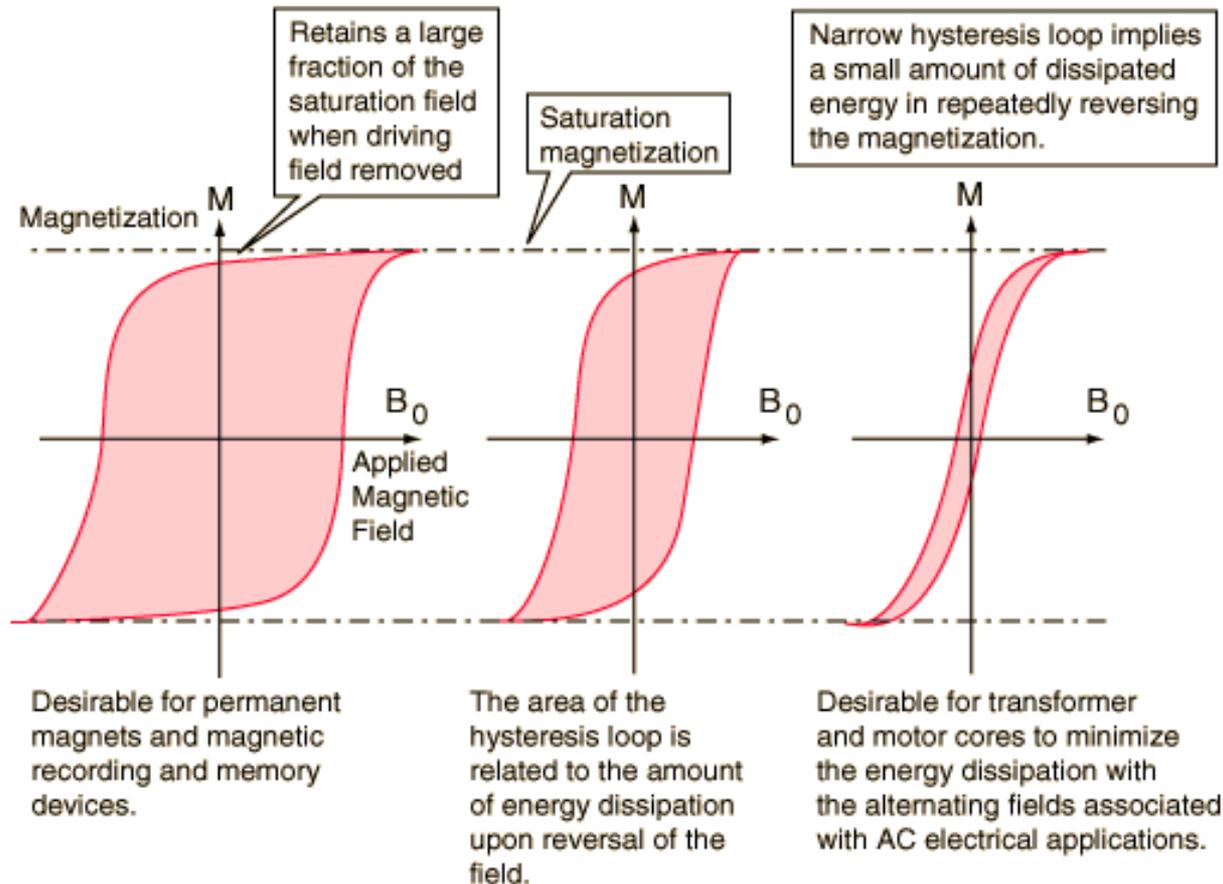


Magneti “soft”



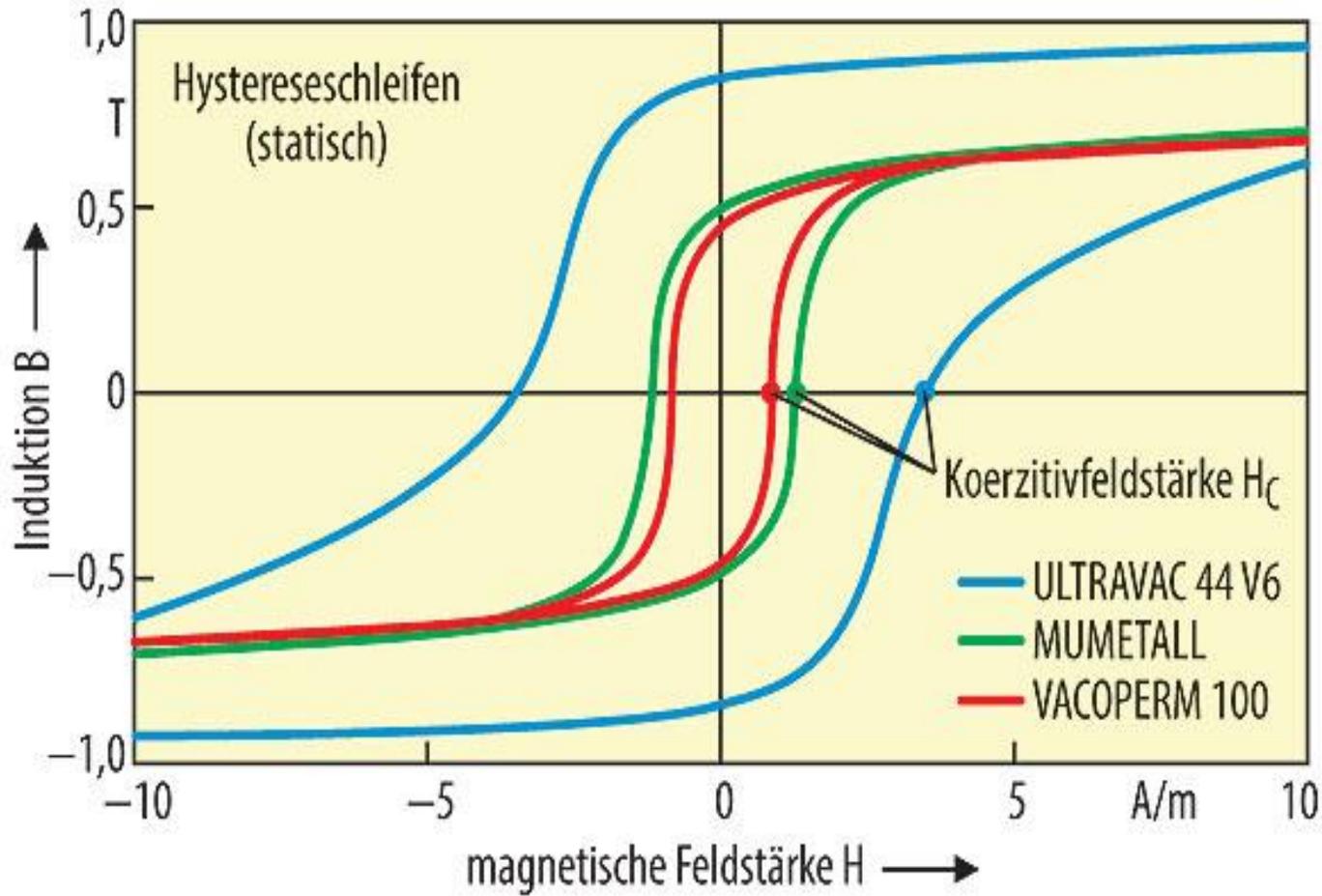
Materiali magnetici nei quali i processi di magnetizzazione (movimento di pareti di domini e rotazione della magnetizzazione all'interno del dominio) avvengono in campi magnetici molto bassi ($H_C \leq 10^3 \text{ A/m} \cong 12.5 \text{ Oe}$)

HARD



SOFT

Magneti "soft"



