

Università degli Studi di Bologna  
Scuola di Ingegneria e Architettura  
“Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica”

## Metodologie di Progettazione delle Macchine Elettriche M

# Materiali conduttori e magnetici impiegati nella costruzione delle macchine elettriche

*Prof. Giovanni Serra*

Dipartimento di  
Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione “G. Marconi”  
Università degli Studi di Bologna  
Viale Risorgimento, 2  
40136 Bologna  
Tel. 051-2093582/ Fax 051-2093588  
e-mail: [giovanni.serra@mail.ing.unibo.it](mailto:giovanni.serra@mail.ing.unibo.it)

# Materiali costituenti le macchine elettriche

---

## □ Principali materiali costituenti le macchine elettriche

### ● Conduttori

➤ Rame

➤ Alluminio

### ● Magnetici

➤ Ferro laminato

➤ Acciaio

➤ S.M.C.

➤ Magneti permanenti

### ● Isolanti

➤ Solidi

➤ Gassosi

➤ Vernici

➤ Smalti

➤ ecc

---

# Materiali Conduttori

# Materiali Conduttori - Caratteristiche

## □ Principali caratteristiche di un materiale adatto alla realizzazione degli avvolgimenti delle macchine elettriche

- Elevata conducibilità, ovvero bassa resistività  $\rho$ .

➤ argento, **rame**, oro, **alluminio**, cromo

- Convenienza economica

➤ disponibilità in natura

➤ valore di mercato

- Oscillazioni dei prezzi
- Fattori geopolitici

- Buone caratteristiche fisico/meccaniche

➤ resistenza meccanica

➤ densità

➤ lavorabilità

➤ ecc.

	Peso specifico (acqua=100)	Conducibilità (rame=100)
<b>Alluminio</b>	<b>2.699</b>	<b>64</b>
<b>Argento</b>	<b>10.49</b>	<b>104</b>
<b>Cromo</b>	<b>7.2</b>	<b>64</b>
<b>Oro</b>	<b>19.32</b>	<b>70</b>
<b>Rame</b>	<b>8.96</b>	<b>100</b>

# Materiali Conduttori - Conducibilità

---

- Nel caso di uniforme distribuzione della densità di corrente sulla sezione del conduttore, il valore della resistenza elettrica **R** di un conduttore di lunghezza **l** e sezione **S**, è data da

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

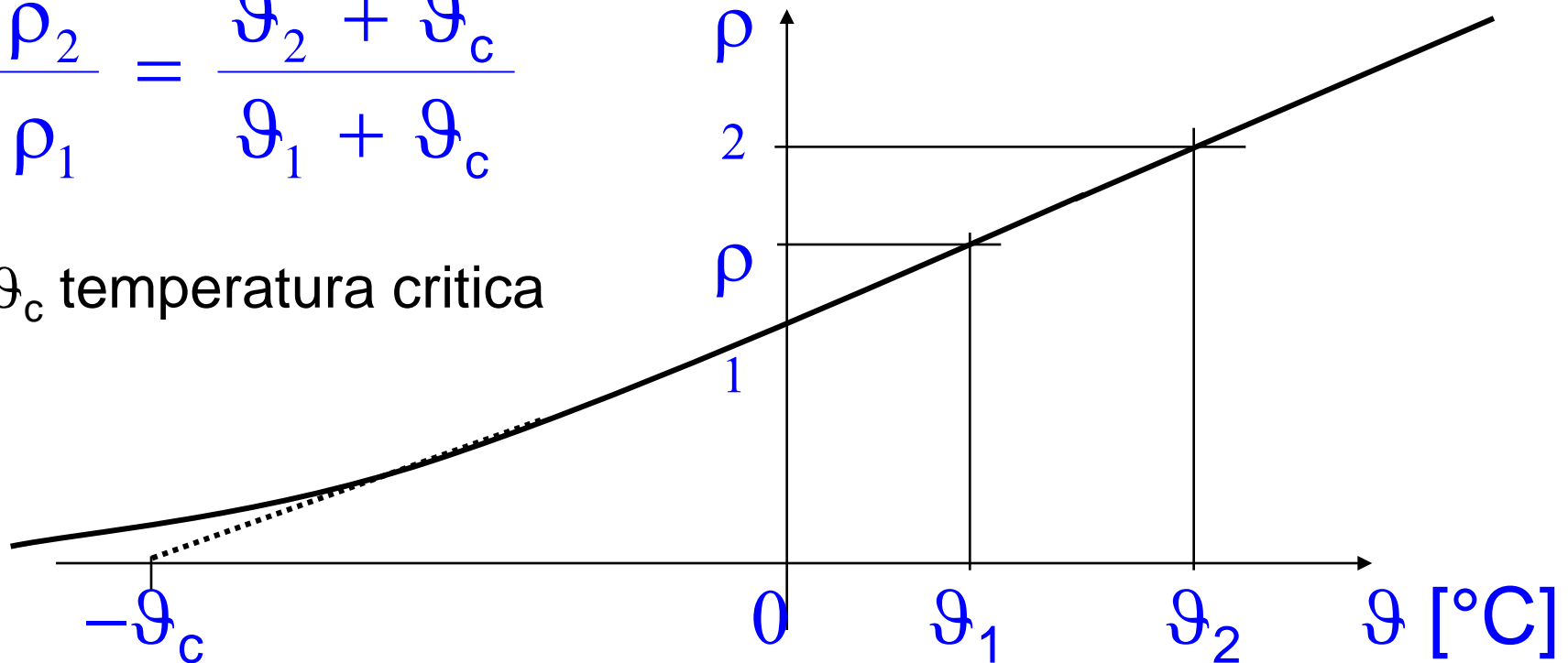
- Il valore di  $\rho$ . è funzione
- del tipo di materiale
  - del grado di purezza
  - della temperatura

# Materiali Conduttori - Conducibilità

- Dipendenza di  $\rho$  dalla temperatura  
 $\rho$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_c}{\vartheta_1 + \vartheta_c}$$

$\vartheta_c$  temperatura critica



# Materiali Conduttori - Conducibilità

---

- La rigorosa dipendenza di  $\rho$  dalla temperatura consente di utilizzare la misura della variazione di resistenza di un avvolgimento da  $R_1$  a  $R_2$  per valutarne la corrispondente variazione di temperatura da  $\vartheta_1$  a  $\vartheta_2$

$$\vartheta_2 = \frac{R_2}{R_1} (\vartheta_1 + \vartheta_c) - \vartheta_c$$

## R A M E

Peso specifico = 8900 Kg/m<sup>3</sup>

$\vartheta_c$  temperatura critica = 234.5 °C

resistività a 0 °C = 0.016  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  =  $1.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

$$\rho_{(\vartheta)} = 0.016 \frac{234.5 + \vartheta}{234.5} = 0.016 (1 + 0.00426 \vartheta)$$

esempi

20 °C  $\rho = 0.0173 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

75 °C  $\rho = 0.021 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

115 °C  $\rho = 0.0238 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$



## ALLUMINIO

Peso specifico = 2700 Kg/m<sup>3</sup>

$\vartheta_c$  temperatura critica = 230.0 °C

resistività a 0 °C = 0.026 Ωmm<sup>2</sup>/m = 2.6 x 10<sup>-8</sup> Ωm.

