

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

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 ρ .
 - ➔ 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)
Allumino	2.699	64
Argento	10.49	104
Cromo	7.2	64
Oro	19.32	70
Rame	8.96	100

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 ρ . è funzione
 - del tipo di materiale
 - del grado di purezza
 - della temperatura

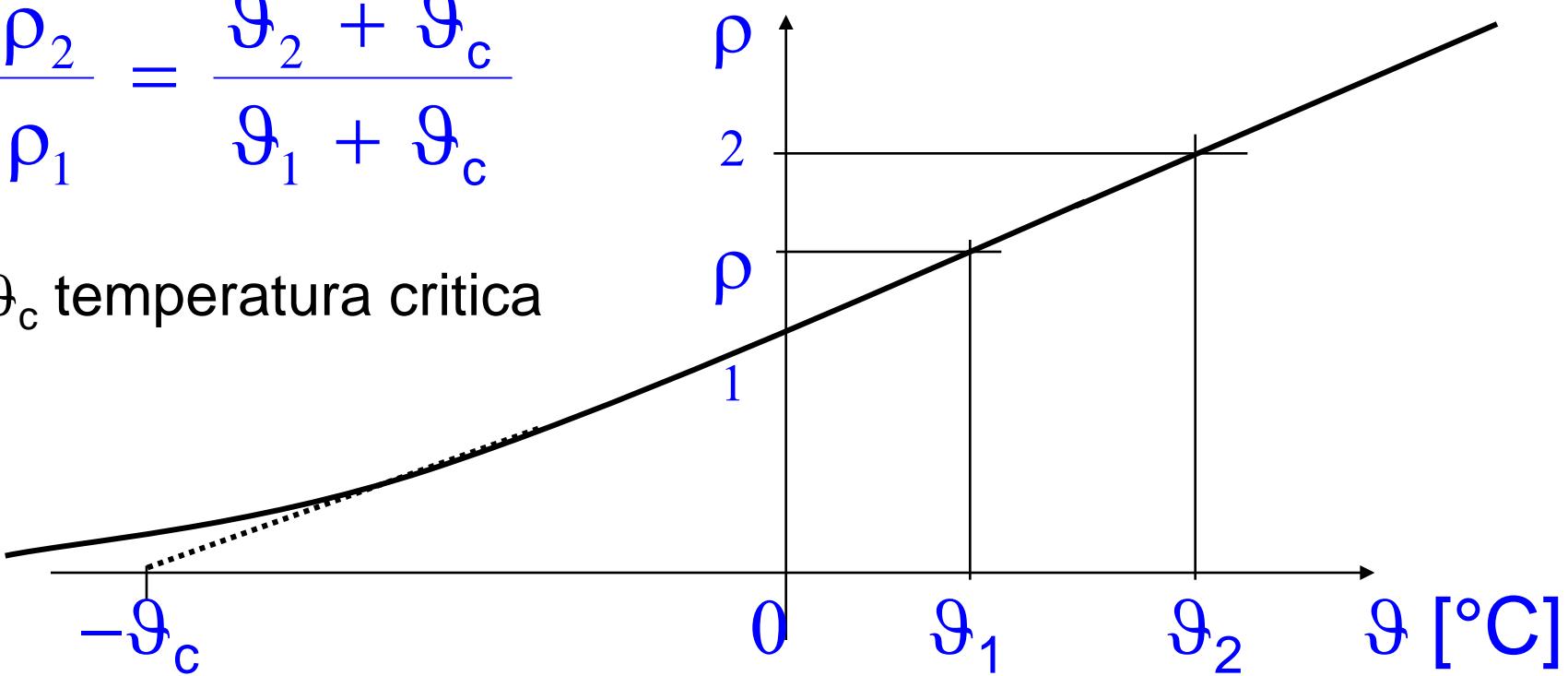
Materiali **Conduttori** - Conducibilità

- Dipendenza di ρ dalla temperatura

$$\rho$$

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

ϑ_c temperatura critica



Materiali **Conduttori** - Conducibilità

- La rigorosa dipendenza di ρ 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 ϑ_1 a ϑ_2

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

R A M E

Peso specifico = 8900 Kg/m³

ϑ_c temperatura critica = 234.5 °C

resistività a 0 °C = 0.016 Ωmm²/m = 1.6 x 10⁻⁸ Ωm.

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

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

Materiali Conduttori: ALLUMINIO

ALLUMINIO

Peso specifico = 2700 Kg/m³

ϑ_c temperatura critica = 230.0 °C

resistività a 0 °C = 0.026 Ωmm²/m = 2.6 x 10⁻⁸ Ωm.