Un basso valore di H_C corrisponde a un alto valore di μ_r

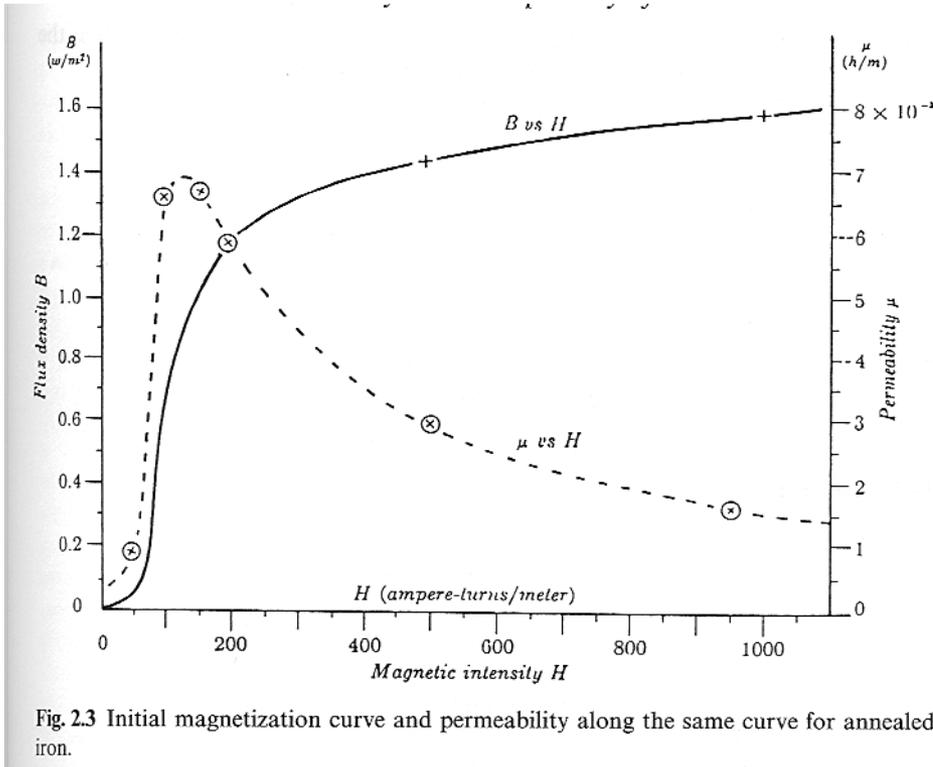
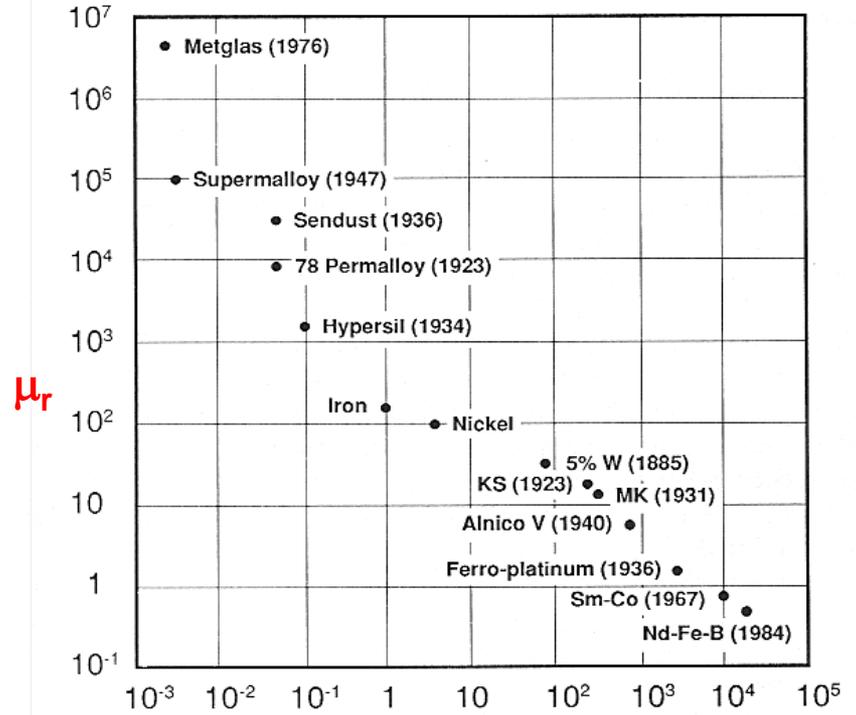


Fig. 2.3 Initial magnetization curve and permeability along the same curve for annealed iron.



μ_r

A cosa serve un magnete "soft" ?

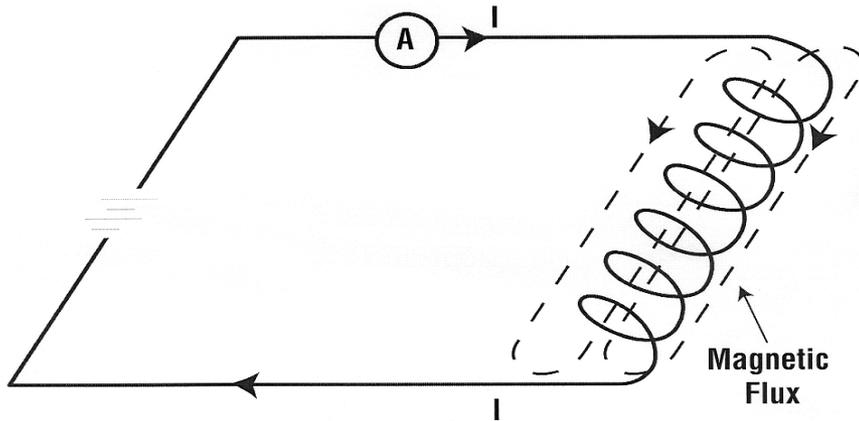


Fig. 2 Schematic representation of magnetic flux resulting from current flow in a coil.

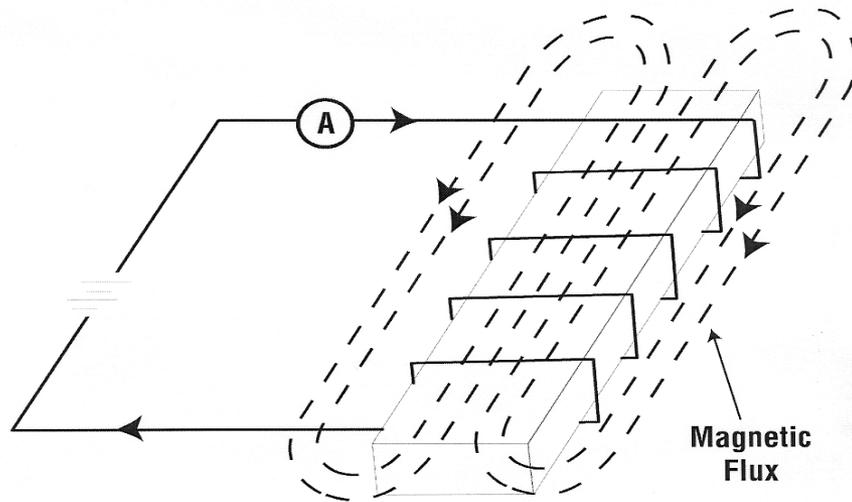
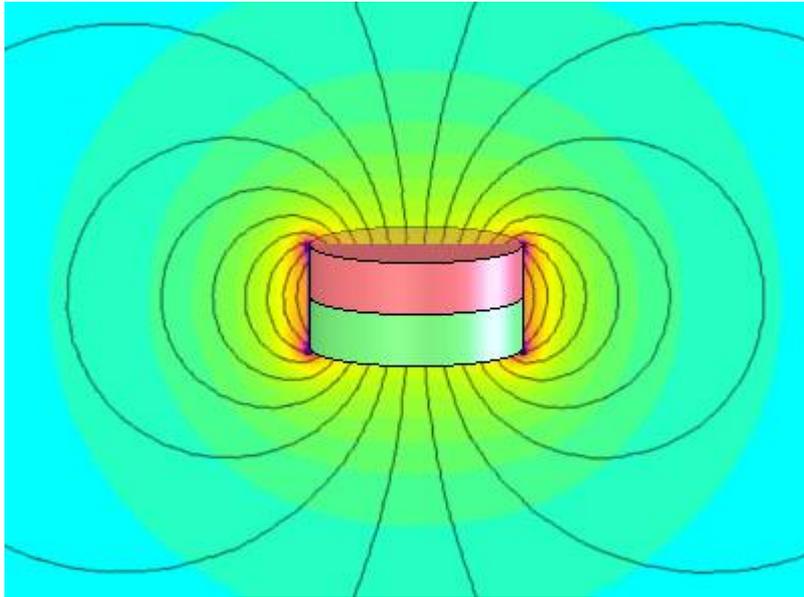


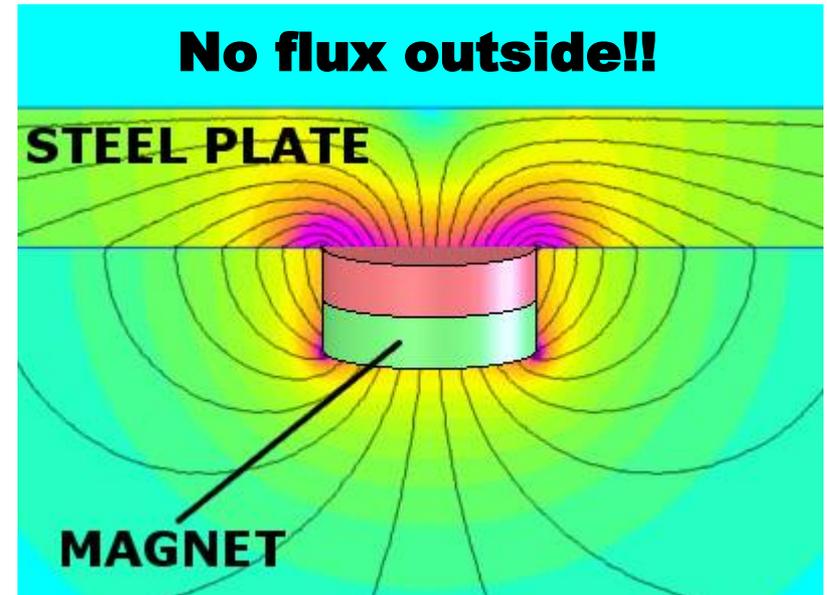
Fig. 3 Schematic representation of increased magnetic flux with a ferromagnetic core.

Elevata permeabilità permette di ottenere un'elevata induzione magnetica, mentre basso valore del campo coercivo permette di rovesciare facilmente il verso di tale induzione

A cosa serve un magnete "soft" ?