$$\rho_{(\vartheta)} = 0.026 \frac{230 + \vartheta}{230} = 0.026 (1 + 0.0042 \vartheta)$$

esempi

20 °C       $\rho = 0.0282 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

75 °C       $\rho = 0.0345 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

115 °C       $\rho = 0.039 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

## Confronto Rame - Alluminio

Si confrontano due soluzioni costruttive che prevedono l'impiego del rame o dell'alluminio

- ❑ stessa lunghezza  $L$
- ❑ stessa intensità di corrente  $I$
- ❑ stesse perdite Joule  $\Delta P$

$$\Delta P = \frac{\rho L}{S} I^2 \quad \text{Peso} = LS\gamma$$
$$S = \frac{LI^2}{\Delta P} \rho \quad \text{Peso} = \frac{L^2 I^2}{\Delta P} \rho \gamma$$

### Risultato

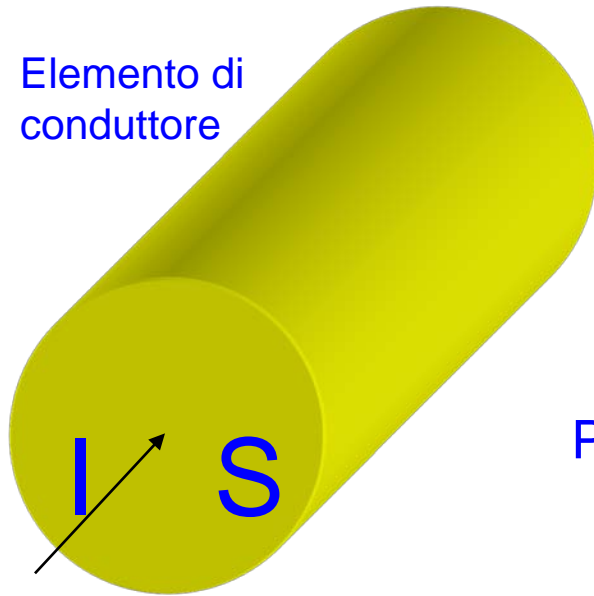
$$\frac{\text{Sez. Alluminio}}{\text{Sez. Rame}} = 1.64$$

$$\frac{\text{Peso Alluminio}}{\text{Peso Rame}} = 0.5$$

# Materiali Conduttori: Addensamento di corrente

Nel caso in cui la densità di corrente non sia uniformemente distribuita sulla sezione del conduttore, si verificano le cosiddette “**perdite addizionali**”

Elemento di  
conduttore



$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}' = \frac{\mathbf{I}}{S} + \mathbf{J}'$$

$$I = \int_S \mathbf{J} dS = \int_S (\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}') dS = \int_S \mathbf{J}_0 dS + \int_S \mathbf{J}' dS \Rightarrow I + 0$$

$$P_j = \int_V \rho J^2 dV = L \int_S \rho J^2 ds = L \int_S \rho (\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}')^2 ds =$$

$$= L \int_S (\rho J_0^2 + \rho J'^2 + 2\rho \mathbf{J}_0 \mathbf{J}') ds = RI^2 + P_{\text{add}}$$

essendo  $2\rho \int_S \mathbf{J}' ds = 0$

---

# Materiali Magnetici

# Materiali Magnetici - Generalità

---

- ❑ I materiali magnetici sono utilizzati per la realizzazione dei circuiti magnetici delle macchine elettriche, spesso anche con funzioni strutturali
- ❑ Principali caratteristiche di un materiale adatto alla realizzazione dei circuiti magnetici delle macchine elettriche
  - Elevata permeabilità magnetica
  - Basse perdite
  - Buone caratteristiche fisico/meccaniche
    - resistenza meccanica (parti strutturali)
    - lavorabilità (cesoiatura, tranciatura, punzonatura)
    - compatibilità ambientale (ossidazione)
  - Costo contenuto
    - i provvedimenti che consentono di migliorare le caratteristiche aumentano i costi

# Materiali Magnetici - Caratteristiche

---

Dal punto di vista magnetico i materiali possono essere classificati in tre gruppi

- ❑ Diamagnetici

- Permeabilità relativa leggermente inferiore ad 1  
    ➤ rame, argento

- ❑ Paramagnetici

- Permeabilità relativa leggermente superiore ad 1

- ❑ **Ferromagnetici**

- Permeabilità relativa molto superiore ad 1  
    ➤ Ferro, Nichel, Cobalto

- ❑ I materiali maggiormente utilizzati nella realizzazione dei circuiti magnetici delle macchine elettriche sono le leghe di Ferro-Silicio, in forma di laminati
- ❑ Le caratteristiche “magnetiche” del materiale sono correlate al diagramma che rappresenta il legame B-H (Induzione-Campo magnetico)
- ❑ Come è noto, nel caso di magnetizzazione ciclica il diagramma B-H assume l'aspetto di un ciclo detto **“ciclo di isteresi”** del materiale.

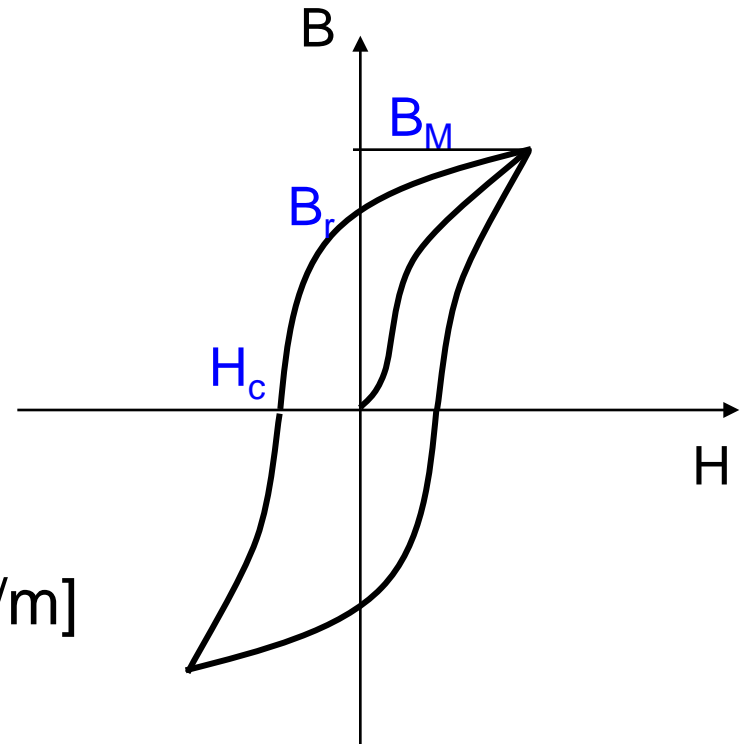
## Ciclo di isteresi

- $B_r$  Induzione residua
- $H_c$  campo coercitivo

□ L'area della figura è proporzionale all'energia dissipata in ogni ciclo

□ permeabilità del materiale [H/m]