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

esempi

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

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

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

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 ΔP

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

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

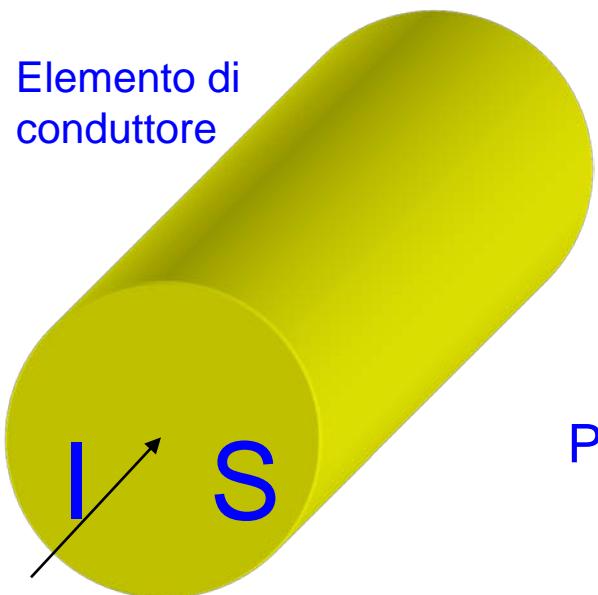
Risultato

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

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

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”



$$J = J_0 + J' = \frac{I}{S} + J'$$
$$I = \int_S J dS = \int_S (J_0 + J') ds = \int_S J_0 ds + \int_S J' ds = I + 0$$

$$P_j = \int_V \rho J^2 dV = L \int_S \rho J^2 ds = L \int_S \rho (J_0 + J')^2 ds =$$

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

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

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 (cesoatura, traciatura, 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

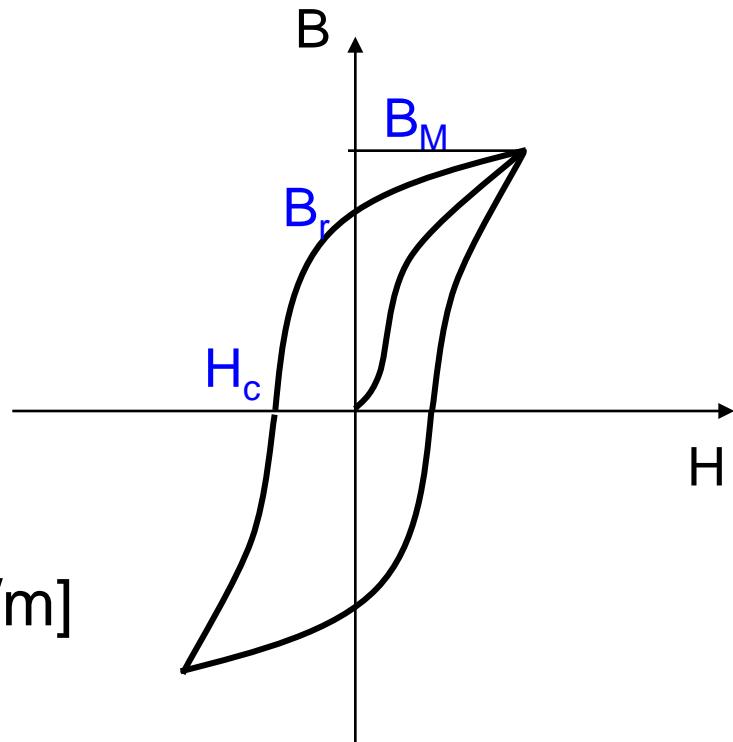
Materiali ferromagnetici

- 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 digramma B-H assume l’aspetto di un ciclo detto **“ciclo di isteresi”** del materiale.