Per schermare dal flusso di campo magnetico della componentistica elettronica sensibile



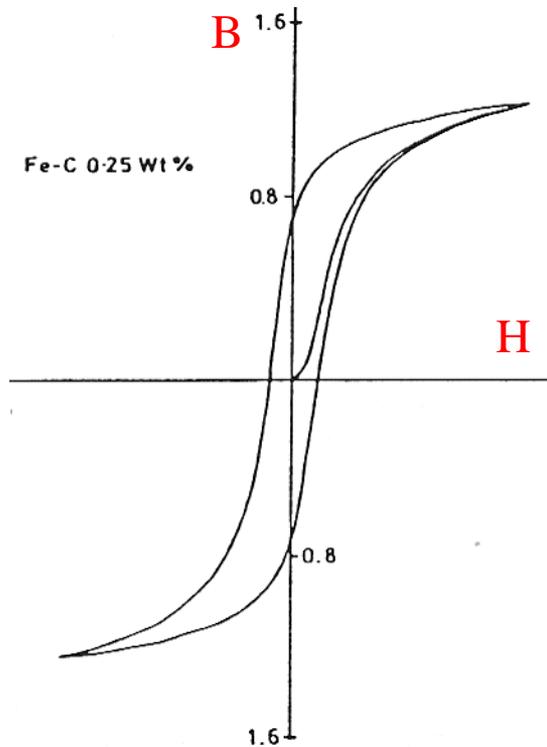
Ma il parametro principale è il **consumo energetico**



A. Consumo energetico nella magnetizzazione di un magnete soft “**hysteresis loss**”

Area racchiusa dal ciclo di isteresi nel campo B – H

Rappresenta l'energia spesa durante un ciclo del loop di isteresi



Material	H_c [A/m]	W_H [J/m ³]	p^* [watt]
Fe	80	500	0.03
Fe - 4% Si	40	350	0.02
Mumetall	<1	4	0.00024
78 Permalloy	4	20	0.0012
Permendur	160	1200	0.07

p^*
soft magnet
Volume = 1cm³
At 60 Hz work.
frequency

Legge di Steinmetz

$$W_H = \eta \cdot B_{\max}^n$$

η = costante del materiale
 B_{\max} = ampiezza dell'induzione
 n = esponente 1.6 ÷ 2

La perdita per isteresi sarà tanto maggiore quanto più elevata è la frequenza di lavoro

B. Consumo energetico dovuto alle correnti parassite “**eddy currents loss**” W_{ec}

1. **Correnti parassite indotte nel materiale da variazioni uniformi di B**
2. **Correnti parassite microscopiche localizzate vicino alle pareti dei domini**
3. **Perdite energetiche dovute a deformazioni magnetostrittive**



A basse frequenze

$$W_{ec} = \frac{\pi^2 B_{max}^2 d^2 \nu^2}{\rho \cdot \beta}$$

d = parametro che tiene conto della forma (per lamine d è spessore, per sfere d è diametro)

ρ = resistività di bulk

β = coefficiente che tiene conto della forma ($\beta = 6$ per lamine, $\beta = 20$ per sfere)

$$W_{tot.} = W_H + W_{ec.}$$



Perdite totali ridotte se si riduce conducibilità del materiale (aumento di ρ)

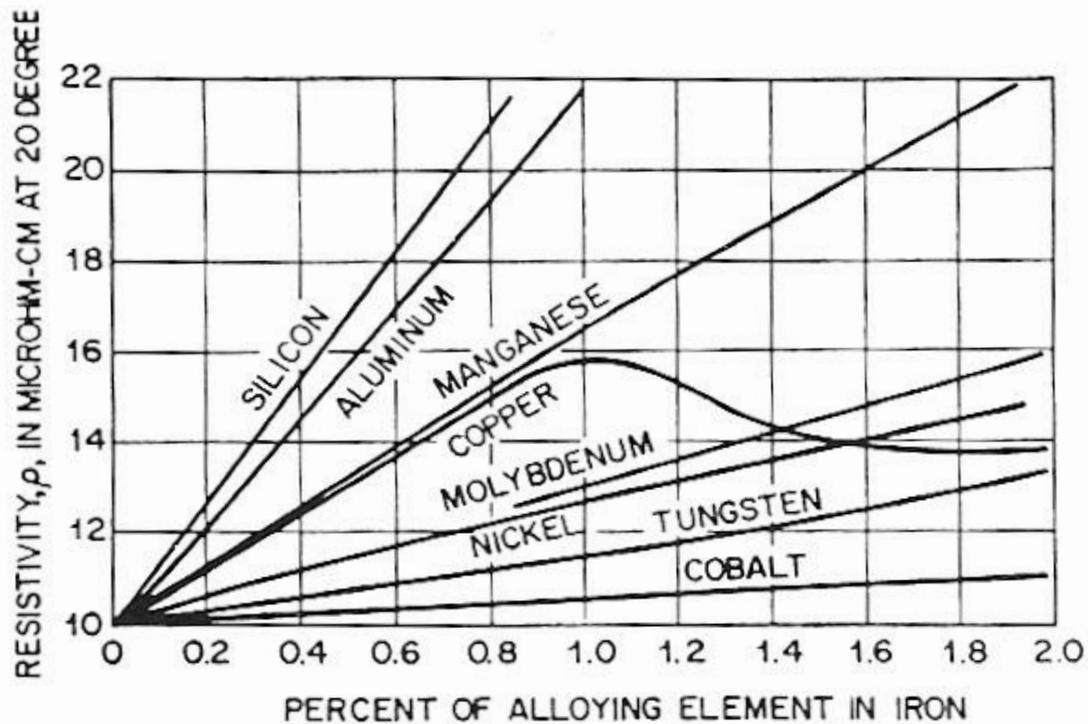
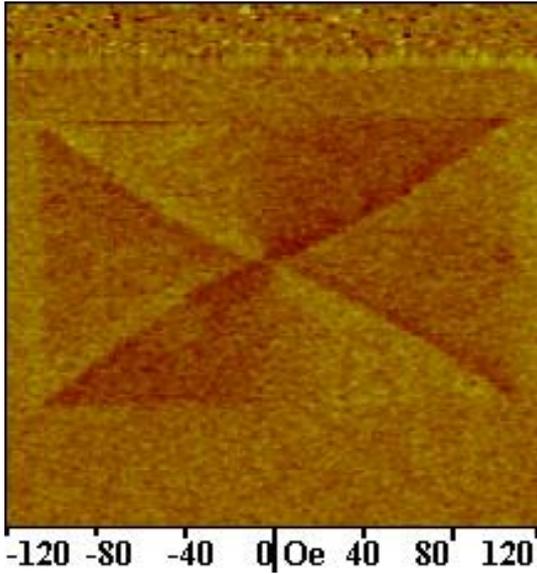
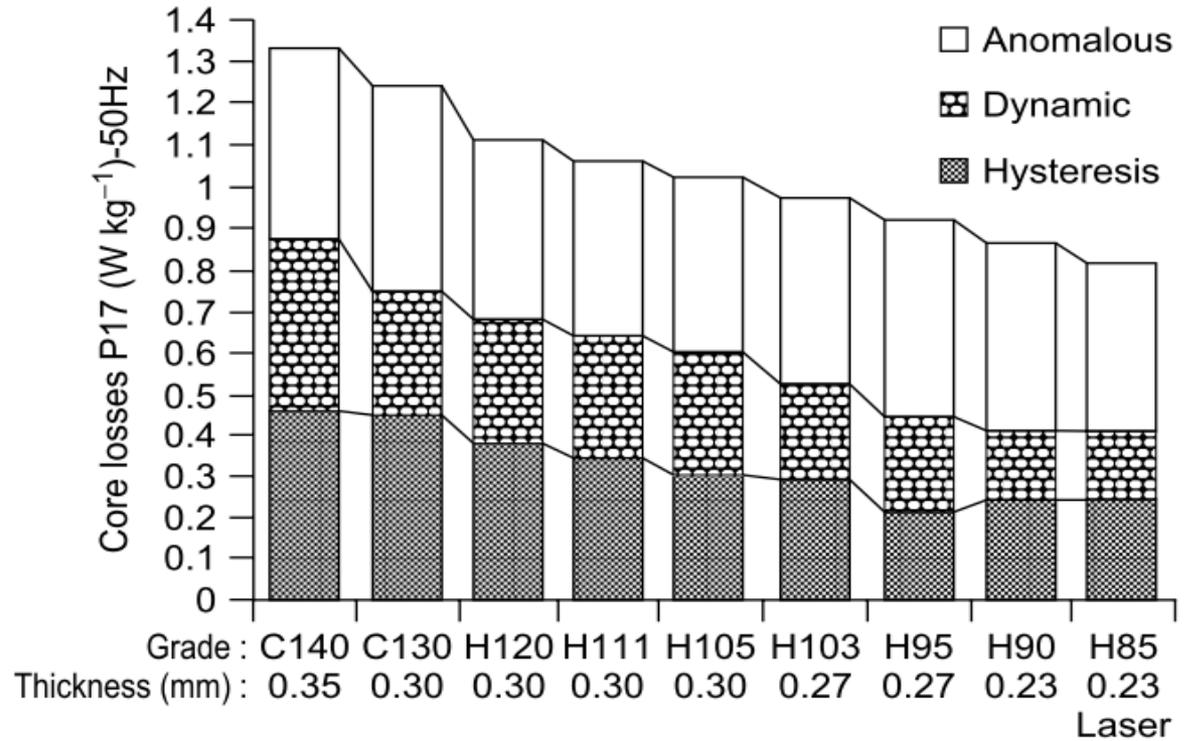


Fig. 12.1 Variation of the electrical resistivity of iron with the addition of different alloying elements.

