

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

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

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.

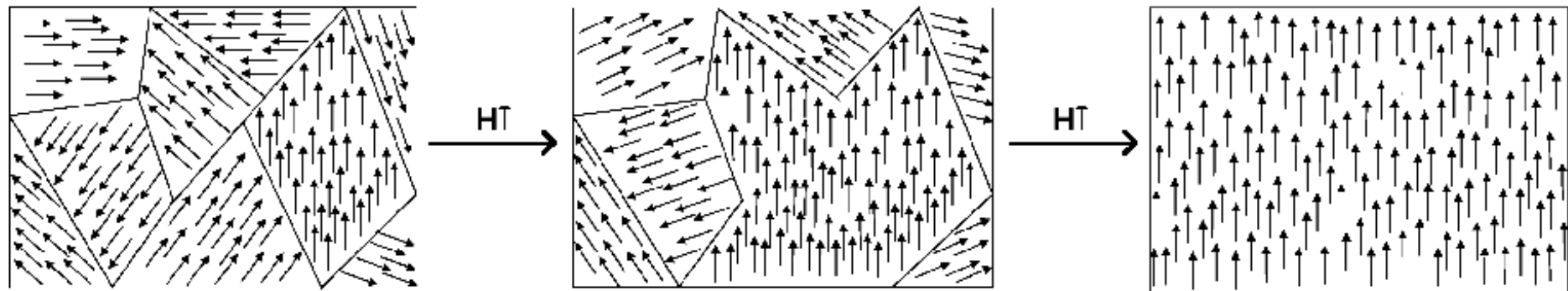
In presenza di un campo magnetico esterno intenso il materiale presenta una magnetizzazione complessiva dovuta ad un allineamento parziale dei dipoli magnetici con il campo magnetico esterno a carattere magnetizzante.

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

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

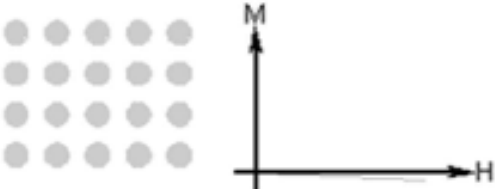
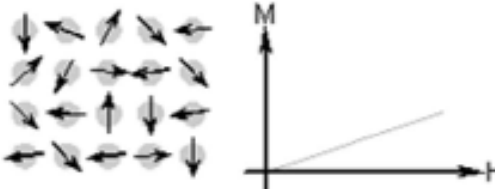
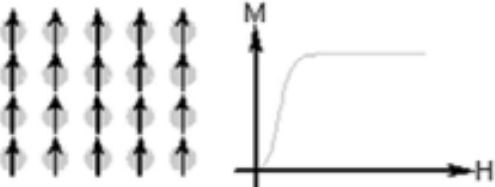
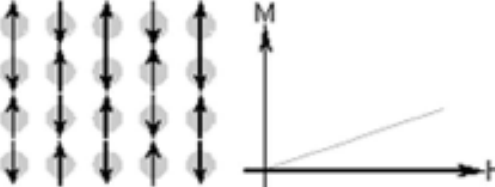
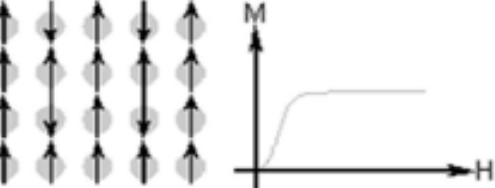
Dove la suscettività assume valori dell'ordine di  $10^{-6}$

I materiali 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.