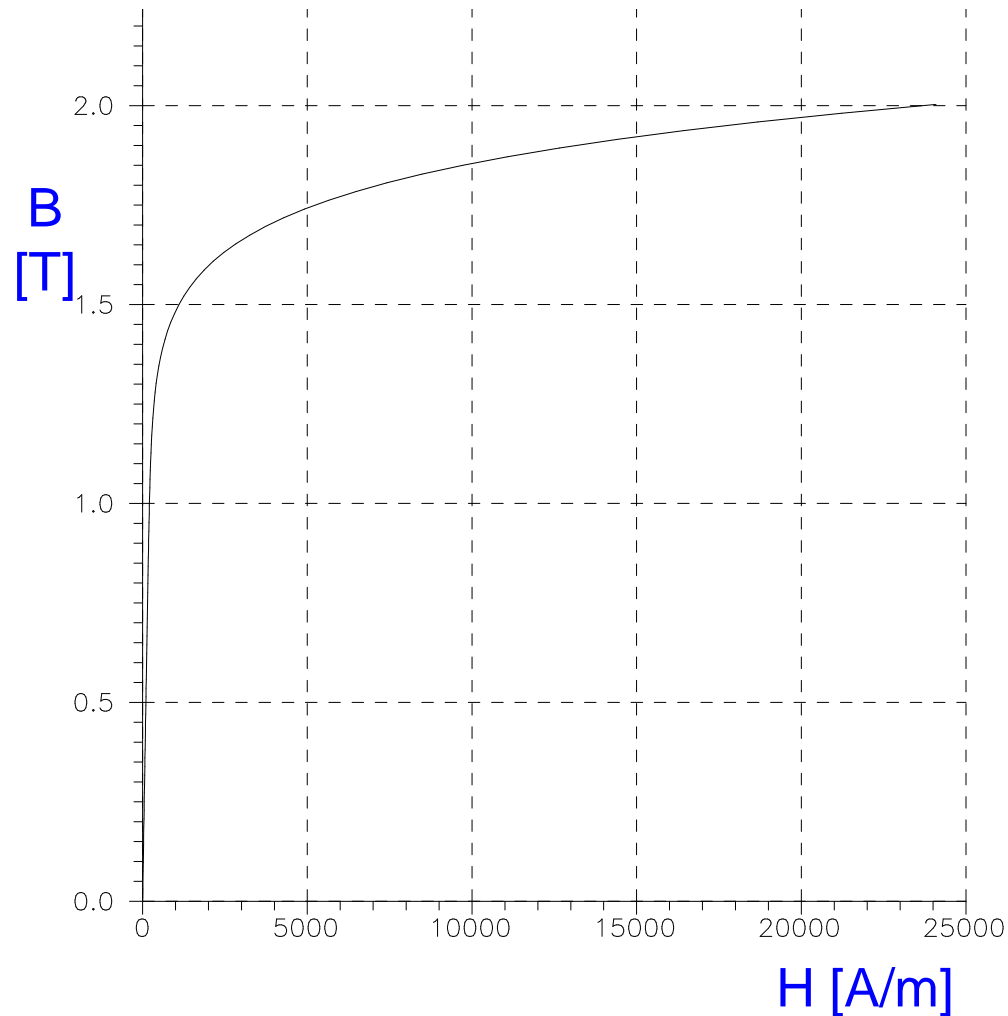
$$\mu = \frac{B}{H} \quad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu}{1.256 \cdot 10^{-6}}$$





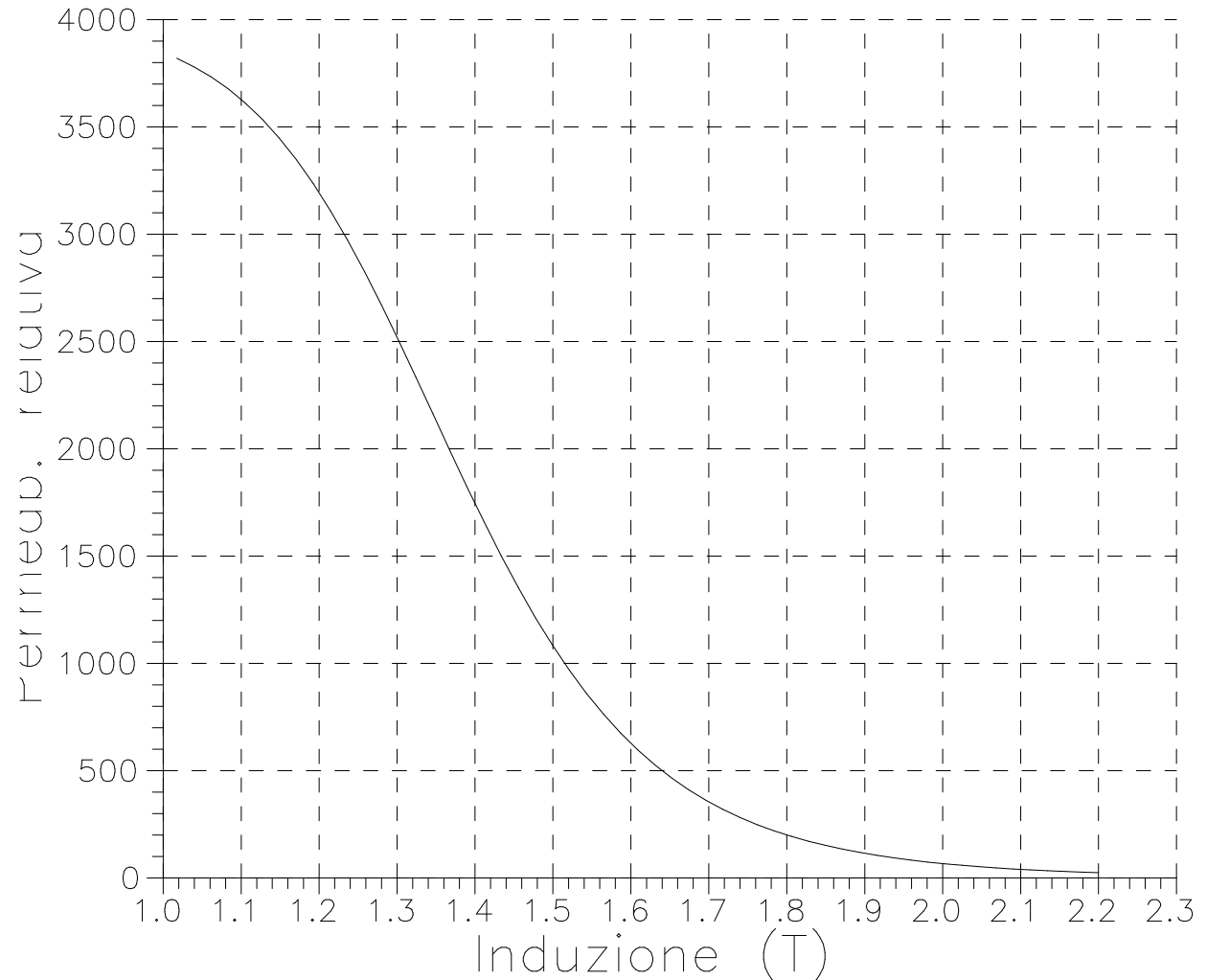
# Materiali ferromagnetici

Curva di magnetizzazione normale per un lamierino magnetico di largo impiego



# Materiali ferromagnetici

Andamento della permeabilità relativa in funzione dell'induzione, per un lamierino magnetico di largo impiego