C. Consumo energetico dovuto alle movimento di pareti“ **domain wall motion losses**”



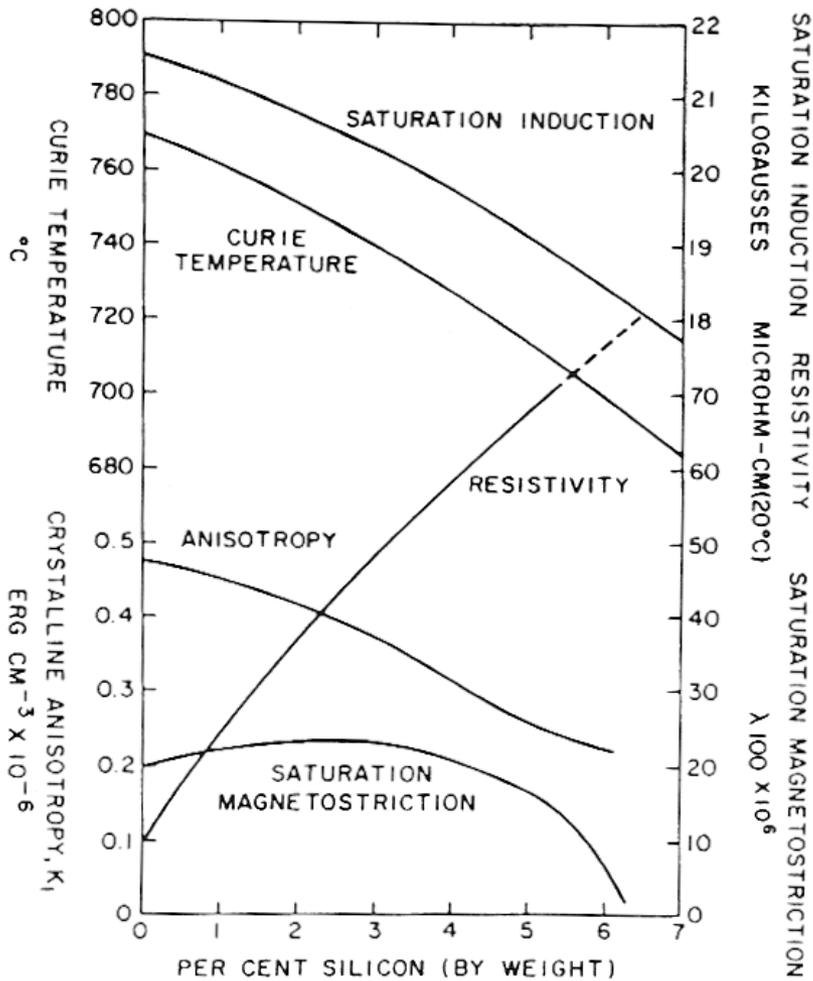
$$P_{d.w.m.} = A \cdot (B_{max.} \cdot \nu)^{3/2} \cdot \sqrt{\sigma \cdot S}$$



1. Leghe ferro – silicio



Principale prodotto utilizzato per la generazione di energia elettrica (nuclei dei trasformatori)



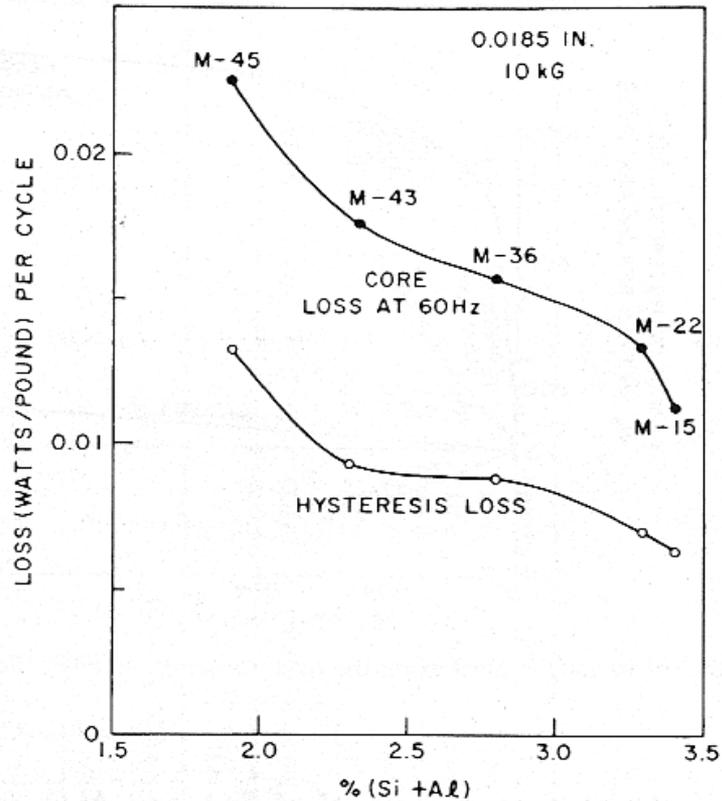
Addizione di Si:

- A. diminuzione di T_C
diminuzione dell'induzione di saturazione
- B. soppressione stress interni
sviluppo di orientazione di grani
aumento della resistenza e diminuzione delle
perdite per dissipazione elettrica

Principali variabili che influenzano le perdite energetiche sono:



A. Composizione



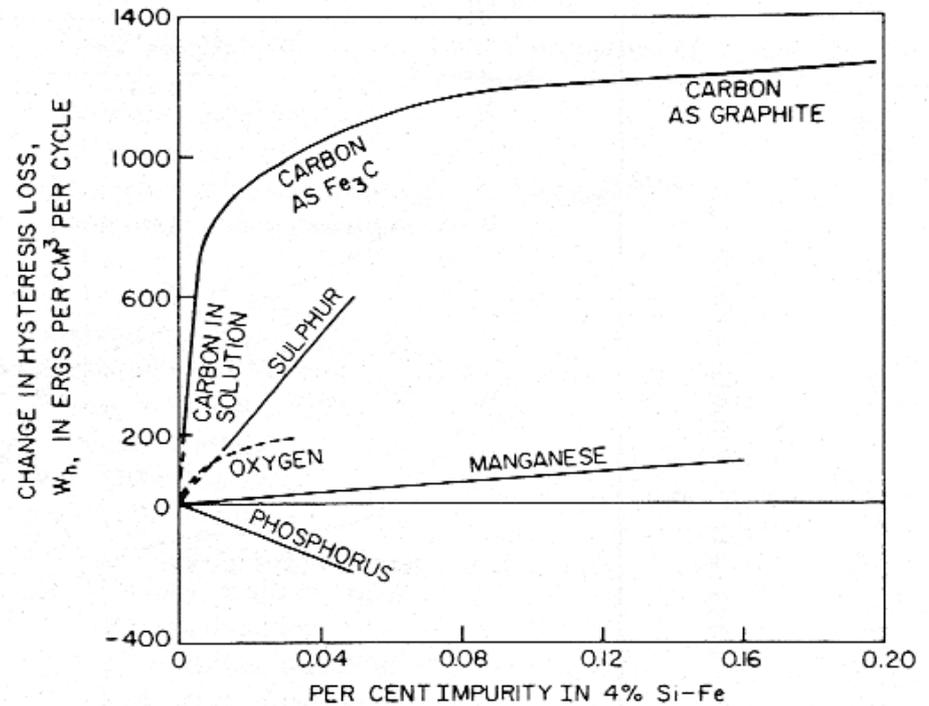
Diminuzione anisotropia magnetocristallina
Aumento della resistività

B. Impurezze

Dannosa presenza di C, S, O (diminuzione permeabilità e aumento perdita).

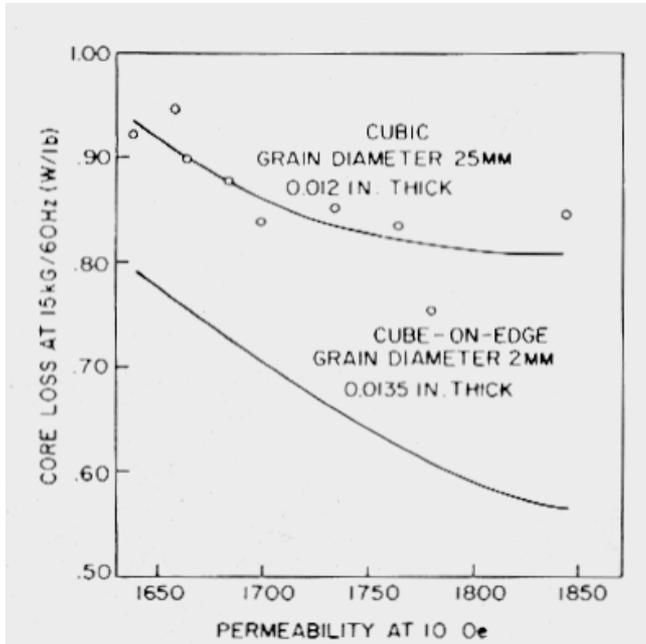
Attualmente $C < 0.0005\%$

Utilizzo di Mn per aumentare la lavorabilità



C. Tessitura

Orientazione dei grani in modo che la EMD sia parallela al campo applicato

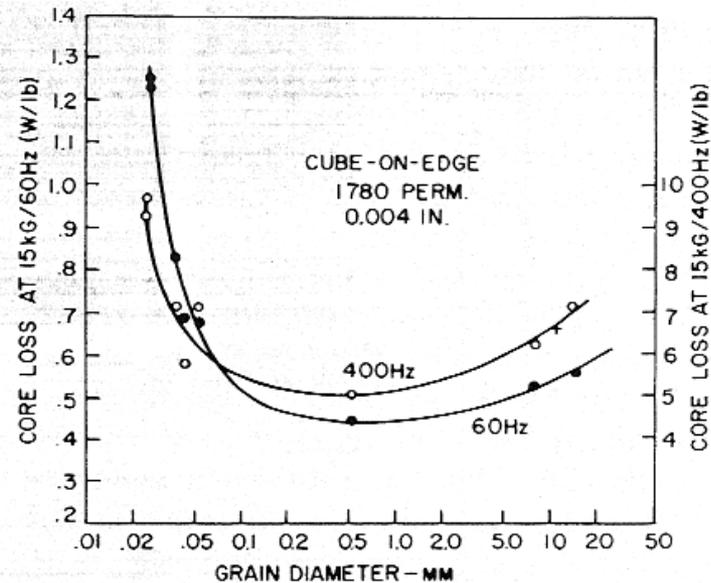


Disorientazione di 1° su Fe – Si 3.15% provoca ($H = 15 \text{ kG}$ e 60 Hz) peggioramento perdita energetica del 3%



