

# Materiais Magnéticos

Macios (soft)

Fe-Si

# Materiais macios

## Principais características desejáveis

### Magnéticas

- ❑ Alta magnetização de saturação
- ❑ Alta permeabilidade magnética
- ❑ Mínima dissipação de energia

### Mecânicas

- ❖ Boa conformação mecânica
- ❖ Fácil de cortar
- ❖ Alta resistência à oxidação e corrosão
- ❖ Barato
- ❖ Reciclável

# Principais materiais macios

**Cristalinos a base de Fe**

**Chapas de Fe-Si de grão orientado**

**Chapas finas de Fe-Si**

**Altos teores de Si em Fe-Si**

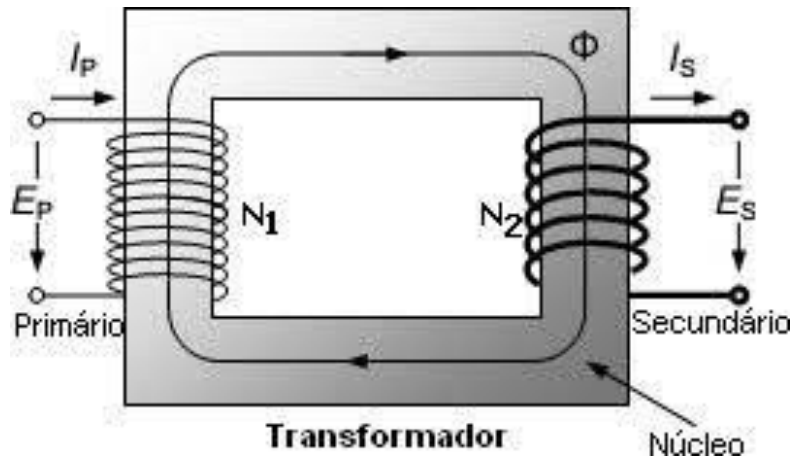
**Fe-Ni e Fe-Co**

**Ferritas Macias**

**Materiais Amorfos**

**Materiais Nanocristalinos**

# Principal aplicações: Motores e transformadores



O núcleo é composto de várias chapas finas de material magnético revestidas de material isolante.

Metálico  $\rightarrow d\phi / dt \rightarrow$  correntes parasitas

- ▶ Um transformador é um dispositivo que permite aumentar ou diminuir a tensão elétrica em um circuito de corrente alternada.
- ▶ Corrente alternada na bobina primária  $\rightarrow d\phi / dt$  (fluxo magnético varia com o tempo), guiado pelo núcleo até a bobina secundária.
- ▶ Induzida uma ddp na bobina secundária.

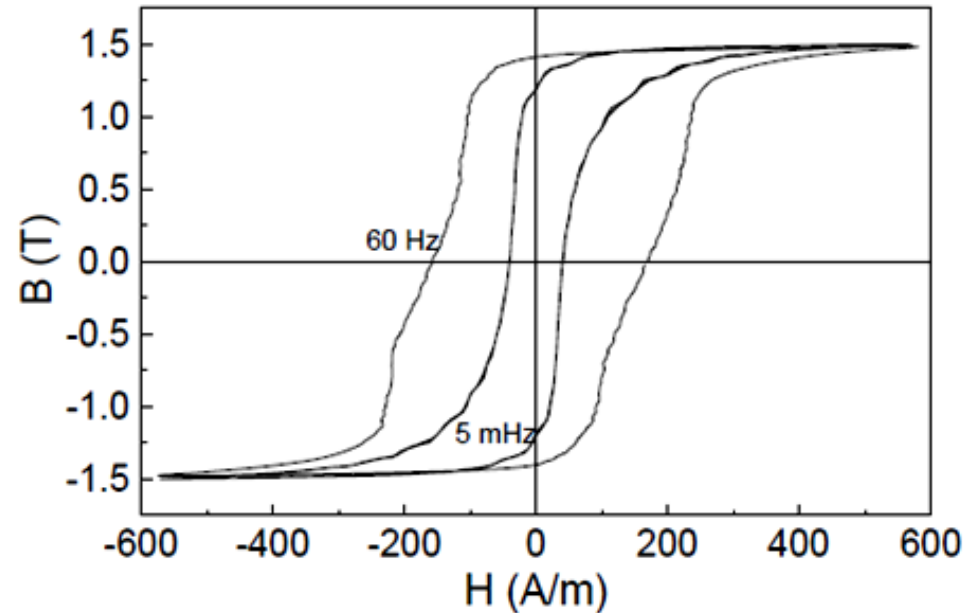
# Perdas magnéticas

- ▶ Perdas histeréticas -  $P_h$
- ▶ Perda por corrente de Foucault ou corrente parasita (*Eddy Current*) -  $P_{cp}$
- ▶ Perda anômala ou perda de excesso -  $P_a$
- ▶ Perda magnética total