## Perdite per ISTERESI nella magnetizzazione ciclica

- ❑ Il materiale sottoposto a magnetizzazione ciclica è sede di perdite di potenza: **PERDITE PER ISTERESI**

$$P_i = K_i f B_M^{1.7 \div 2.2} \left[ \frac{W}{Kg} \right]$$

- ❑ L'esponente di  $B_M$ , dedotto da Steinmetz, è correlato alla forma del ciclo di isteresi. Per valori di induzione tra 1.5 e 2 T vale circa  $2 \div 2.2$ .
- ❑ Le perdite per isteresi, non dipendono dallo spessore di laminazione.

## Perdite per CORRENTI PARASSITE nella magnetizzazione ciclica

- ❑ Il ferro del circuito magnetico è sede di fem indotte e quindi, essendo conduttore elettrico, di correnti che producono calore per effetto Joule.
- ❑ I circuiti magnetici per correnti alternate devono quindi essere laminati con spessori compresi fra 0.28 e 1 ÷ 2 mm. I vari lamierini sono poi isolati elettricamente.

$$P_{cp} = K_{cp} f^2 B_M^2 \left[ \frac{W}{Kg} \right]$$

- ❑ Le perdite per correnti parassite sono direttamente proporzionali al quadrato dello spessore del lamierino.

## Perdite complessive nei materiali ferromagnetici sottoposti a magnetizzazione ciclica.

Per ogni Kg di materiale si ha

$$P_f = P_i + P_{cp}$$

Assumendo l'esponente 2 per le perdite per isteresi

$$P_f = K_i f B_M^\alpha + K_{cp} f^2 B_M^2 \quad \left[ \frac{W}{Kg} \right]$$

Isteresi

Corr. parassite

Orientativamente

$$P_i \cong 60 \div 75 \% P_f$$

## Cifra di perdita di un lamierino CEI 105-1

Si indica con  $C_p[B_M, f]$  la **CIFRA DI PERDITA** di un lamierino, ovvero la potenza dissipata in calore per ogni Kg di materiale, all'induzione  $B_M$  ed alla frequenza  $f$ .

I valori convenzionali di riferimento sono

$$B_M = 1 \text{ T}, \quad f = 50 \text{ Hz}.$$

Tuttavia viene spesso fornito il valore anche all'induzione di 1.5 T.

- ❑ Il Silicio riduce le perdite per c.p. Non si può tuttavia superare il 5% per l'insorgere di durezza e fragilità inaccettabili.
- ❑ Un appropriato processo di laminazione e ricottura contribuisce sensibilmente alla riduzione delle perdite.

## Fattore di laminazione

E' il rapporto fra il volume netto di ferro ed il volume occupato dal pacco

**0.92** per lamierini particolarmente sottili (0.35 mm, trasformatori)

**0.94 ÷ 0.95** per lamierini di 0.5 ÷ 0.65 mm

## Ricottura

Le operazioni di cesoiatura, tranciatura e punzonatura determinano tensioni meccaniche che producono **aumento delle perdite**. Un trattamento termico di ricottura in atmosfera riducente può ripristinare le proprietà originali del materiale

## Densità $\delta$

E' funzione del contenuto di Silicio.

**Ferro dolce (puro)**  $\delta = 7850 \text{ Kg/m}^3$

**Lamierini fortemente legati:**  $\delta = 7560 \text{ Kg/m}^3$

# Analisi Perdite nel ferro

Separazione contributi di perdita e calcolo perdite a frequenza  $f$

$$P_f = K_i f B_M^\alpha + K_{cp} f^2 B_M^2$$

( 1 lb = 0.45359237 Kg )

$$P_i = K_i f B_M^\alpha$$

$$P_{cp} = K_{cp} f^2 B_M^2$$

Sistema per il calcolo di  $K_i$ ,  $K_{cp}$  e  $\alpha$

$P_{1,50}$  = Perdite 1T, 50 Hz

$P_{1,60}$  = Perdite 1T, 60 Hz

$P_{1.5,50}$  = Perdite 1.5T, 50 Hz

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{1,50} = K_i 50 + K_{cp} 50^2 \\ P_{1.5,50} = K_i 50 * 1.5^\alpha + K_{cp} 50^2 1.5^2 \\ P_{1,60} = K_i 60 + K_{cp} 60^2 \end{array} \right.$$



Separazione contributi di perdita e calcolo perdite a frequenza f

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{1, 50} = K_i 50 + K_{cp} 50^2 \\ P_{1.5, 50} = K_i 50 * 1.5^\alpha + K_{cp} 50^2 1.5^2 \\ P_{1, 60} = K_i 60 + K_{cp} 60^2 \end{array} \right.$$

Soluzione  
sistema

$$\left\{ \begin{array}{l} K_i = \frac{1.44 P_{1, 50} - P_{1, 60}}{12} \\ K_{cp} = \frac{P_{1, 60} - 60 K_i}{60^2} \\ \alpha = \frac{\text{Log} \left( \frac{P_{1.5, 50} - 50^2 1.5^2 K_{cp}}{50 K_i} \right)}{\text{Log}(1.5)} \end{array} \right.$$

$$P_f = K_i f B_M^\alpha + K_{cp} f^2 B_M^2$$

# Analisi Perdite nel ferro

Separazione contributi di perdita e calcolo perdite a frequenza  $f$

$$P_f = K_i f B_M^\alpha + K_{cp} f^2 B_M^2 \quad (1 \text{ lb} = 0.45359237 \text{ Kg})$$