D. Dimensione del grano

Minimo per $\varnothing 0.5 \text{ mm}$



2. Leghe ferro – nichel (Permalloys)



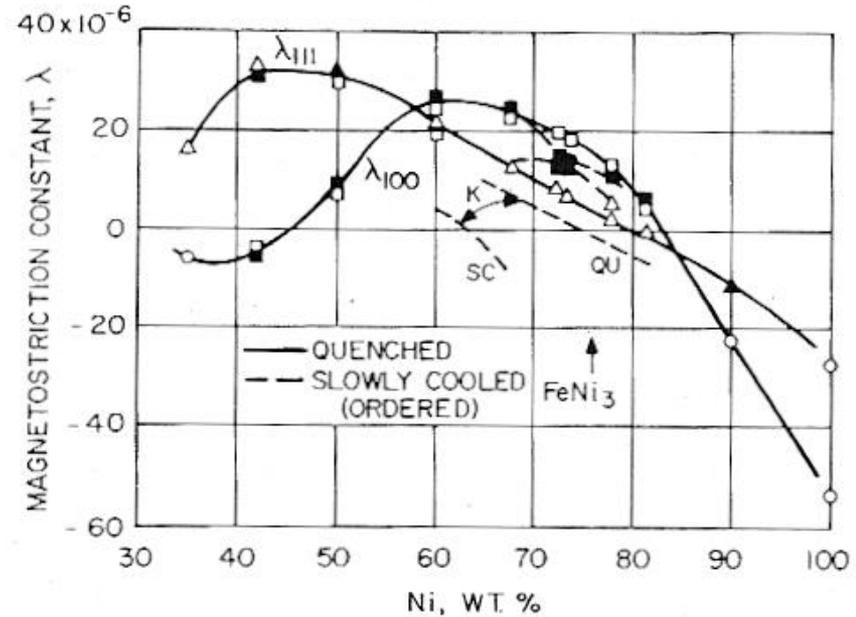
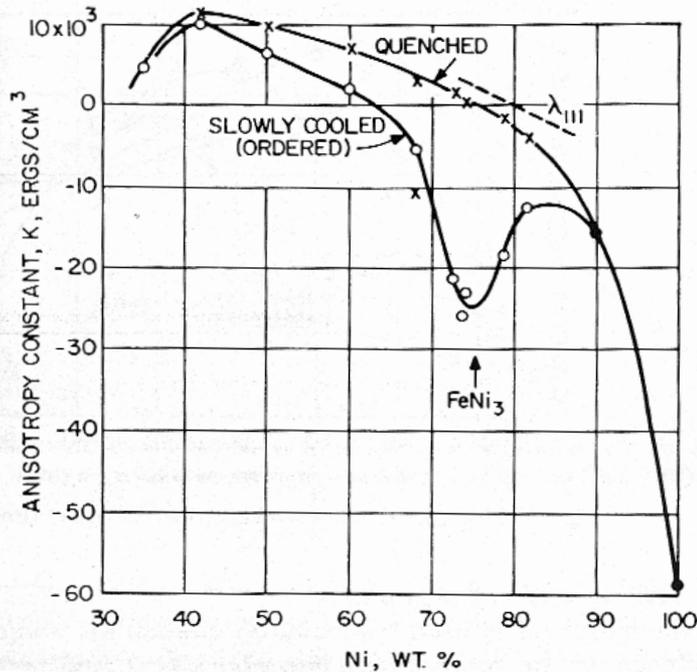
Tre principali composizioni:

78% Ni. Magnetostrizione e anisotropia magnetocristallina passano per zero.

65% Ni. Forte risposta al campo applicato in ricottura.

50% Ni. Elevata densità di flusso.

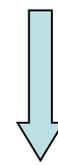
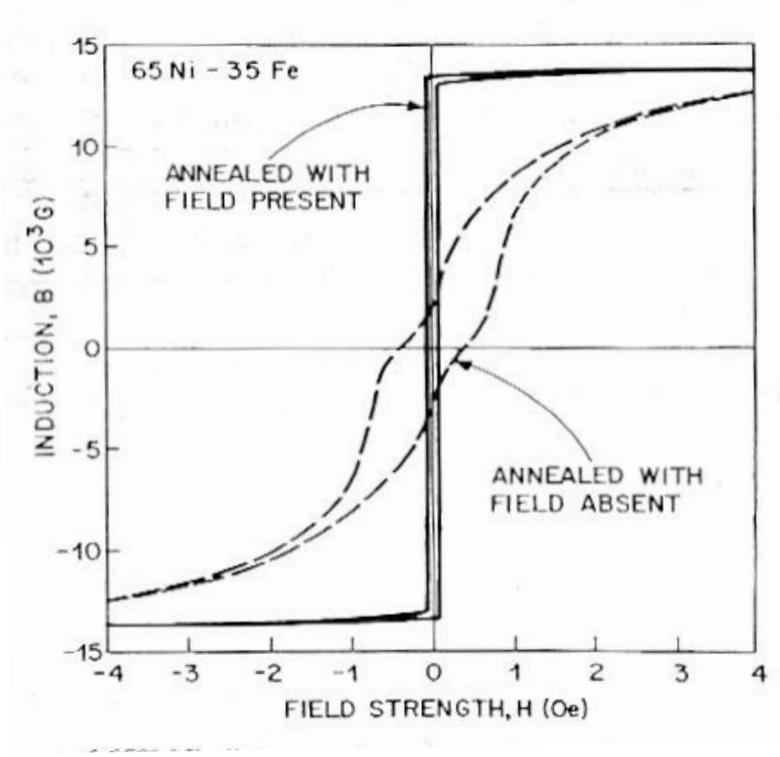
78% Ni.



Permeabilità dell'ordine di $10^5 \div 10^6$

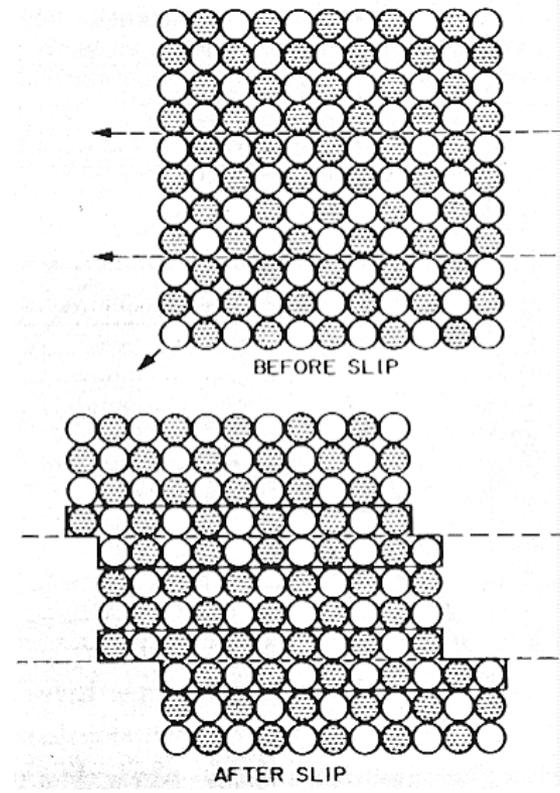
65% Ni.

Ciclo di isteresi squadrato

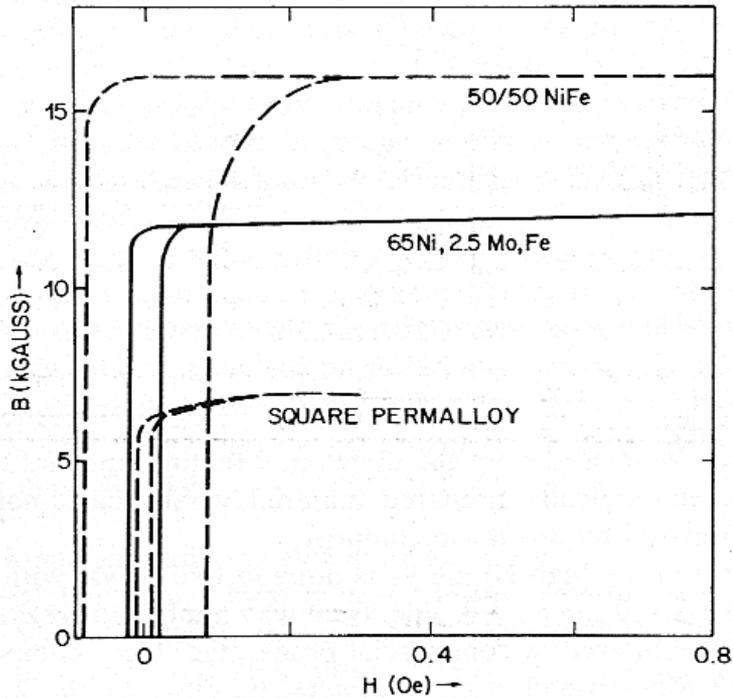


1. Cristallograficamente per tessitura
2. Anisotropia indotta da stress
3. Anisotropia indotta termomagneticamente

Energia di accoppiamento magnetico minima per coppie AB → direzione verticale dopo stress è direzione “hard”



50% Ni.



