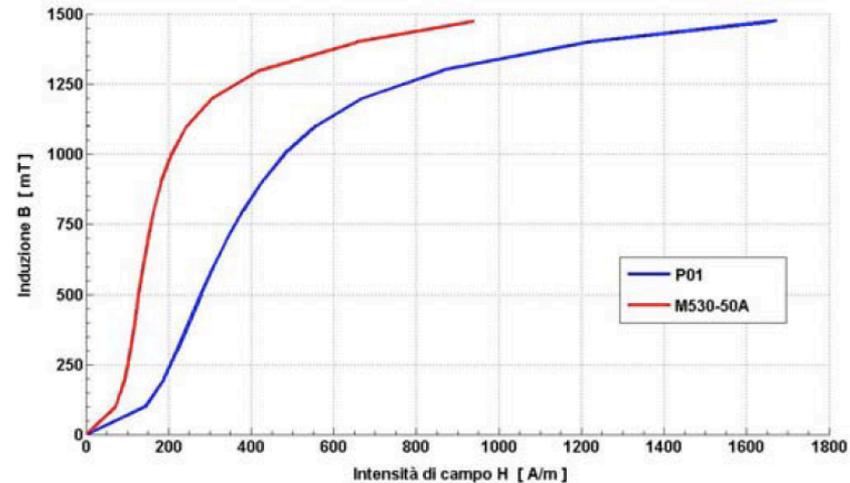
- Ferro P01 (spessore 0,65 mm)
- lega ferro silicio M530-50 A (spessore 0,5 mm)
- Frequenza: 50 Hz



Quali sono i vantaggi delle leghe Ferro-Silicio ?

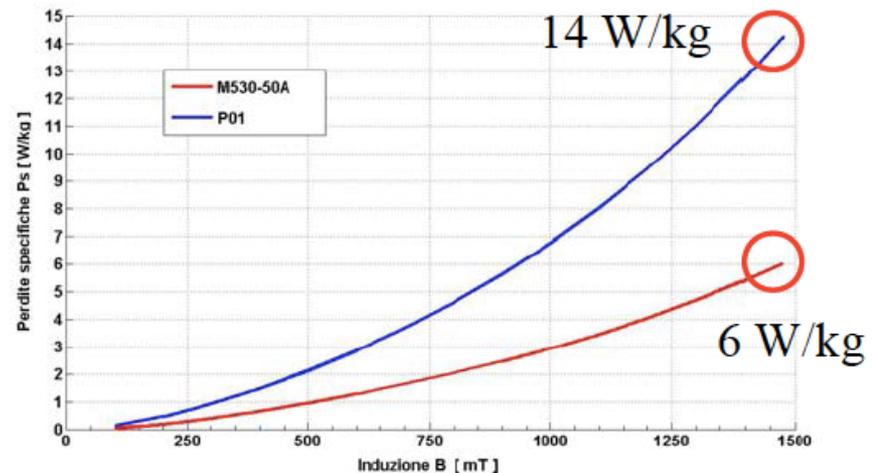
Confronto tra le caratteristiche di prima magnetizzazione:

- Ferro P01 (spessore 0,65 mm)
- lega ferro silicio M530-50 A (spessore 0,5 mm)
- Frequenza: 50 Hz



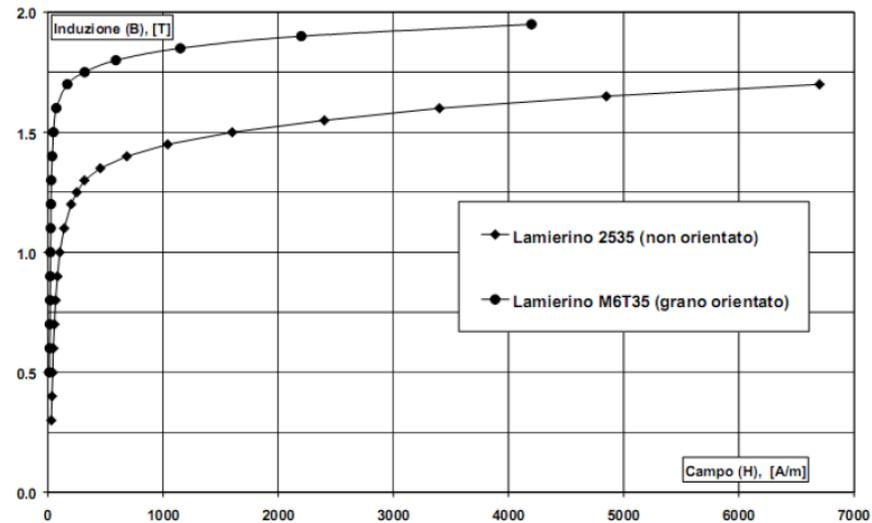
Confronto tra le cifre di perdita:

- Ferro P01 (spessore 0,65 mm)
- lega ferro silicio M530-50 A (spessore 0,5 mm)
- Frequenza: 50 Hz

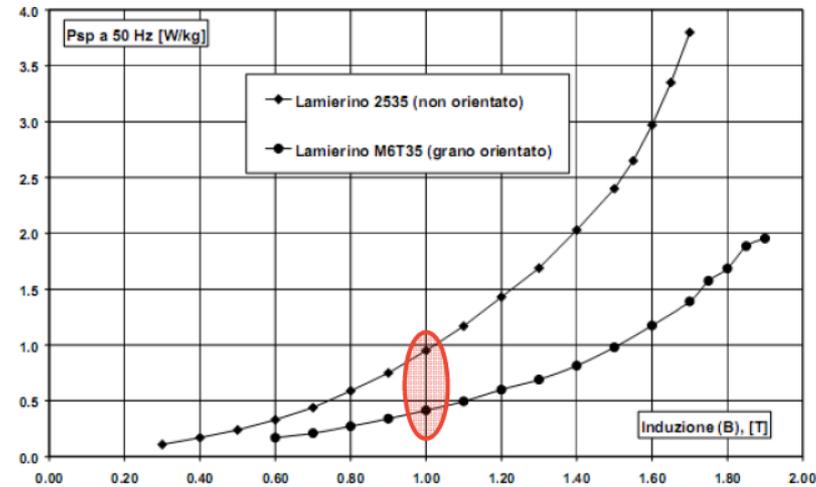


Cifra di perdita [W/kg]: la perdita specifica, per isteresi e per correnti parassite, che si ha quando un materiale è investito da un campo magnetico alternato sinusoidale a frequenza f con induzione massima fissata B_M . Valori di riferimento 1 T e 1,5T

Proprietà leghe Ferro-Silicio cristalli orientati e non orientati



Caratteristica B-H a 50 Hz: lamierino a grano non orientato (2535) e a grano orientato (M6T35)



Perdite specifiche a 50 Hz: lamierino a grano non orientato (2535) e a grano orientato (M6T35)

Proprietà materiali conduttori

TABELLA 1 RESISTIVITÀ DI ALCUNI MATERIALI A TEMPERATURA AMBIENTE (20 °C)