Ciclo di isteresi

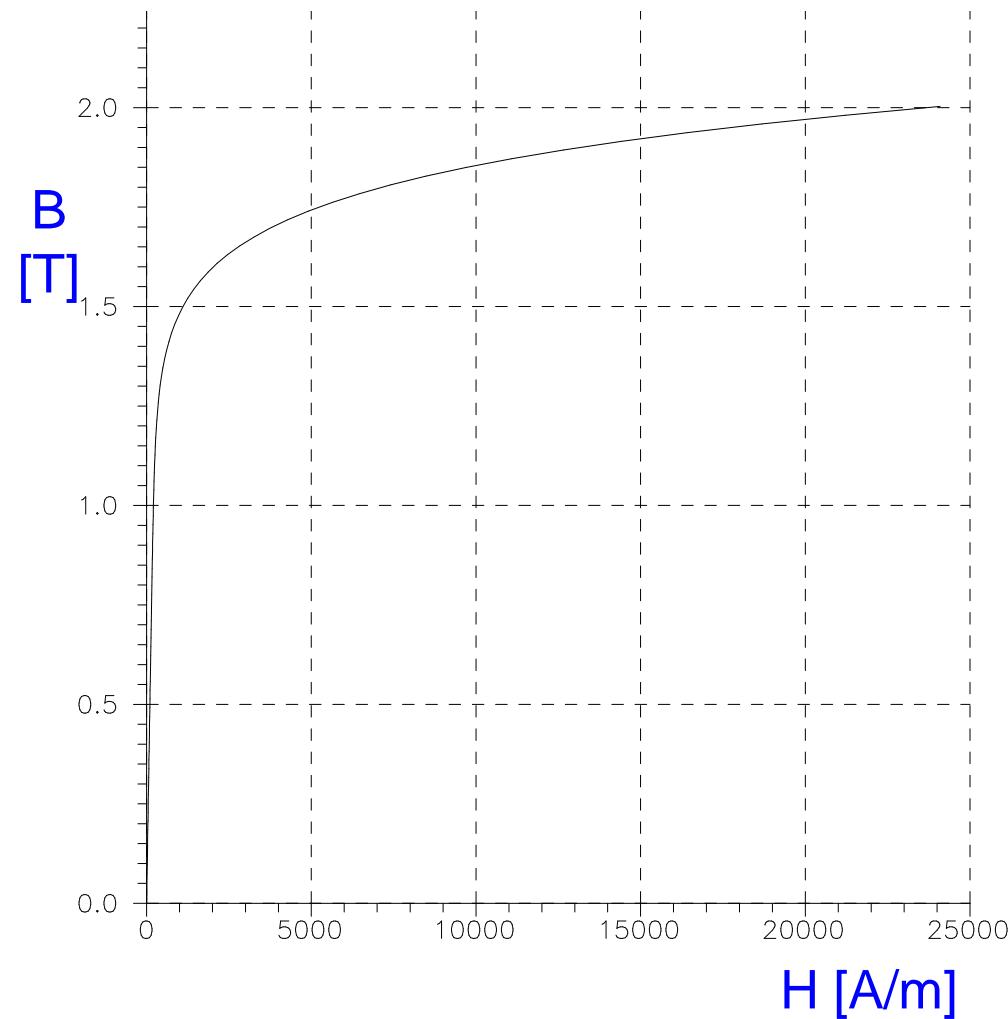
- B_r Induzione residua
 - H_c campo coercitivo
- L'area della figura è proporzionale all'energia dissipata in ogni ciclo
- permeabilità del materiale [H/m]