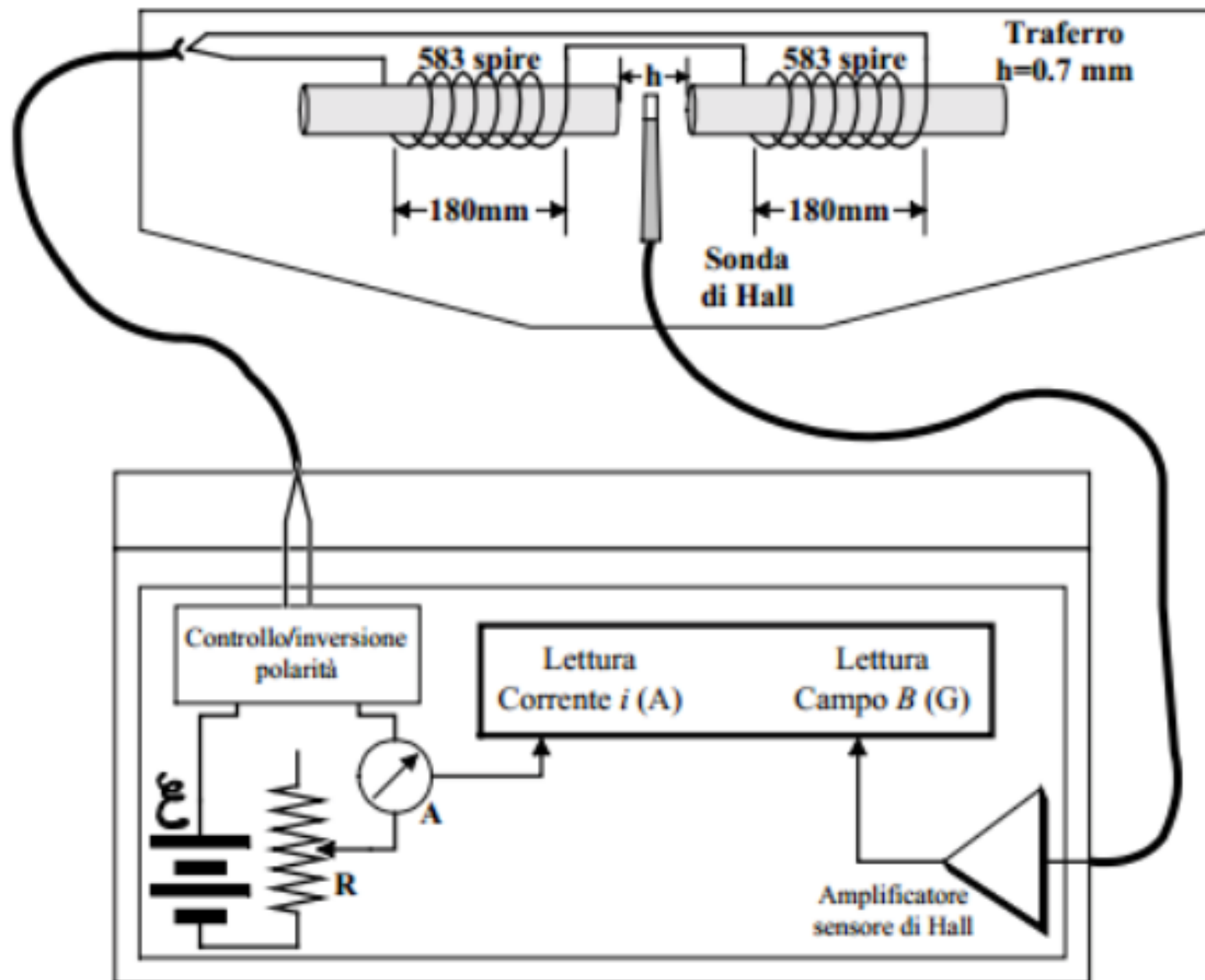


Sotto l'azione di un campo magnetico esterno i domini si orientano in modo da produrre una magnetizzazione. Nel caso di annullamento del campo magnetico esterno i domini conservano il proprio orientamento generando un campo magnetico.