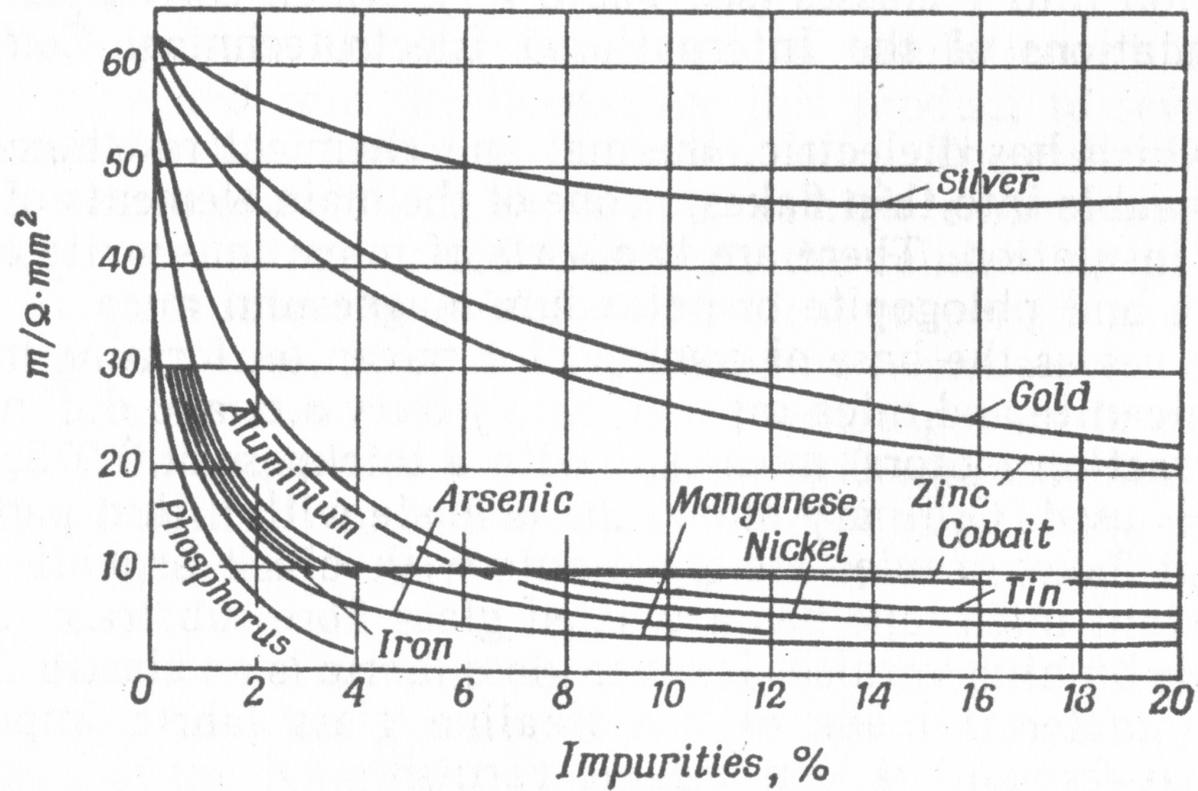
<i>Materiale</i>	<i>Resistività</i> ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	<i>Coefficiente termico di resistività</i> $\bar{\alpha}$ (per °C)
Metalli tipici		
Argento	1.62×10^{-8}	4.1×10^{-3}
Rame	1.69×10^{-8}	4.3×10^{-3}
Alluminio	2.75×10^{-8}	4.4×10^{-3}
Tungsteno	5.25×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Ferro	9.68×10^{-8}	6.5×10^{-3}
Platino	10.6×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Manganin ^a	48.2×10^{-8}	0.002×10^{-3}
Semiconduttori tipici		
Silicio puro	2.5×10^3	-70×10^{-3}
Silicio di tipo <i>n</i> ^b	8.7×10^{-4}	
Silicio di tipo <i>p</i> ^c	2.8×10^{-3}	
Isolanti tipici		
Vetro	$10^{10} - 10^{14}$	
Polistirolo	$> 10^{14}$	
Quarzo fuso	$\approx 10^{16}$	

^a Lega specificamente progettata per avere un basso valore di α .

^b Silicio puro «drogato» con impurezze di fosforo fino ad avere una densità di portatori di carica liberi di $10^{23}/\text{m}^3$.

^c Silicio puro «drogato» con impurezze di alluminio fino ad avere una densità di portatori di carica liberi di $10^{23}/\text{m}^3$.

Proprietà materiali conduttori



Proprietà materiali isolanti

TABLE 1-8

Material	Thickness, mm	Weight of $1 \text{ m}^2 \cdot 10^3$, kg/m^3	Specific gravity, $\gamma \cdot 10^{-3}$, kg/m^3	Strength, 10^{-6} N/m^2		Electrical strength, 10^{-3} , kV/m
				lengthwise	across	
Paper, Japanese	0.015-0.025	11-12	0.55-0.7	8.5-9.6	1.06-1.08	—
Paper for pasting	0.035	23	0.65	2.3	10	—
Paper, cable	0.17	120	0.75	6.2	33	—
Paper, telephone	0.07	52	0.75	5.5	25	—
Pressboard	0.27	—	1.16	7	65	13.5
Pressboard	1.00	—	1.2	5.9	3.9	14
Fibre	1.60	—	1.2	8.6	6.3	1.8-8.8
Leatheroid	0.27	—	1	8.3	4.25	14.5
Varnished cloth, yellow	0.25	—	—	2.3	—	32
Varnished cloth, black	0.37	—	—	4.2	—	30
Varnished silk	0.13	—	—	2.5	—	35
Glass fibre tape	0.10	—	—	6	—	—
Mica, muscovite	—	—	2.76-3.20	—	—	80-200
Mica, phlogopite	—	—	2.5-2.7	—	—	80-170
Micanite, hard	1.00	—	2.0-2.4	—	—	30-36
Micafolium	0.25	—	1.5-2.4	—	—	25
Mica-tape	0.13	—	—	—	—	30
Cotton tape	0.16-0.18	—	—	4	—	—
Asbestos tape	0.4-0.5	—	—	1-1.2	—	—
Glass-mica tape	0.15-0.17	—	—	—	—	30