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



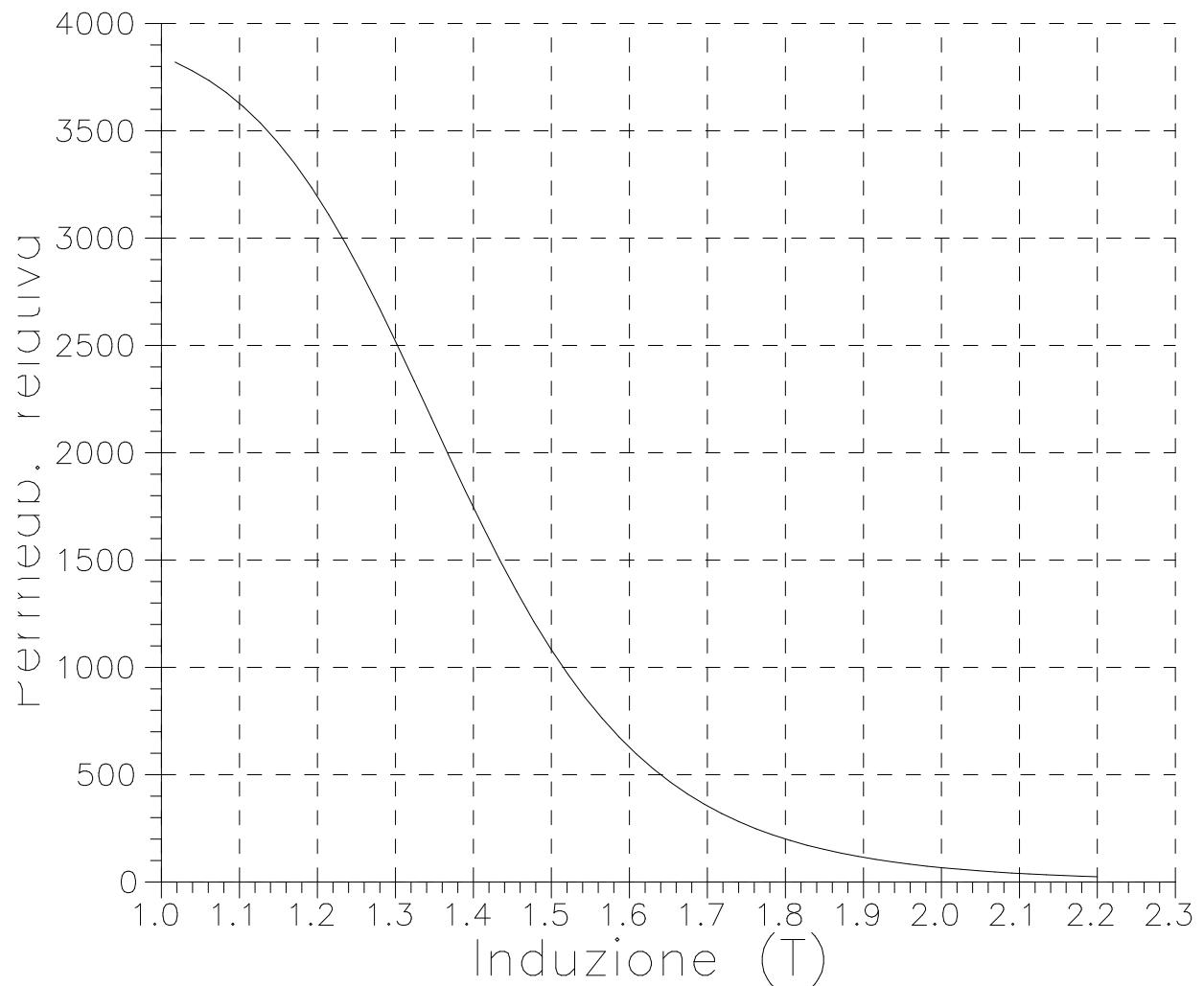
Materiali ferromagnetici

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 ÷ 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.

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

- 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

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

↑ ↑
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 δ

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

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

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

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

Sistema per il calcolo di K_i , K_{cp} e α

$P_{1,50}$ = 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

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

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

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 α

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

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

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



$$P_{1,f1} = K_{i1} f_1 + K_{cp} f_1^2 B_1^2$$

$$P_{B1,f2} = K_{i2} f_2 + K_{cp} f_2^2 B_1^2$$

$$P_{B2,f1} = K_{i1} f_1 B_2^\alpha + K_{cp} f_1^2 B_2^2$$

Separazione contributi di perdita e calcolo perdite a frequenza f

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{1,f_1} = K_i f_1 + K_{cp} f_1^2 \\ P_{1,f_2} = K_i f_2 + K_{cp} f_2^2 \\ P_{B2,f_1} = K_i f_1 B_2^\alpha + K_{cp} f_1^2 B_2^2 \end{array} \right.$$

Soluzione
sistema

$$K_i = \frac{P_{1,f_1} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 - P_{B2,f_1}}{f_2 \left(\frac{f_2}{f_1} - 1 \right)}$$

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

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

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

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: $Ki= 2.92E-02$ $Kcp= 2.17E-04$ $\alpha= 2$
- 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: $Ki = 2.69E-02$ $Kcp = 2.47E-04$ $\alpha = 1.99$
- Perdite specifiche calcolate a 60Hz e $1.5T = 5.6$ W/Kg = 2.56 W/Lb
- Rapporto $Pcp/(Pcp+Pi)$ a 50 Hz = 0.314

SMC SOMALOY500, 7.1Kg/dmc

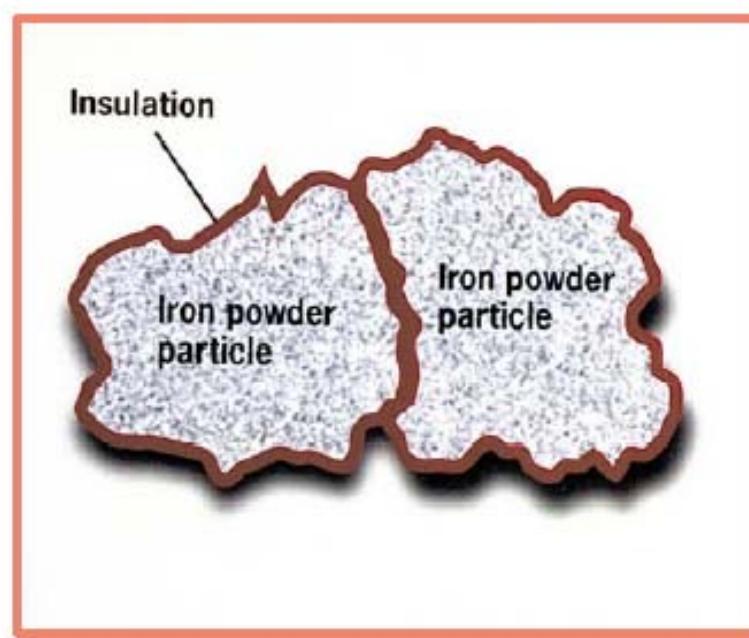
- Perdite a 50Hz, 1T = 7.3 [W/Kg]
- Perdite a 50Hz, 1,5T = 16.15 [W/Kg]
- Perdite a 60Hz, 1T = 8.8 [W/Kg]
- Risultato: $K_i = .145$ $K_{cp} = 2.15E-05$ $\alpha = 1.953$
- Perdite specifiche calcolate a 60Hz e $1.5T = 19.4$ W/Kg = 8.82 W/Lb
- Rapporto $P_{cp}/(P_{cp}+P_i)$ a 50 Hz= $7.24E-03$

Valori dedotti da cataloghi
e pubblicazioni

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 SomaloyTM500.