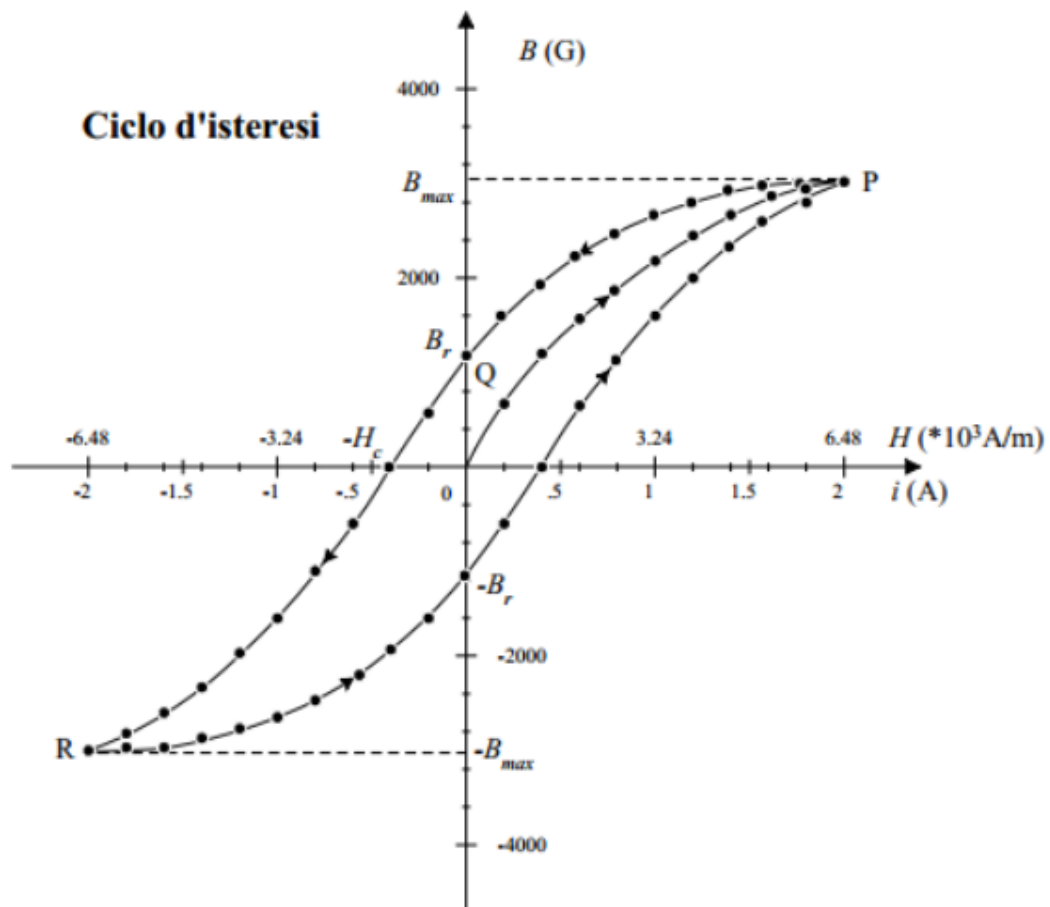
In questo caso la suscettività assume valori molto elevati dell'ordine di

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

## Schema del dispositivo



### Ciclo d'isteresi



# Caratteristica di magnetizzazione

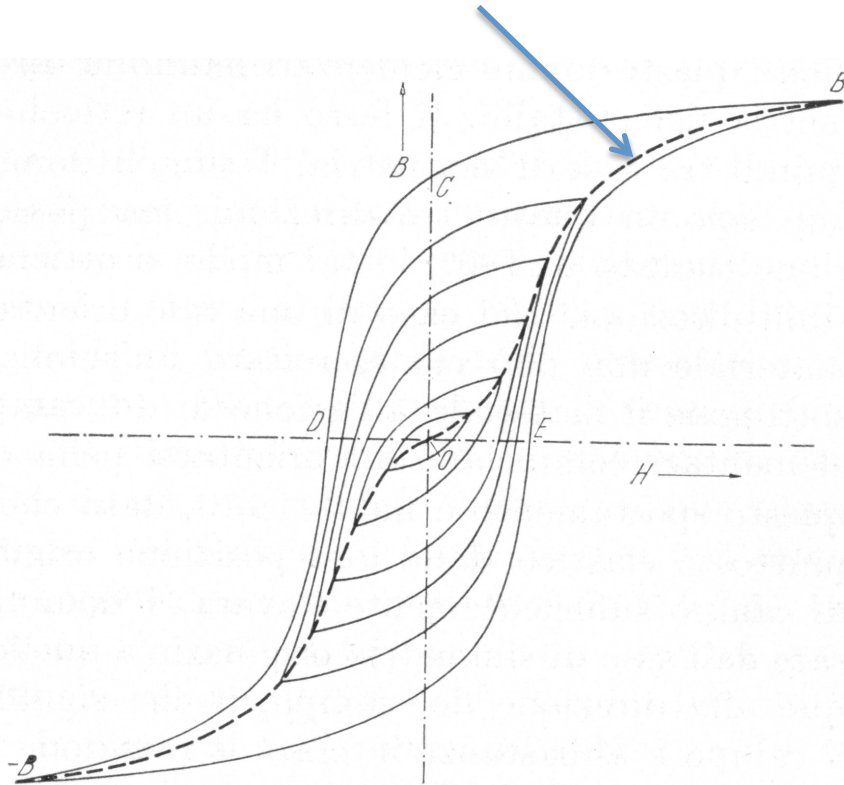


Fig. 6-1. - Cicli di isteresi di materiali ferromagnetici nel caso di magnetizzazione ciclica con diverse intensità di campo; rilievo della curva di prima magnetizzazione.