Moderata permeabilità ma
elevata saturazione

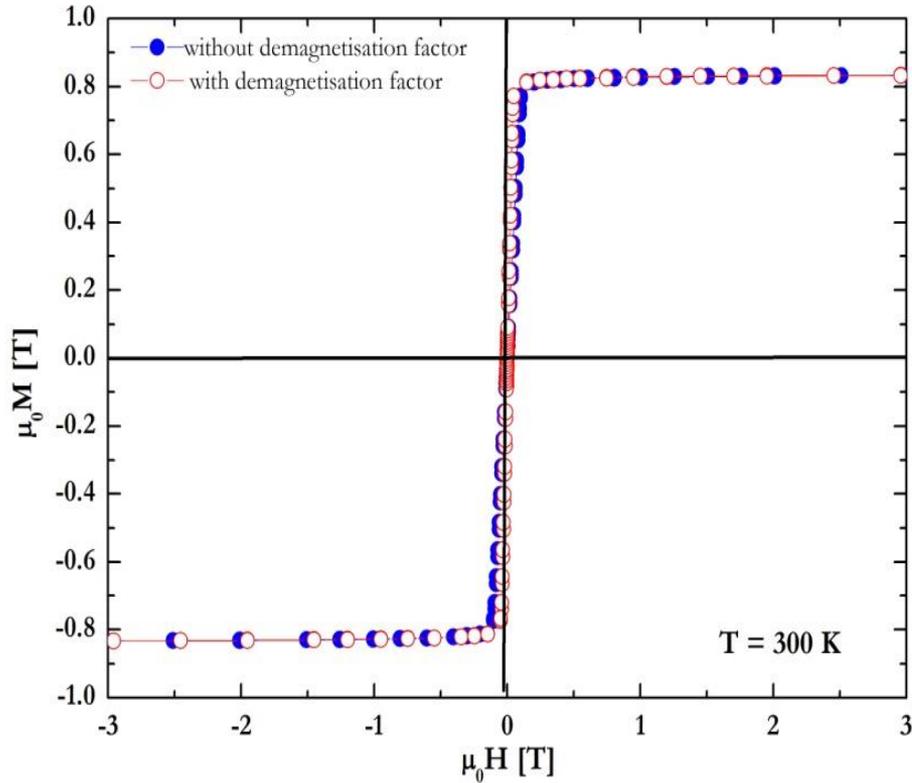
Fino a 0.5% Mn e 0.35% Si

Utilizzabili per due scopi:

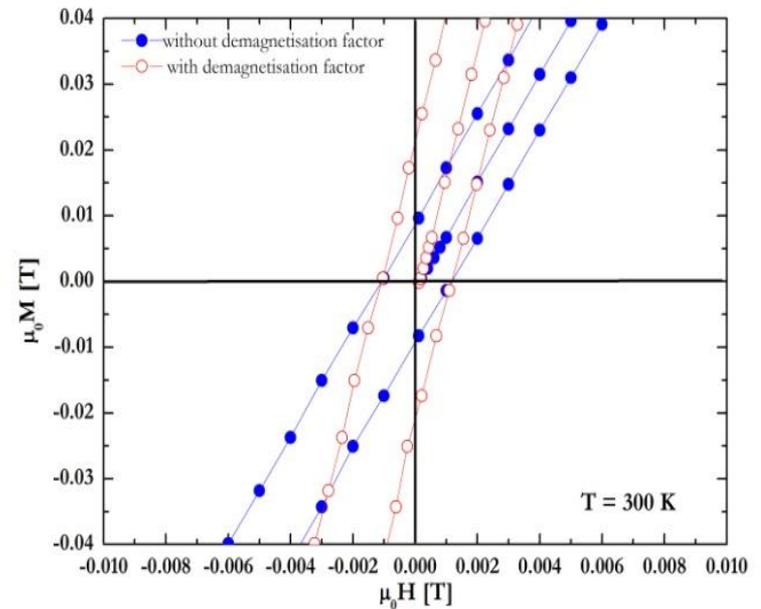
1. Rotori con $\mu \sim 6000$
(non orientati, tessitura random)
2. Trasformatori con $\mu \sim 10000$
(orientati per maggiore permeabilità)



Mumetall from Vacuumschmelze



$H_c(\text{mis}) = 800 \text{ A/m}$
 $H_c(\text{dichiarato}) = 65 \text{ A/m}$



3. Leghe ferro – cobalto (Permendur)

Importanti vicino a composizione equiatomica

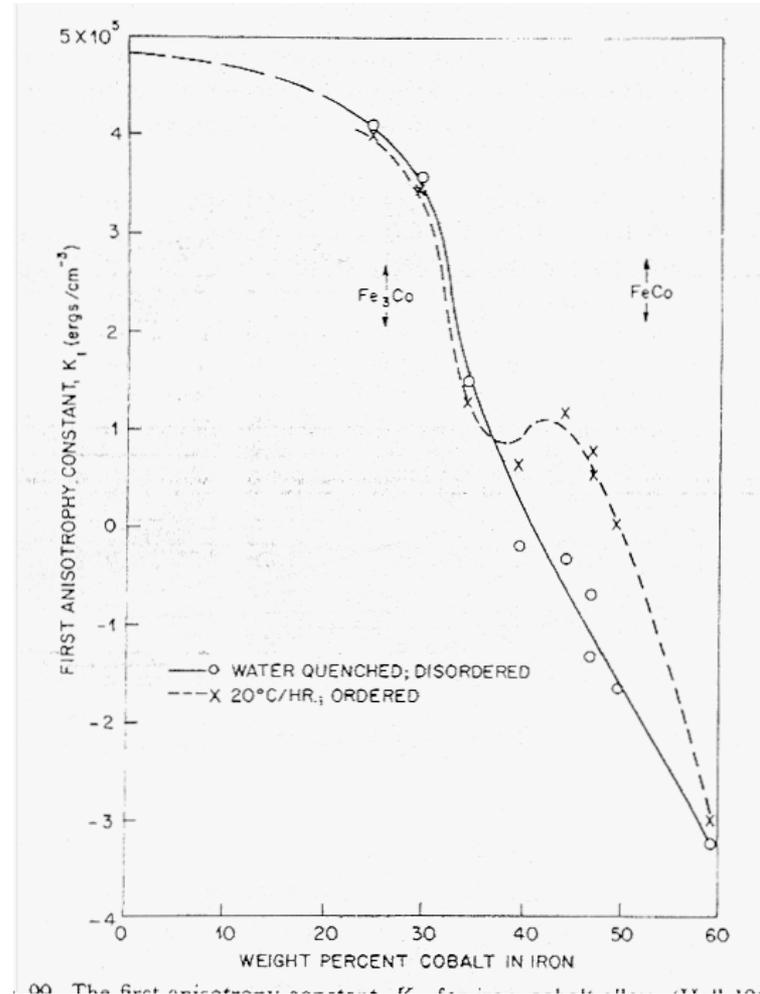
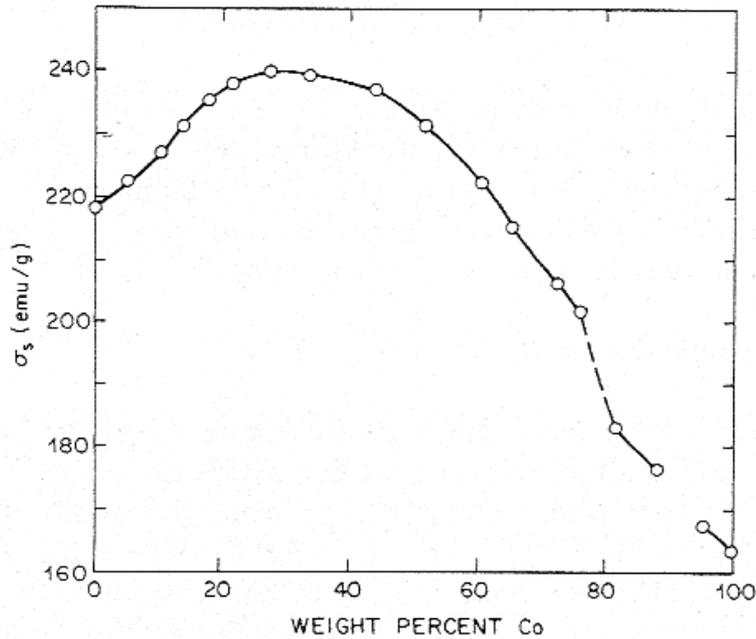
Elevata M_s (24.5 kG per 35% Co)