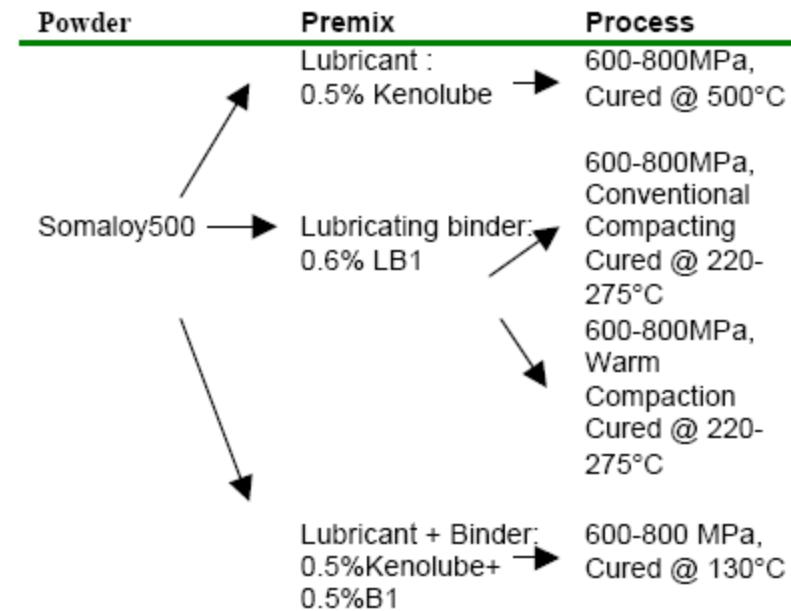


Fig. 2 Processing opportunities with SomaloyTM 500

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

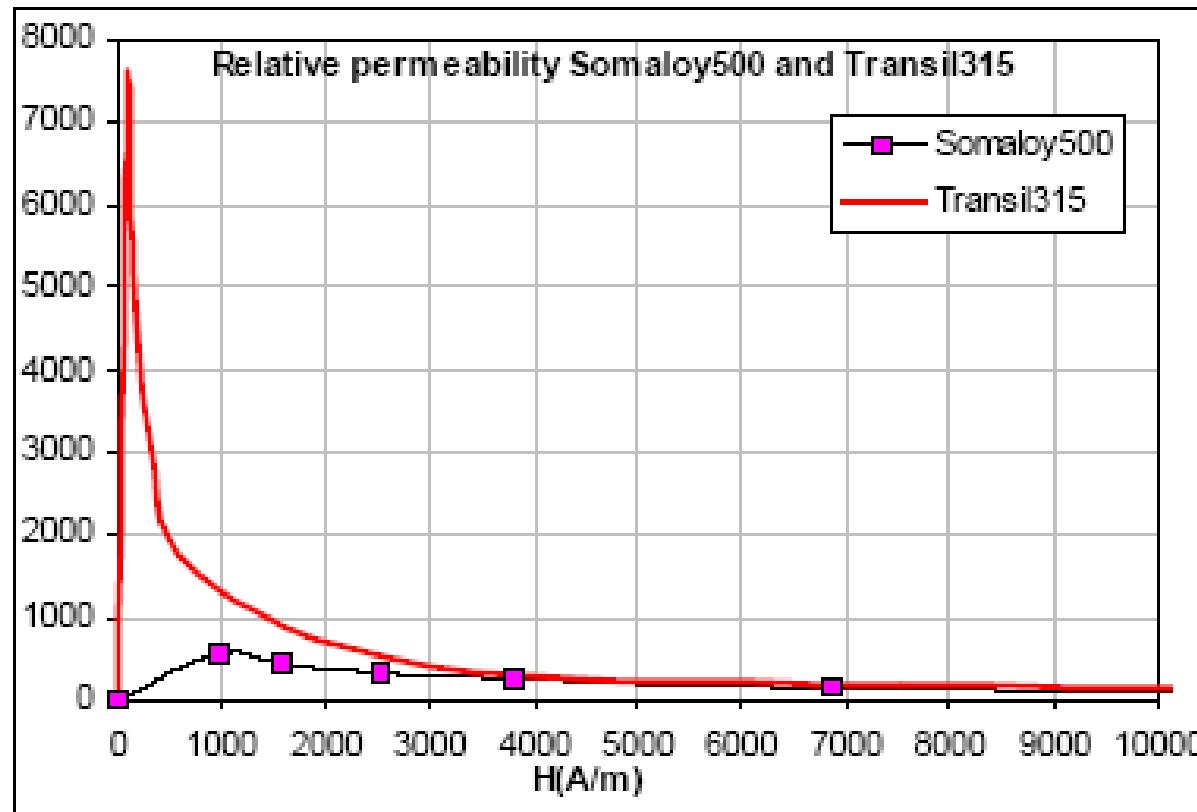


Fig.6 Relative permeability of Somaloy 500 and Transil 315 (laminated)

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.