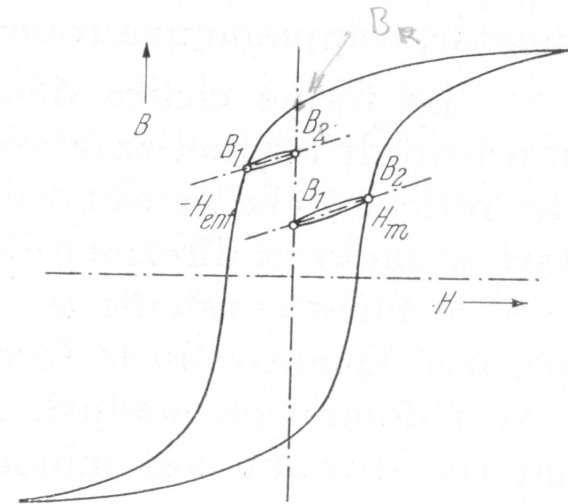
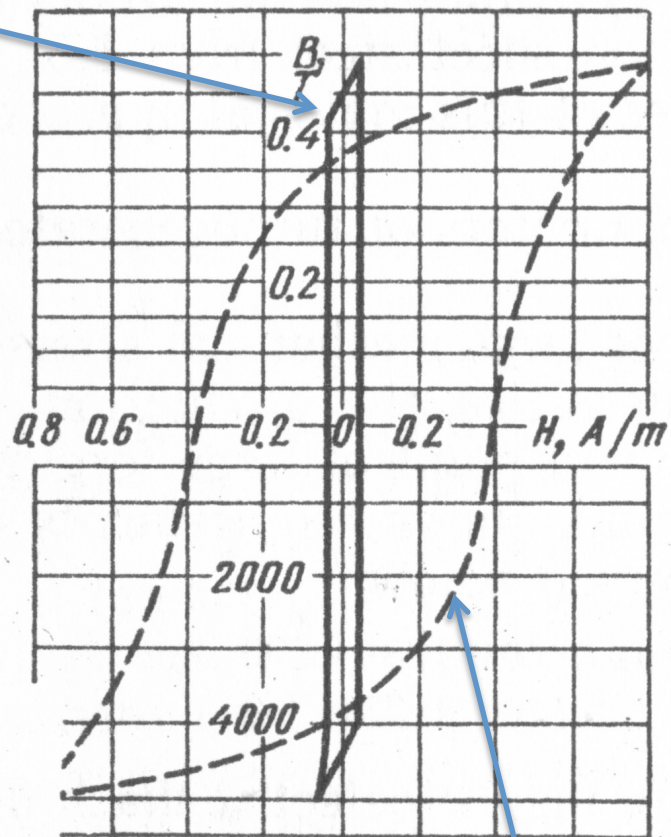


Fig. 6-2. - Come fig. 6-1, ma con magnetizzazione variabile entro i limiti  $0$  e  $H_m$  e  $0$  e  $-H_{ent}$ .



Materiali Ferromagnetici dolci:

Elevata permeabilità Magnetica e basso campo coercitivo



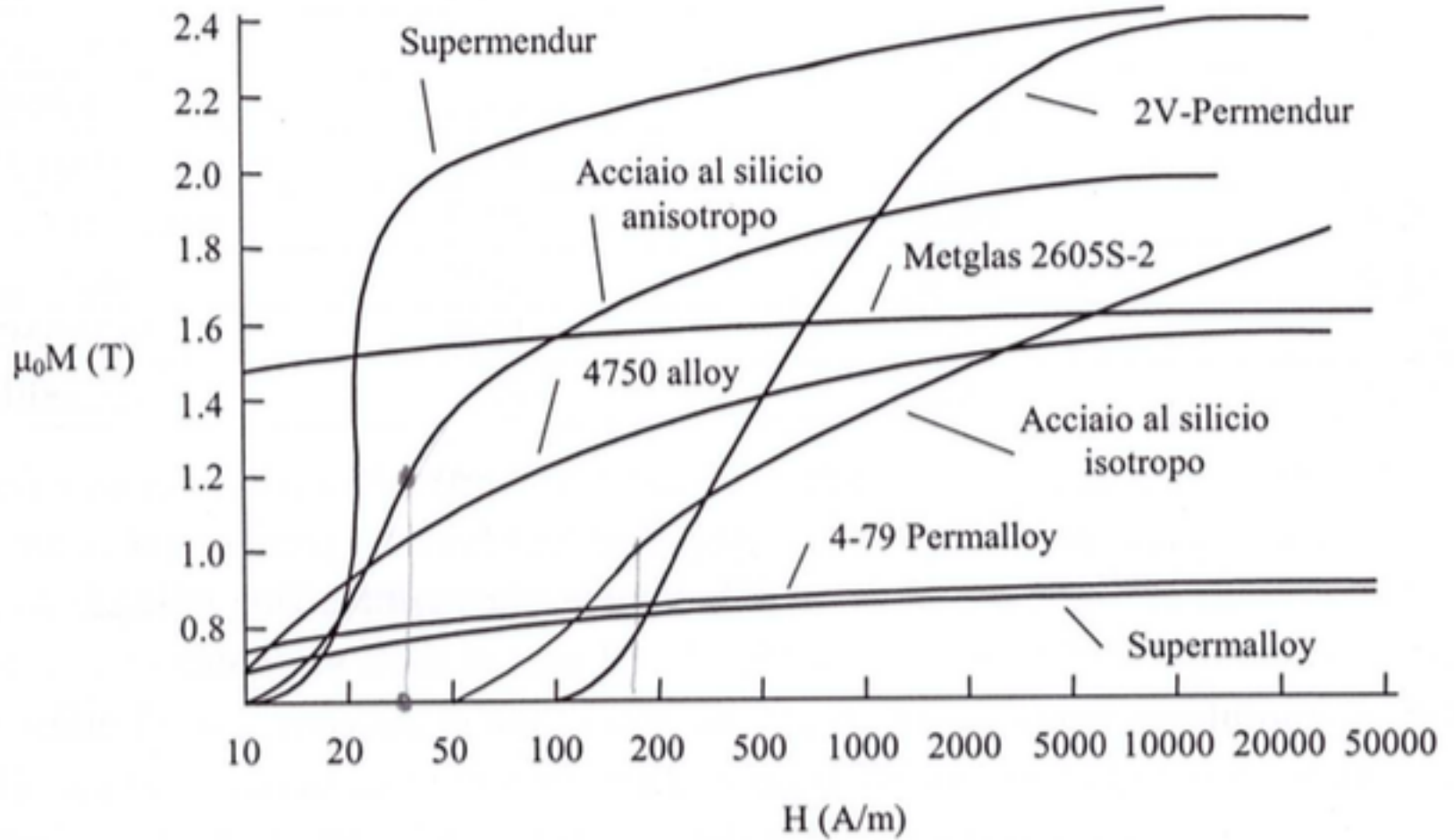
Materiali Ferromagnetici duri:

Elevata Induzione residua e campo coercitivo

Nome	Composizione	$\mu_r$		$P_{m(s)}$ (T)	$B_r$ (T)	$H_c$ (A/m)	$\sigma$ (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	$5 \cdot 10^{-6}$