$$P_i = K_i f B_M^\alpha$$

$$P_{cp} = K_{cp} f^2 B_M^2$$

Sistema per il calcolo di  $K_i$ ,  $K_{cp}$  e  $\alpha$

$P_{B1,f1}$  = Perdite 1 T,  $f_1$  Hz

$P_{B1,f2}$  = Perdite 1T,  $f_2$  Hz

$P_{B2,f1}$  = Perdite  $B_2$  T,  $f_1$  Hz

$$P_{1,f1} = K_i f_1 + K_{cp} f_1^2 B_1^2$$

$$P_{B1,f2} = K_i f_2 + K_{cp} f_2^2$$

$$P_{B2,f1} = K_i f_1 B_2^\alpha + K_{cp} f_1^2 B_2^2$$

## Separazione contributi di perdita e calcolo perdite a frequenza f

$$P_{1,f1} = K_i f_1 + K_{cp} f_1^2$$

$$P_{1,f2} = K_i f_2 + K_{cp} f_2^2$$

$$P_{B2,f1} = K_i f_1 B_2^\alpha + K_{cp} f_1^2 B_2^2$$

Soluzione  
sistema

$$K_i = \frac{P_{1,f1} \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 - P_{B1,f2}}{f_2 \left( \frac{f_2}{f_1} - 1 \right)}$$

$$K_{cp} = \frac{P_{1,f2} - K_i f_2}{f_2^2}$$

$$\alpha = \frac{\text{Log} \left( \frac{P_{B2,f1} - K_{cp} f_1^2 B_2^2}{K_i f_1} \right)}{\text{Log}(B_2)}$$

$$P_f = K_i f B_M^\alpha + K_{cp} f^2 B_M^2$$

# Lamierino “Test”

---

- ❑ Perdite a 50Hz,  $1T = 2$  [W/Kg]
- ❑ Perdite a 50Hz,  $1,5T = 4.5$  [W/Kg]
- ❑ Perdite a 60Hz,  $1T = 2.53$  [W/Kg]
- ❑ Risultato:  $K_i = 2.92E-02$   $K_{cp} = 2.17E-04$   $\alpha = 2$
- ❑ Perdite specifiche calcolate a 60Hz e  $1.5T = 5.7$  W/Kg = 2.6 W/Lb
- ❑ Rapporto  $P_{cp}/(P_{cp}+P_i)$  a 50 Hz = 0.271

## Lamierino 0.5 mm

---

- ❑ Perdite a 50Hz, 1T = 1.73 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 50Hz, 1,5T = 4.05 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 60Hz, 1T = 2.19 [W/Kg]
- ❑ Risultato:  $K_i = 2.51E-02$   $K_{cp} = 1.9E-04$   $\alpha = 2.13$
- ❑ Perdite specifiche calcolate a 60Hz e 1.5T = 5.12 W/Kg = 2.3 W/Lb
- ❑ Rapporto  $P_{cp}/(P_{cp} + P_i)$  a 50 Hz = 0.284

## Lamierino 0.35 mm

---

- ❑ Perdite a 50Hz, 1T = 1.25 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 50Hz, 1,5T = 2.98 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 60Hz, 1T = 1.56 [W/Kg]
- ❑ Risultato:  $K_i = 2.0E-02$   $K_{cp} = 1.0E-04$   $\alpha = 2.18$
- ❑ Perdite specifiche calcolate a 60Hz e 1.5T = 3.7 W/Kg = 1.69 W/Lb
- ❑ Rapporto  $P_{cp}/(P_{cp}+P_i)$  a 50 Hz = 0.21

# Lamierino AST 5350

---

- ❑ Perdite a 50Hz, 1T = 1.96 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 50Hz, 1.5T = 4.4 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 60Hz, 1T = 2.5 [W/Kg]
- ❑ Risultato:  $K_i = 2.69E-02$   $K_{cp} = 2.47E-04$   $\alpha = 1.99$
- ❑ Perdite specifiche calcolate a 60Hz e 1.5T = 5.6 W/Kg = 2.56 W/Lb
- ❑ Rapporto  $P_{cp}/(P_{cp}+P_i)$  a 50 Hz = 0.314

## SMC SOMALOY500, 7.1Kg/dmc

---

Valori dedotti da cataloghi  
e pubblicazioni

- ❑ Perdite a 50Hz, 1T = 7.3 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 50Hz, 1,5T = 16.15 [W/Kg]
- ❑ Perdite a 60Hz, 1T = 8.8 [W/Kg]
- ❑ Risultato:  $K_i = .145$   $K_{cp} = 2.15E-05$   $\alpha = 1.953$
- ❑ Perdite specifiche calcolate a 60Hz e 1.5T = 19.4 W/Kg = 8.82 W/Lb
- ❑ Rapporto  $P_{cp}/(P_{cp}+P_i)$  a 50 Hz = 7.24E-03



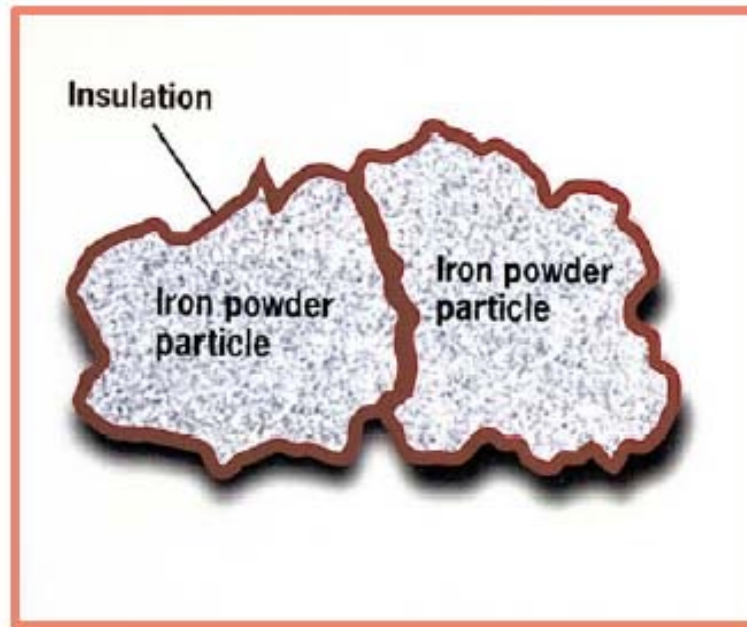
---

# Soft Magnetic Composite

# Soft Magnetic Composite

---

- ❑ SMC-materials (Soft Magnetic Composites) are basically iron powder particles coated with an electrically insulated layer as shown schematically in Figure 1.



# Soft Magnetic Composite

- ❑ The electromagnetic and mechanical properties of the finished component will depend not only on the SMC powder but also on the mix, i.e. the added lubricant or lubricant/ binder and the process, for example, cold or warm compaction.
- ❑ The type of mix will also dictate the maximum heat treatment temperature.
- ❑ Figure 2 illustrates some production routes used for the SMC material Somaloy™500.