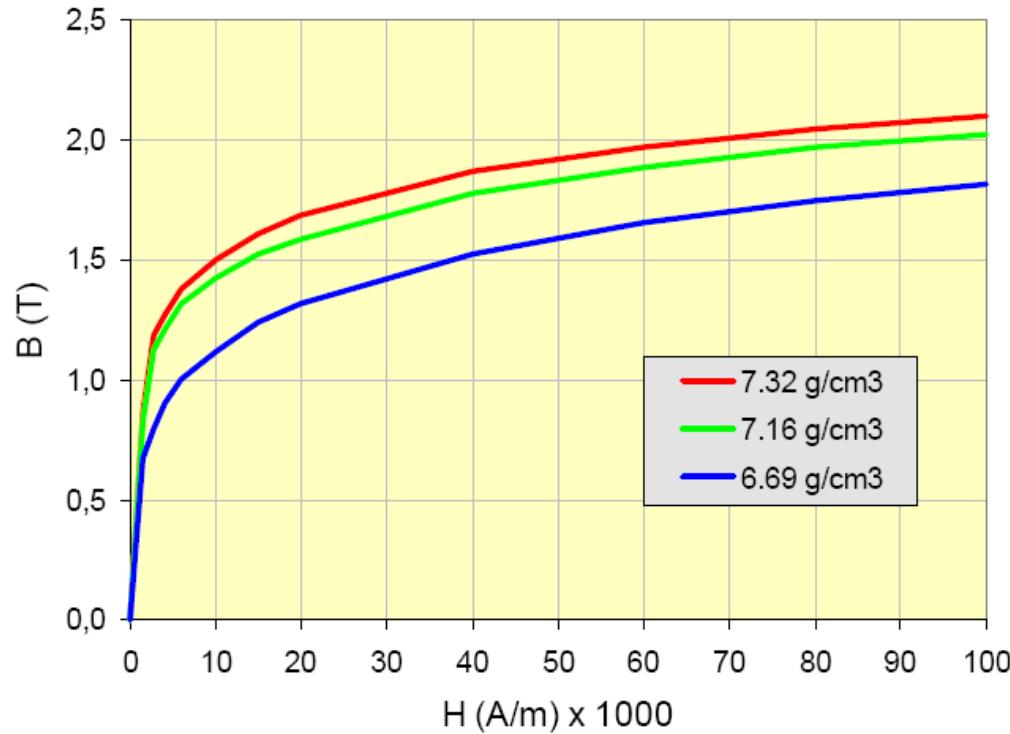
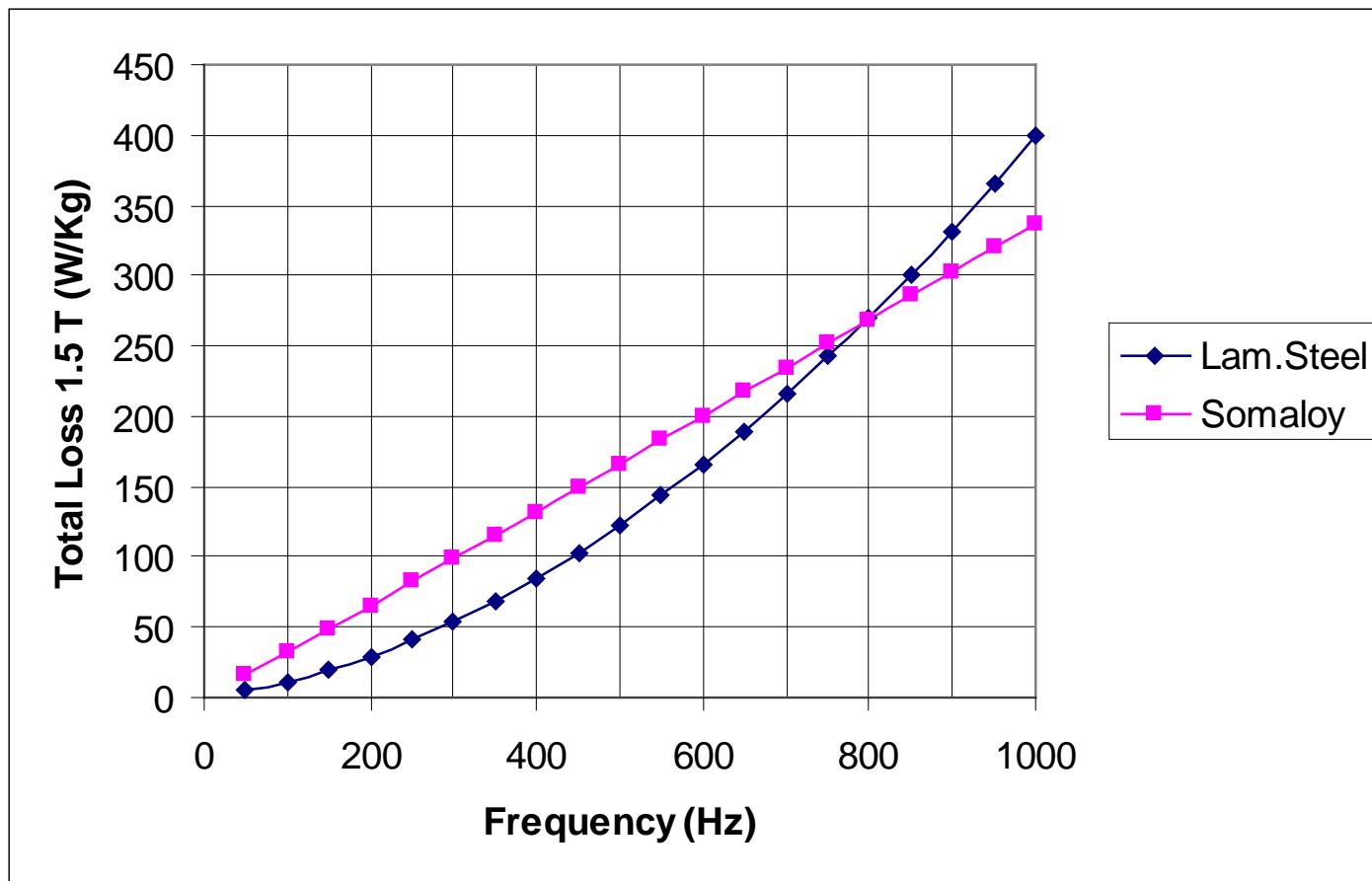