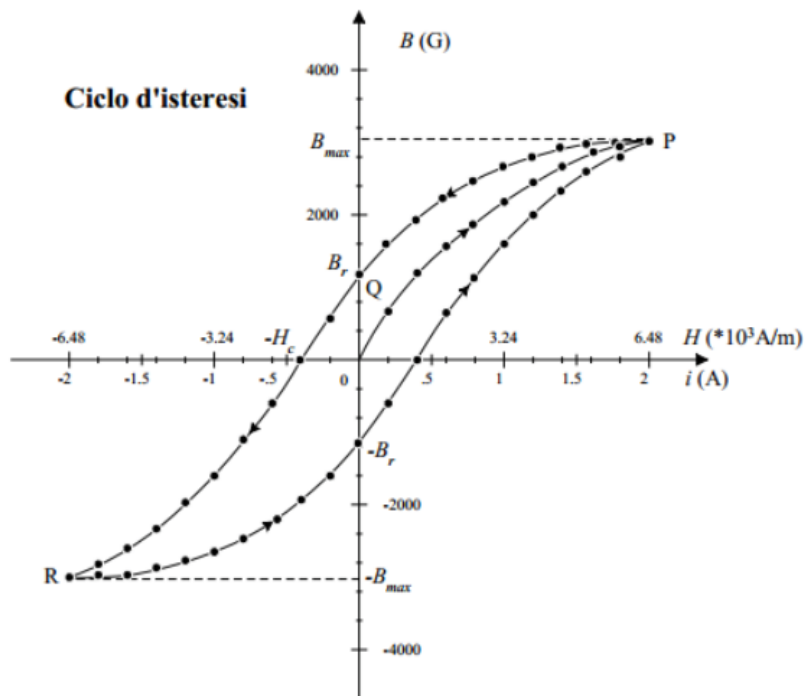
Alcuni materiali  
ferromagnetici dolci

## Caratteristiche di magnetizzazione di materiali dolci



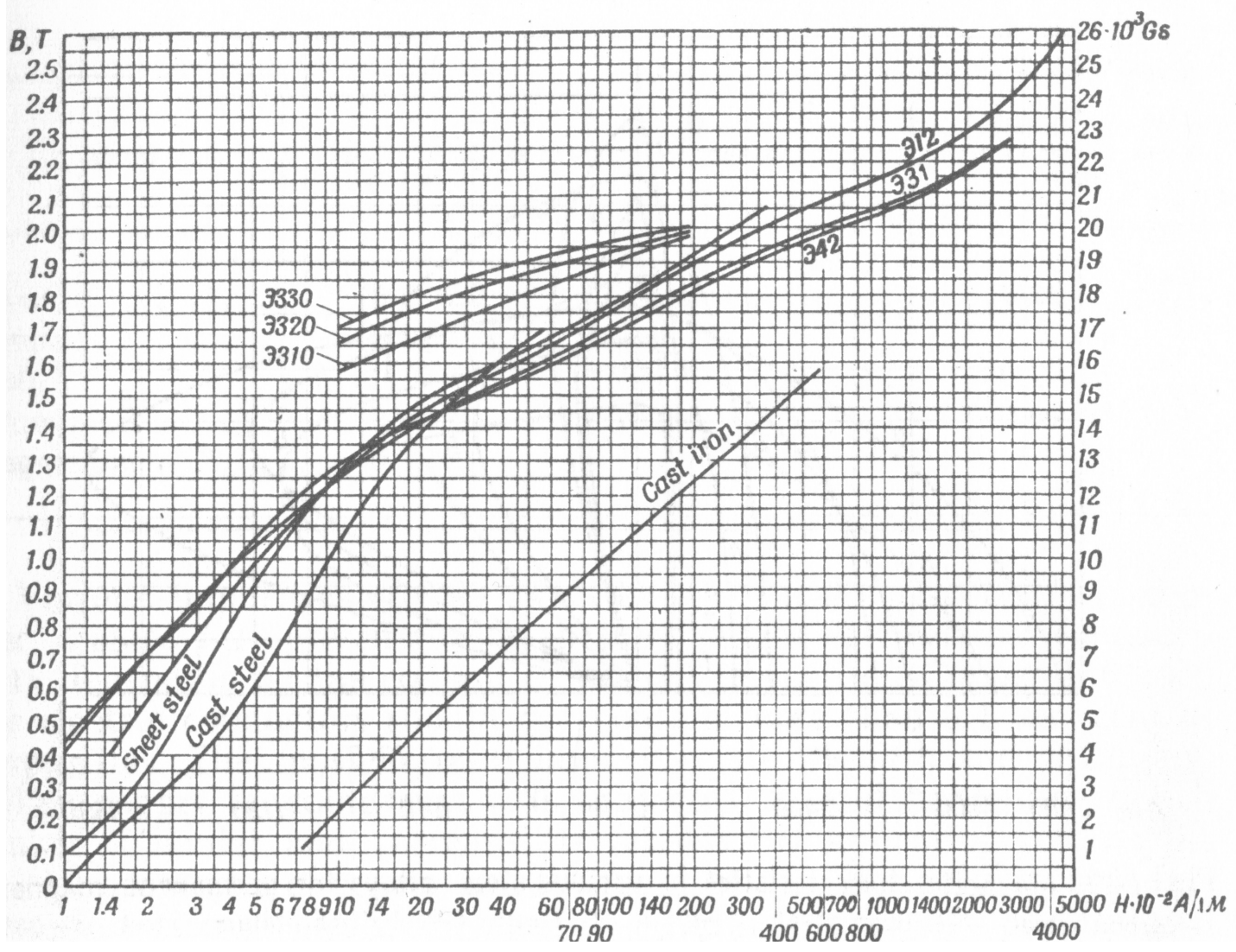
## Perdite per isteresi

Le perdite per isteresi sono connesse alla magnetizzazione del materiale. Considerando un processo ciclico di magnetizzazione che ci porta da valore P(  $H_{max}$ ,  $B_{max}$ ) 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 formula di Steinmetz