Bassa K_i

Elevata μ

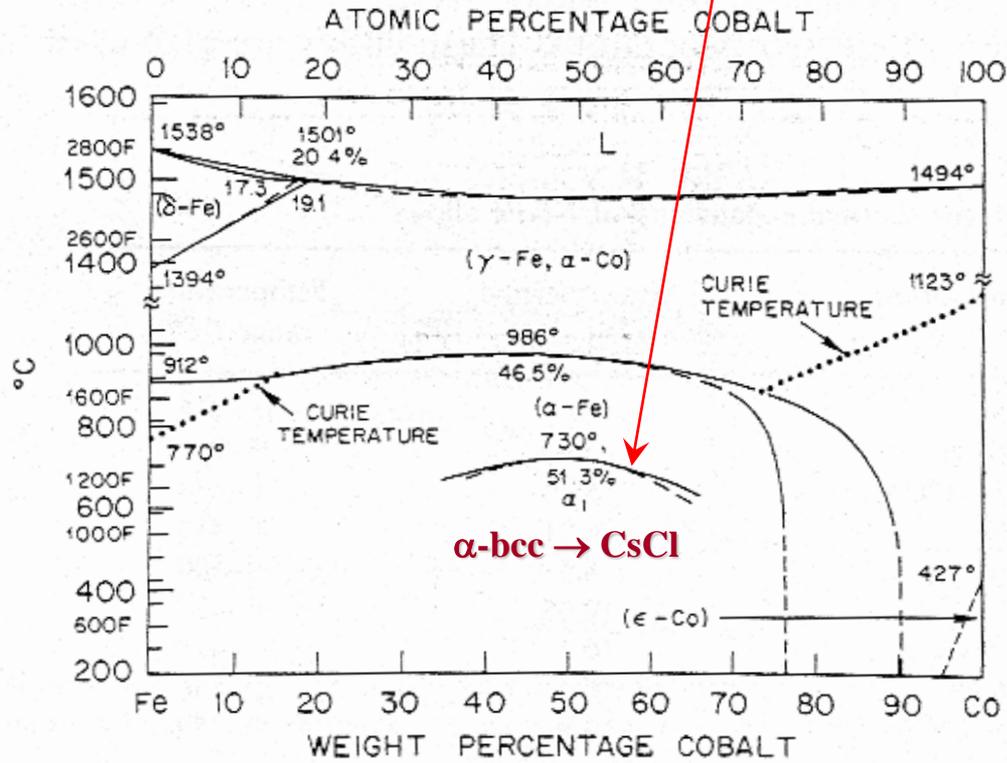


Svantaggi: → 1. Costo elevato



Svantaggi: → 2. Fragilità

Le leghe Fe - Co intorno a 50% fragili per formazione fase α_1 e presenza di impurezze quali C, H, O



Quench impedisce formazione fase α_1

↓
Lavorazione a freddo

↓
Formazione tessitura cristallografica

↓
Proprietà meccaniche anisotropiche

↓
Fragilità



Leghe soft Fe-Co (da Vacuumschmelze G.m.b.H Germany)

DC MAGNETIC PROPERTIES AFTER MAGNETIC FINAL ANNEALING (SOLID MATERIAL) – TYPICAL VALUES

Material	H _c max. A/m	H _c typ. A/m	μ _{max}	J at 10 kA/m T	J at 16 kA/m T	J at 20 kA/m T	J at 40 kA/m T
VACOFLUX 50 ¹⁾	≤ 240	100	7000	2.27	2.28	2.28	2.29
VACODUR 49 ¹⁾³⁾	≤ 240	100	7000	2.27	2.28	2.28	2.29
VACOFLUX 27	≤ 240	150	3000	2.11	2.22	2.27	2.38
VACOFLUX 17 ²⁾	≤ 200	140	3200	1.94	2.04	2.09	2.19
VACOFLUX 18 HR ²⁾	≤ 350	170	2500	1.87	1.96	2.00	2.06
VACOFLUX 9 CR ¹⁾	≤ 200	130	3000	1.70	1.76	1.78	1.80

4. Ferriti

Elevata permeabilità magnetica
Elevata resistività elettrica

Valori molto bassi di dissipazioni in
correnti parassite

Utilizzo a frequenze molto elevate (fino a 500 MHz)



B/H lineare, bassa densità di flusso

Cavi d'antenna, circuiti risonanti, teste di registrazione

Applicazioni

B/H non lineare, densità di flusso elevata

Trasformatori per televisione

B/H altamente non lineare, loop quadrati

Amplificatori magnetici, memorie, switches

Ferriti e cicli di isteresi

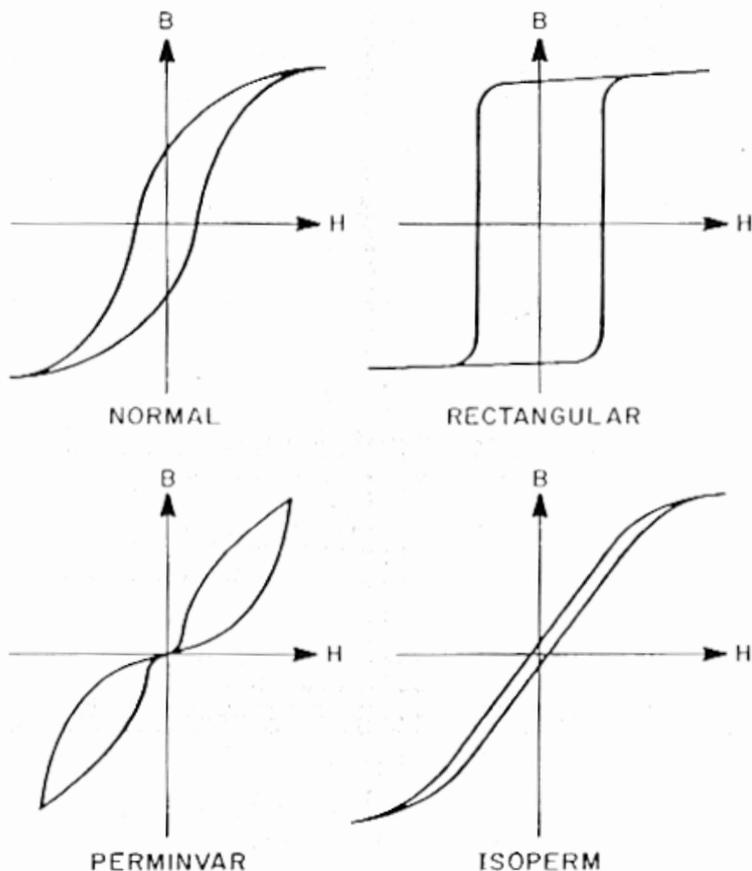


Fig. 37. Different types of hysteresis loops.

Loop normale: materiali con cristalli orientati in maniera casuale; energia di magnetostrizione > energia magnetocristallina. Moderata permeabilità ed elevate dissipazioni

Loop isoperm: bassa anisotropia e bassa magnetostrizione. Movimenti di pareti estremamente reversibili con elevata mobilità. Presentato principalmente da ferriti MnZn con 51÷55% Fe_2O_3 .

Loop perminvar: permeabilità bassa e costante e bassissime dissipazioni isteretiche a bassi campi. Viene osservata in sistemi MnZn e NiZn con ~60% Fe_2O_3 .

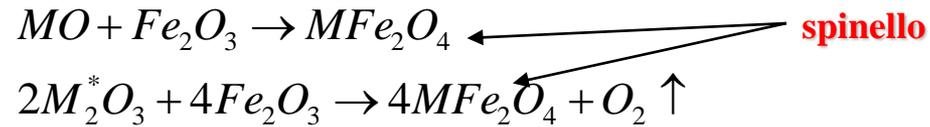
Loop rettangolare: due possibili tipi di loop rettangolari: naturali e indotti. Nei “loop” naturali non è presente tessitura e non è influenzato da trattamenti termici a bassa T. I “loop” indotti sono ottenuti da trattamenti termici in campo applicato o da effetti meccanici (stress) direzionali.

Preparazione ferriti “soft”

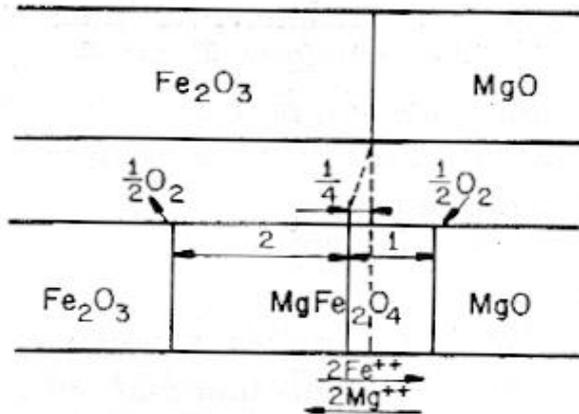
- Preparazione delle polveri
- Compattamento
- Sinterizzazione
- lavorazione meccanica per forma finale



• Preparazione polveri



La fase si forma all'interfaccia tra i reagenti. Reazione allo stato solido (900÷1200°C in aria).



Fattori importanti:

1. Distribuzione dimensioni particelle
2. Tempo di macinazione



- **Compattamento**

Rapporto di compressione 2÷2.5:1
50÷60% densità teorica

Pressatura meccanica

Compattamento isostatico in liquido (utilizzo di pressioni fino a 30000 psi).