Fig.7 Typical B-H curves of Somaloy™500 with different densities.

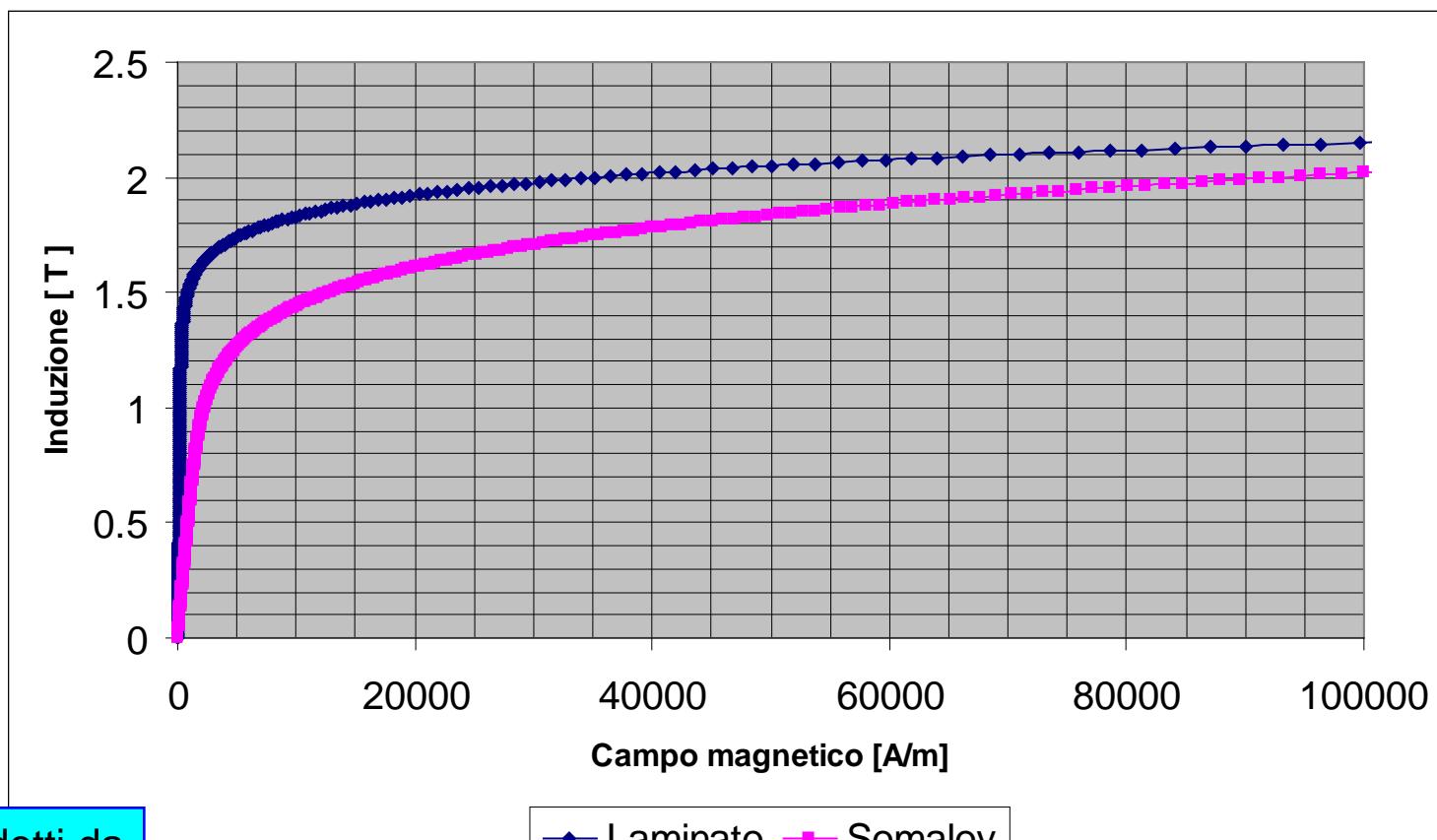
Soft Magnetic Composite

Confronto perdite
S.M.C. - Lamierino



Soft Magnetic Composite

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