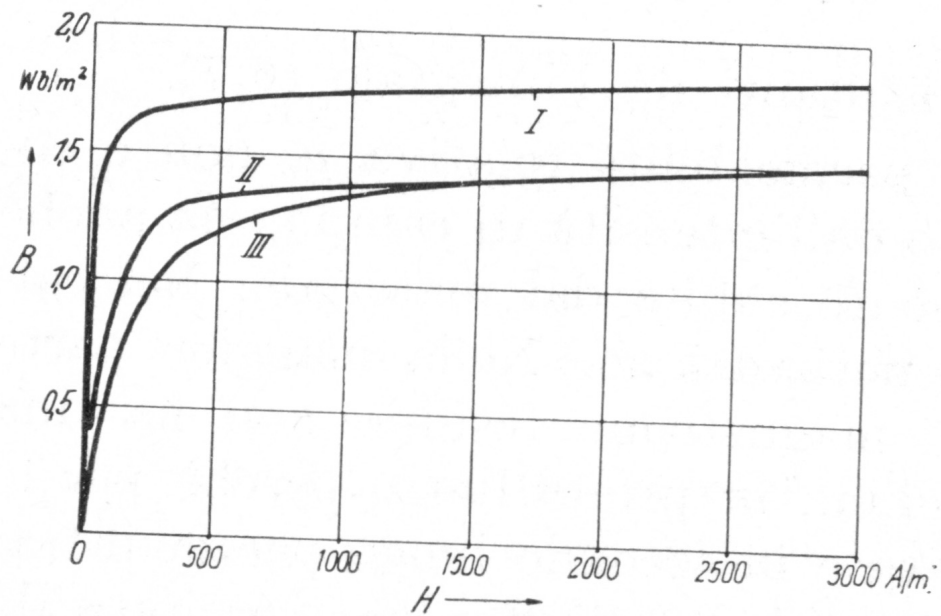


Fig. 6-4. - Curve di magnetizzazione di lamierini laminati a freddo nella direzione longitudinale (I) e in quella trasversale (II) (produzione americana); lamierini laminati a caldo (III) (produzione svedese).

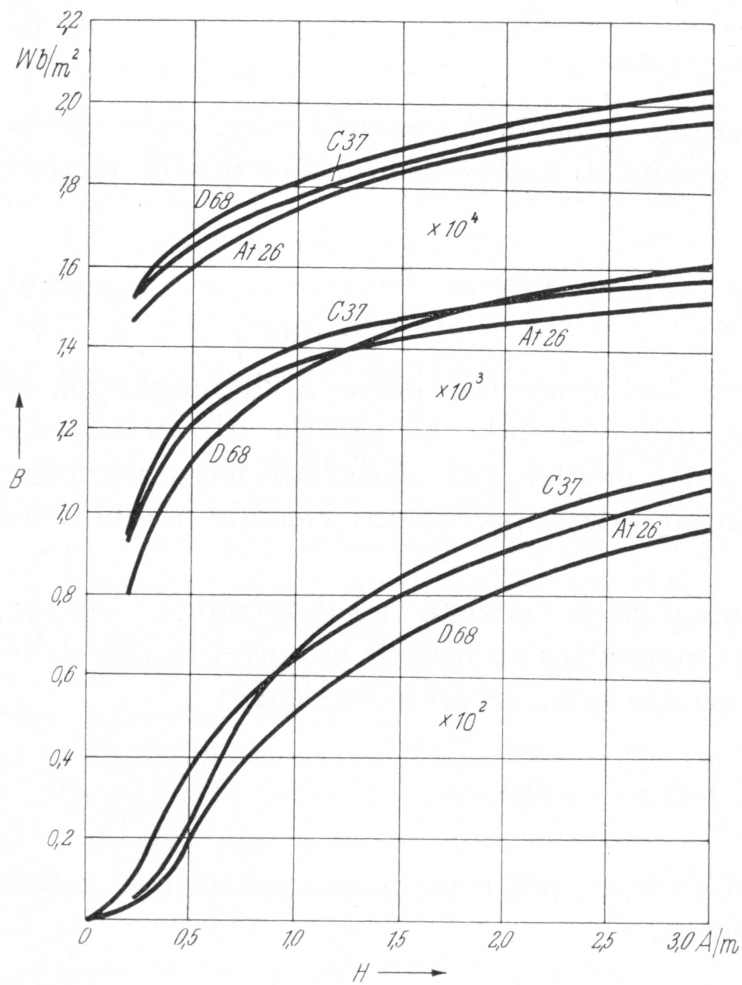


Fig. 6-3. - Curva di magnetizzazione di lamierini al silicio laminati a caldo (produzione svedese).