Liquidi usati sono acqua, glicerina

- **Sinterizzazione**

Può avvenire con o senza utilizzo di pressioni esterne

Diametro del grano dipende dalla temperatura

$$\bar{d} = K \cdot t^n$$

Con $n = \frac{1}{3}$

\bar{d} Diametro del grano medio

t Tempo di sinterizzazione

K Costante che dipende dalla temperatura

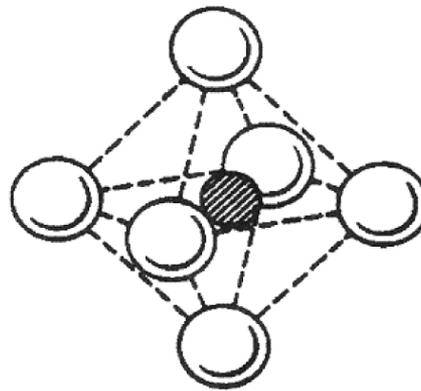
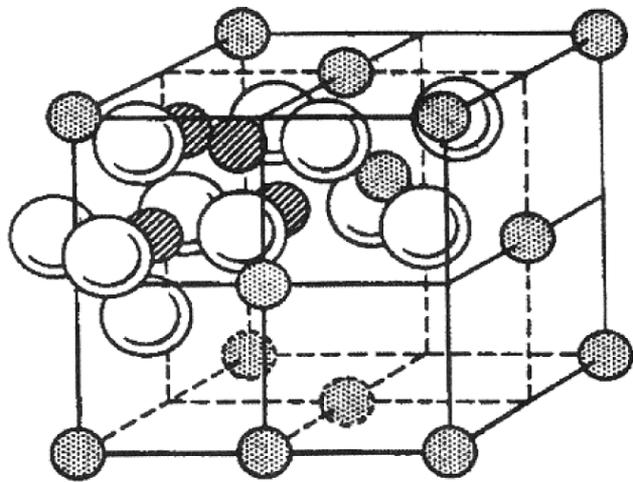
Utilizzo di P esterne permette di arrivare a 99% della densità teorica

- **Lavorazione meccanica**

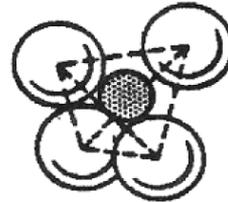
Necessaria per arrivare alle tolleranze finali di utilizzo.

Utilizzata anche la pulitura meccanica delle superfici e a volte anche la lappatura

Controllo sugli stress durante la lavorazione meccanica (**aumento delle dissipazioni e influenza sulla curva permeabilità – temperatura**)



Octahedral interstice
(32 per unit cell)



Tetrahedral interstice
(64 per unit cell)



-  Oxygen
- B**  Cation in octahedral site
- A**  Cation in tetrahedral site

Normal spinels:

divalent ions in A sites
trivalent ions in B sites



Inverse spinels:

trivalent ions in A sites
di- and trivalent ions in B sites

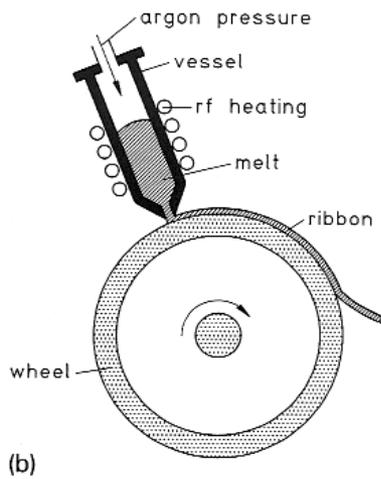
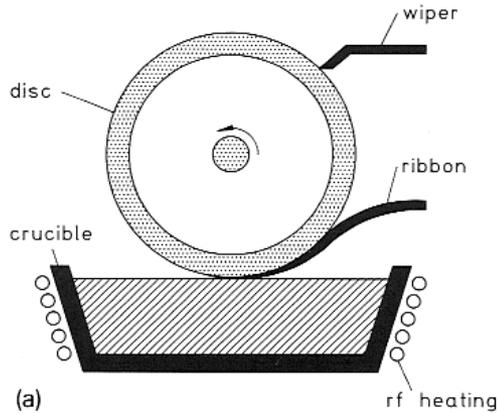


A sites	B sites
$Zn^{2+} - \mu_B$	$Fe^{3+} \uparrow \downarrow \mu_B$
$Fe^{3+} \uparrow \mu_B$	$Fe^{3+} \downarrow Ni^{2+} \downarrow \mu_B$

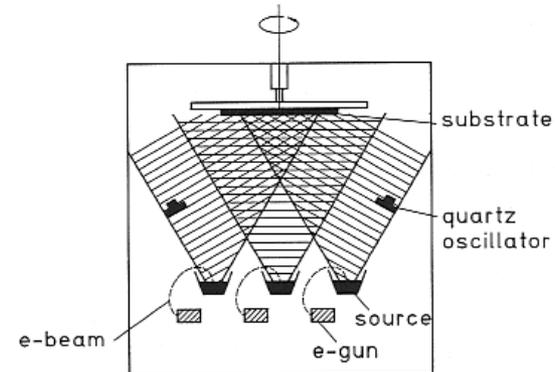
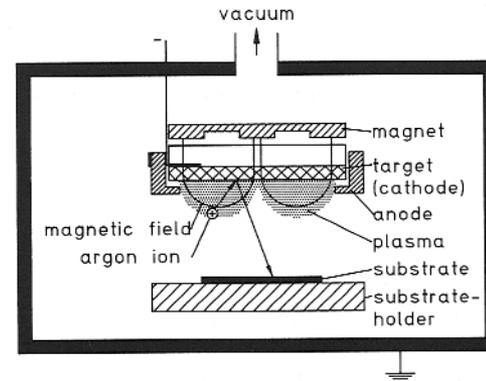
5. Leghe amorfe (*vetri metallici*)

Le leghe amorfe sono materiali rapidamente raffreddati dal fuso in modo da impedire l'ordinamento cristallino a lungo raggio. In questo modo non esiste anisotropia magnetocristallina.

Sintesi preparative



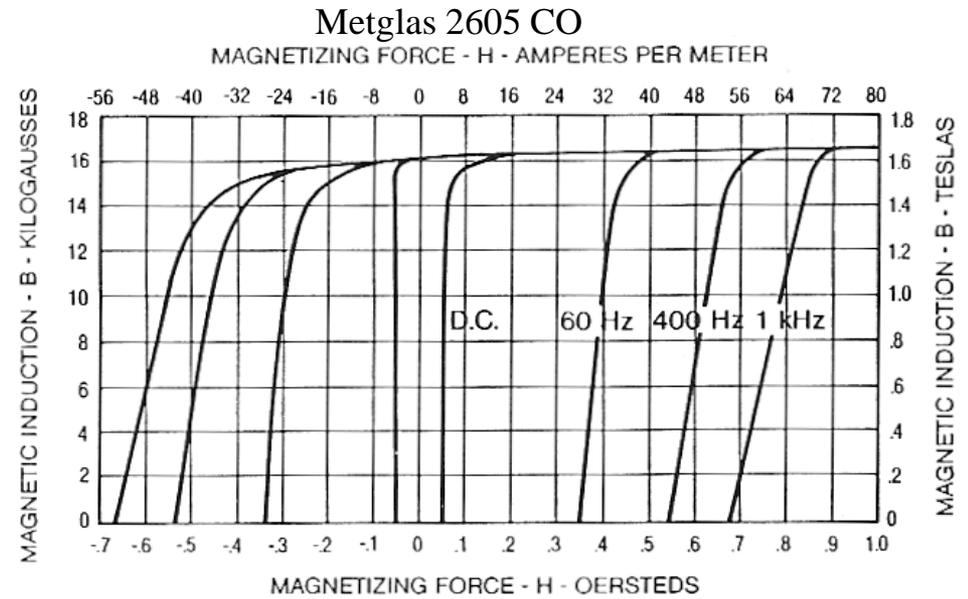
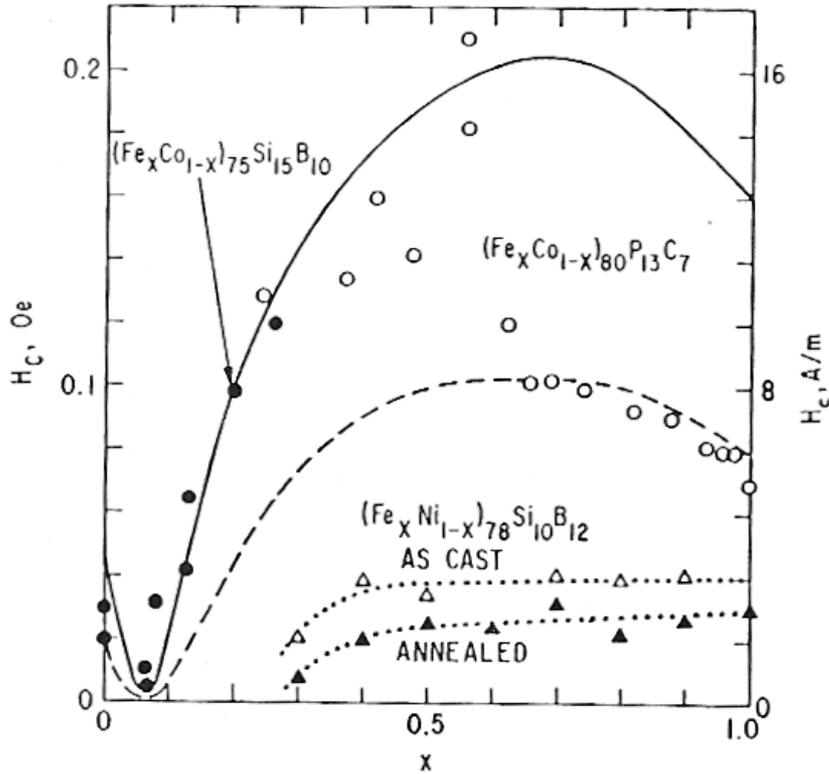
Quench da liquido



Quench da vapore



- Processo di magnetizzazione molto facile
- Elevata resistività elettrica ($\rho = 120 \div 150 \mu\Omega \text{ cm}$)
- Bassa coercività



- Elevata permeabilità
- Basse dissipazioni