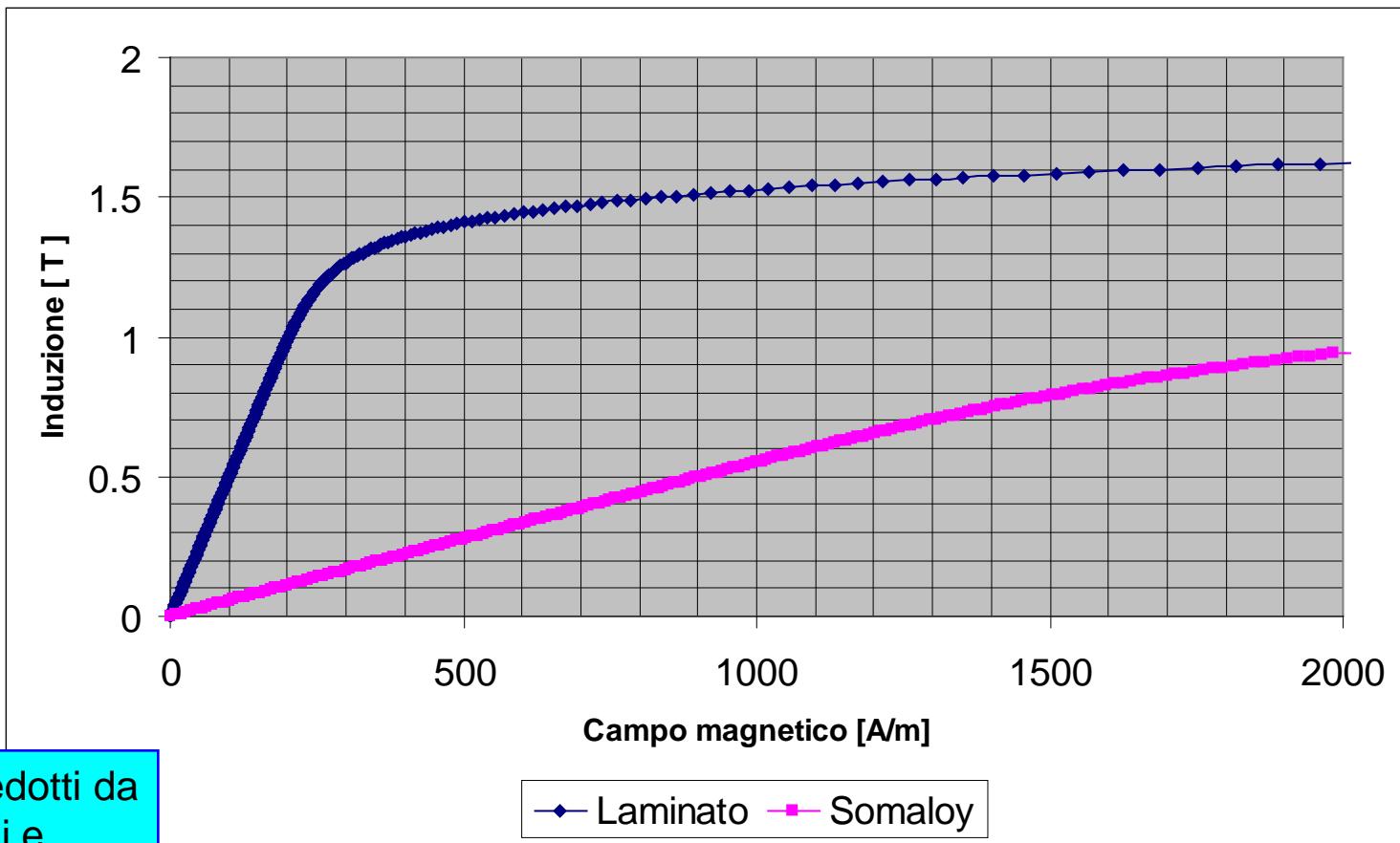


Valori dedotti da
cataloghi e
pubblicazioni

—●— Laminato —■— Somaloy

Soft Magnetic Composite

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



Valori dedotti da
cataloghi e
pubblicazioni

◆ Laminato ■ Somaloy

F i n e