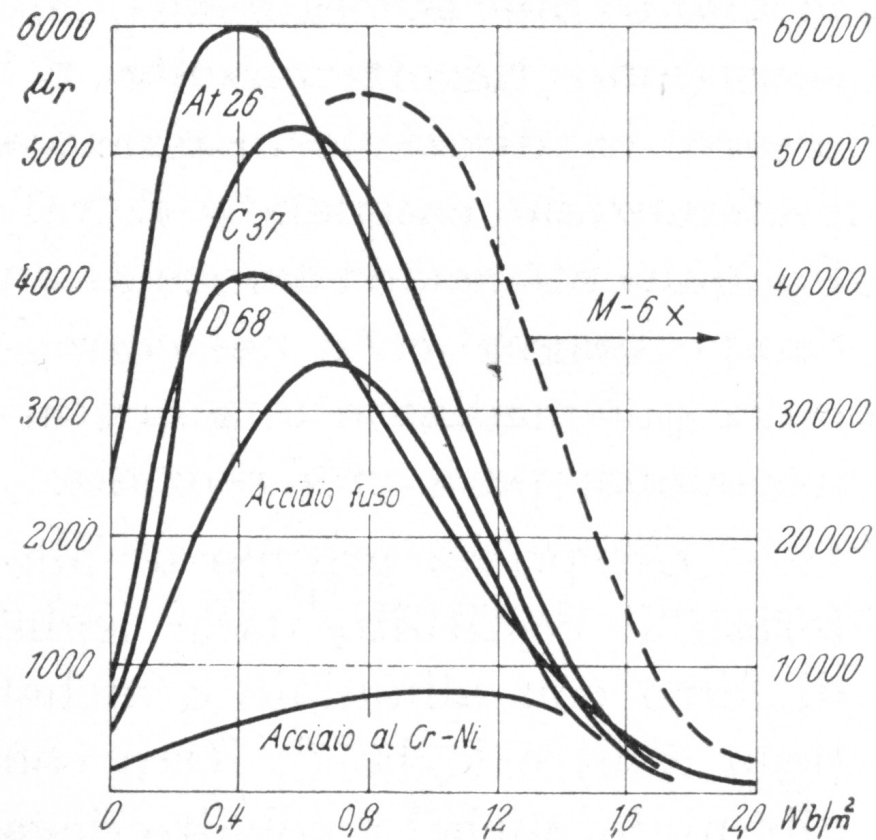


Fig. 6-5. - Curve di permeabilità relativa per diversi tipi di lamiera.

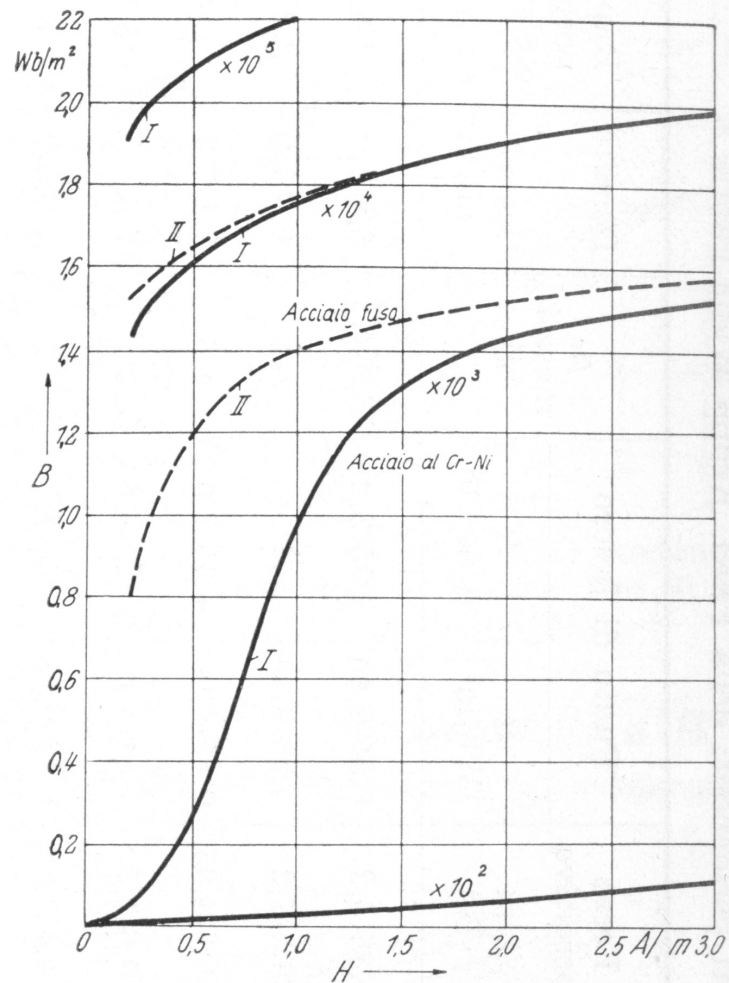


Fig. 6-6. - Curve di magnetizzazione di acciaio al cromo-nichel (I) e di acciaio fuso (II).