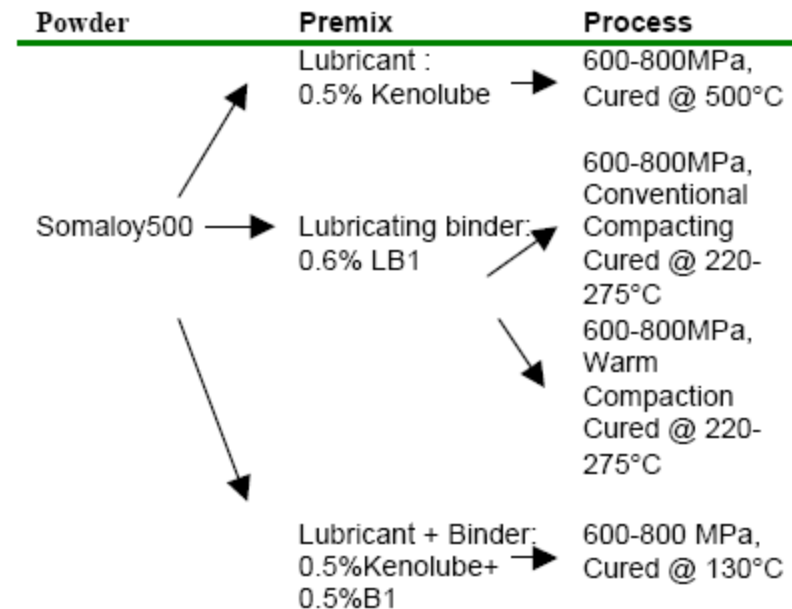


Fig. 2 Processing opportunities with Somaloy™ 500

# Soft Magnetic Composite

---

- ❑ A general rule of thumb is that
  - less additive and higher heat treatment temperature will improve the magnetic properties
  - but also result in lower strength.
  
- ❑ A low amount of additive results in a powder mix that can be compacted to higher densities, which is beneficial for the magnetic properties.
  
- ❑ During compaction stress is introduced in the particles, which deteriorates the soft magnetic properties.

# Soft Magnetic Composite

---

- ❑ The higher the heat-treatment temperature is set, the higher the degree of stress relief.
- ❑ However, it is crucial that no sintering take place between the particles, as the dynamic losses would increase rapidly with frequency.

# SMC - Processo produttivo



# Soft Magnetic Composite

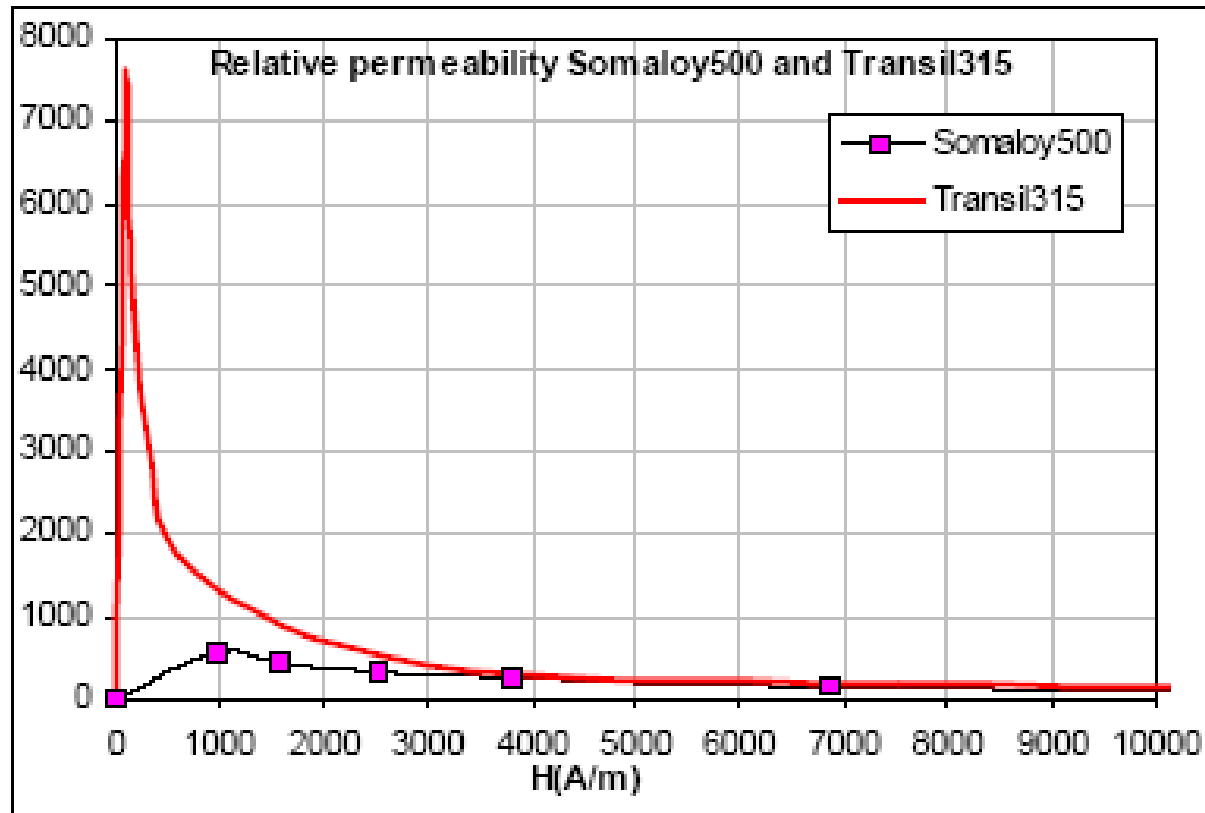


Fig.6 Relative permeability of Somaloy 500 and Transil 315 (laminated)

# Soft Magnetic Composite

---

To date even the very best SMC materials offer the machine designer a series of negative features, principally:

- Low permeability (typically  $< 500$ ; laminations will manage several thousand)
- Low saturation (an intrinsic saturation of circa 1.8T as compared to 2T for laminations)
- High iron loss at typical frequencies (circa 10W/kg @ 1.5T, 50Hz as compared to  $< 3$  W/kg @ 1.5T, 50 Hz for laminations – although a more realistic figure for laminations after punching and assembly is 5W/kg)
- Low mechanical strength, especially in tension (as low as 20MPa, as compared to 500MPa for laminations)



# Soft Magnetic Composite

---

The surprising thing (and most practising machine designers need a great deal of persuasion to accept the argument) is that

- the isotropic properties
- the smooth surface finish
- the facility with which complex shapes can be made
- the good tolerance

overcome all of these disadvantages.

***This is only true in the right application  
and with considerably different topologies  
and design balance.***

# Soft Magnetic Composite

The saturation level of an SMC-component with high density is comparable to laminates.

However, most machines operate below saturation and due to the lower permeability the magnetic induction will be lower in an SMC-component.

This can be compensated in the design by using more iron in the critical regions.

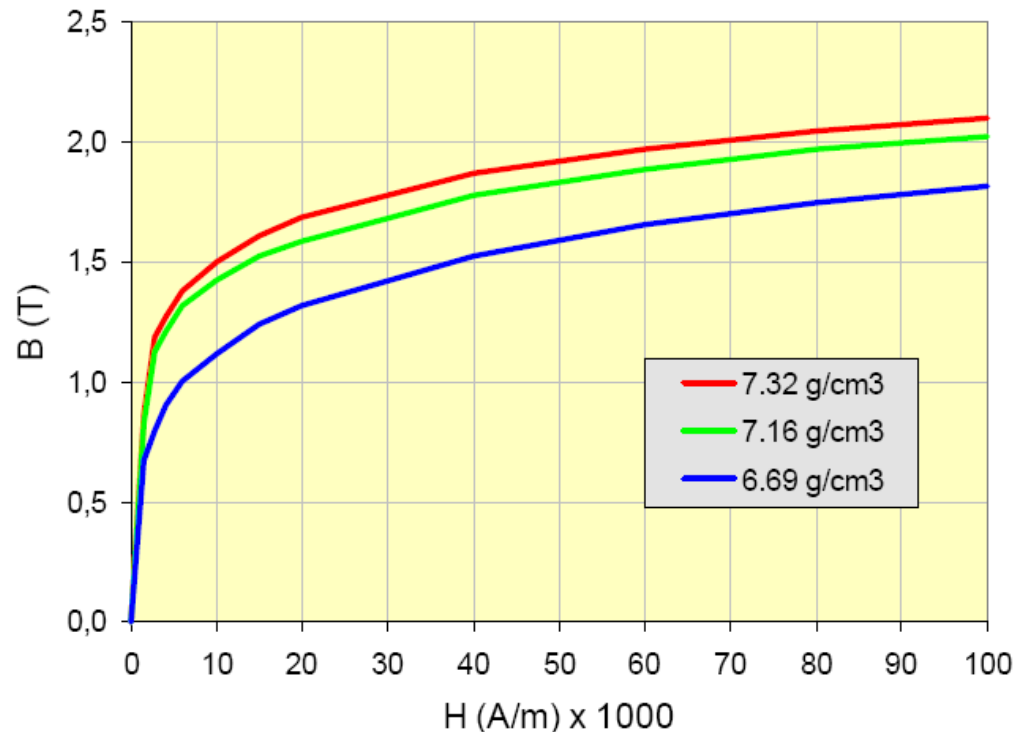
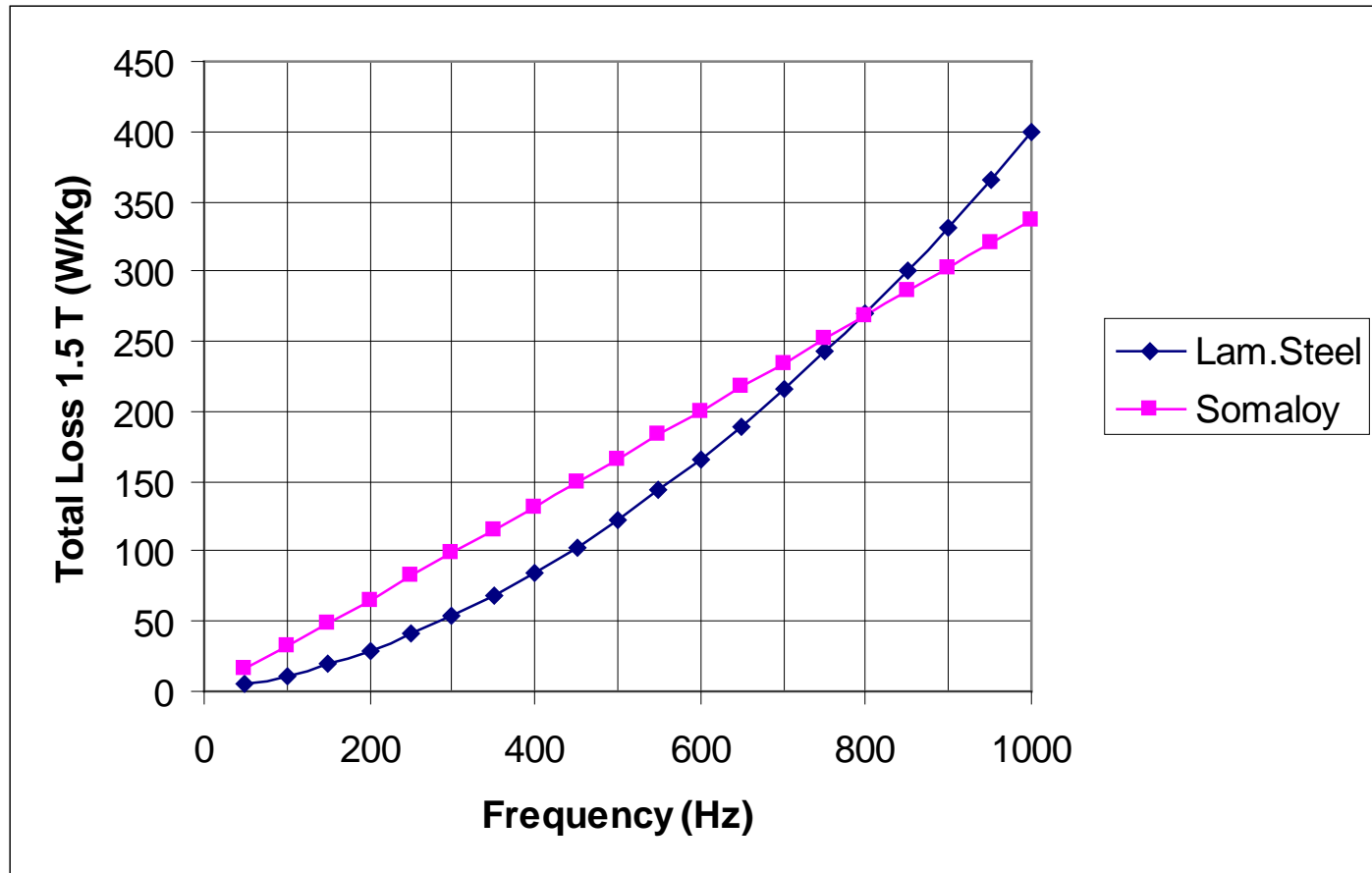


Fig.7 Typical B-H curves of Somaloy™500 with different densities.

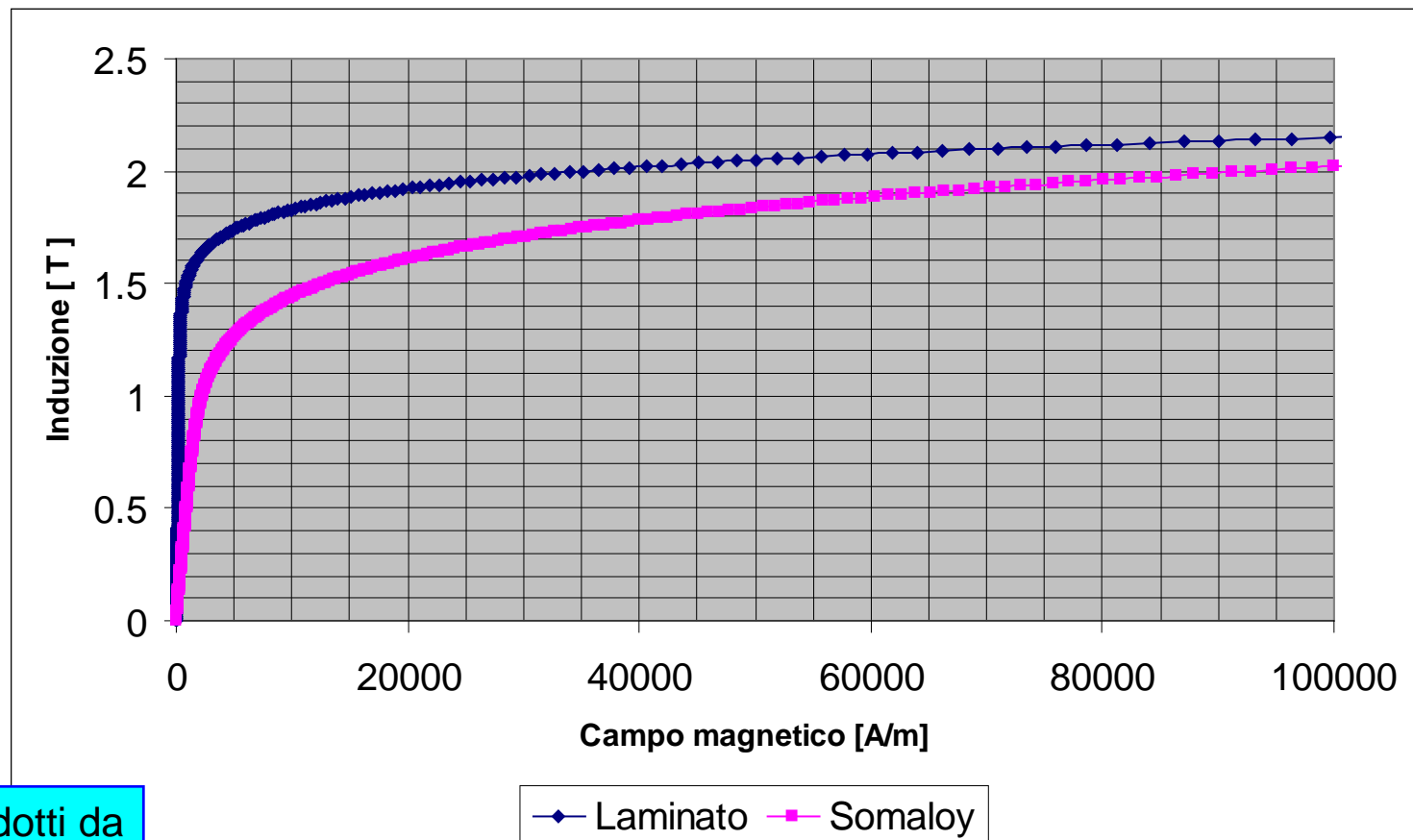
# Soft Magnetic Composite

Confronto perdite  
S.M.C. - Lamierino



# Soft Magnetic Composite

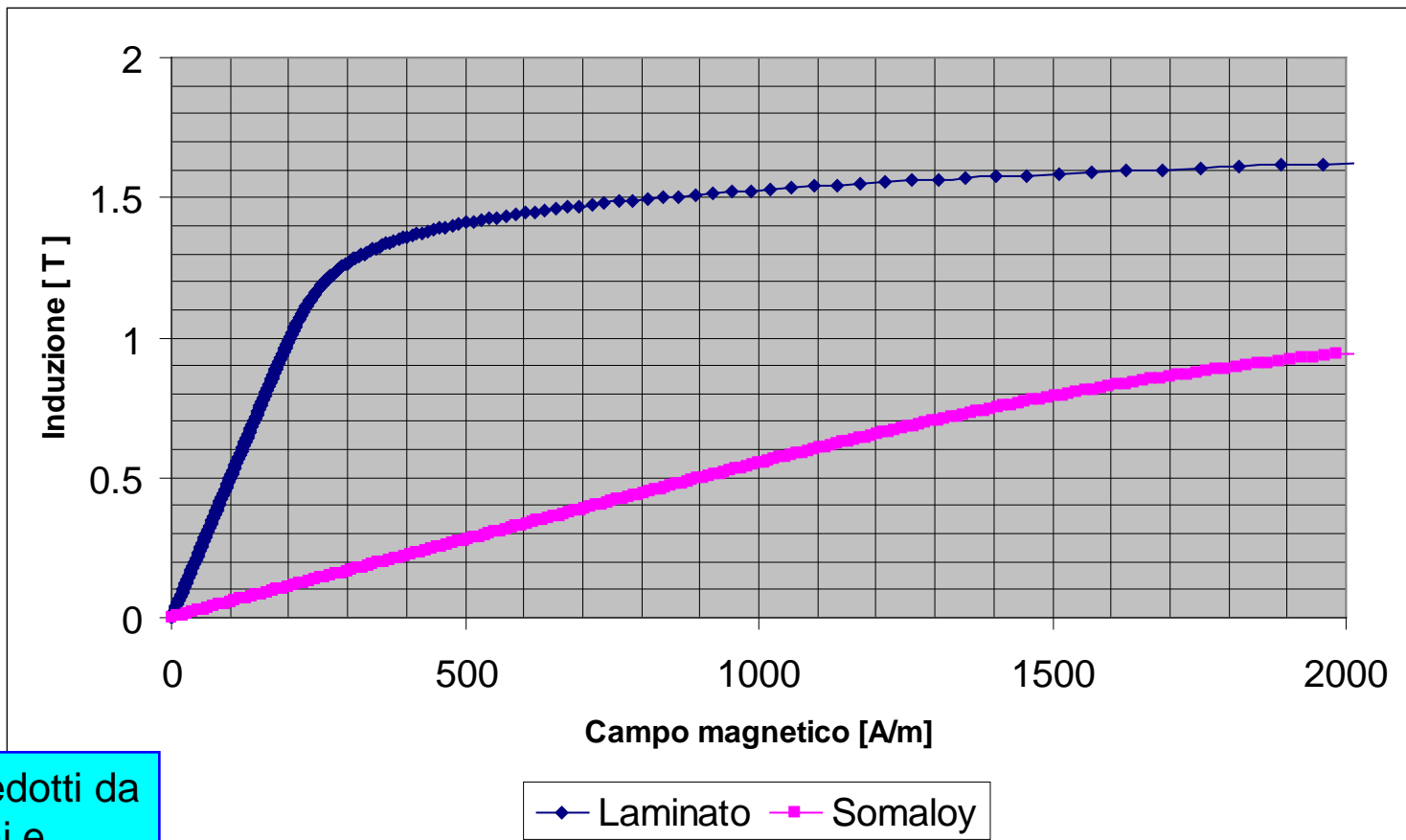
Confronto Curva B-H  
S.M.C. – Laminato  
(elevati valori di campo)



Valori dedotti da  
cataloghi e  
pubblicazioni

# Soft Magnetic Composite

Confronto Curva B-H  
S.M.C. – Laminato  
(bassi valori di campo)



Valori dedotti da  
cataloghi e  
pubblicazioni

---

F i n e