# Perda Total - $P_t$

Histerese medida para frequência não nula.

$$P_t = P_h + P_{cp} + P_a$$



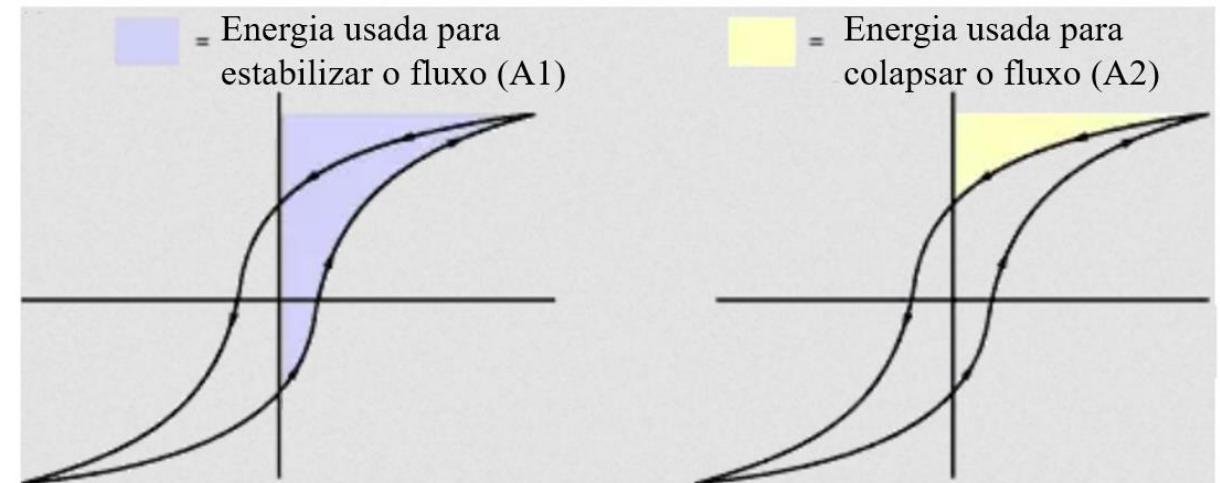
Quanto maior a frequência, maiores são as perdas, e vice-versa. No Brasil, a corrente alternada possui uma frequência de 60 Hz, que é considerada baixa, mesmo assim, a área da histerese aumenta significativamente em relação à medida quase estática. A perda total é medida como a área da histerese com aplicação de frequência e a perda histerética com frequência quase nula.

# Perdas histeréticas - $P_h$

- ▶ Quando o material é magnetizado, o material acumula energia potencial magnética até a sua saturação .
- ▶ No processo de desmagnetização, uma parte dessa energia é perdida na forma de calor, fazendo com que a curva não volte exatamente pelo mesmo caminho da magnetização inicial.

A perda histerética é calculada pela diferença entre a área  $A1$  e  $A2$ , assim:  $P_h = A1 - A2$ .

Medidas em condições quase-estática,  $f \sim 0$





# Perda por corrente de Foucault ou corrente parasita (*Eddy Current*) - $P_{cp}$

- ▶ O H alternado (bobina primária) induz uma corrente elétrica no material metálico (núcleo) que está no interior da bobina → correntes parasitas.
- ▶ Essas correntes elétricas induzidas nas chapas criam um campo magnético oposto ( $H_p$ ) ao produzido pela bobina primária, a fim de anular esse campo.
- ▶ A perda de potência específica devido às correntes parasitas é calculada pela equação:

$$P_{cp} = \frac{(\pi . B . f . e)^2}{6 . d . \rho}$$

- $P_{cp}$  = perdas por corrente parasita em W/kg; B = indução mag. em T; e = espessura das chapas em metro, f = frequência em Hz, d = massa específica em kg/m<sup>3</sup> e  $\rho$  = resistividade em  $\Omega.m$ .
- ↓ espessura da chapa (e) → ↓ os valores de  $P_{cp}$  → diminui o caminho percorrido pelas correntes → ↓  $H_p$
- ↑ resistividade → ↓  $P_{cp}$



# Perda anômala ou perda de excesso - $P_a$

- ▶ Não se conhece precisamente a origem dessa perda, mas acredita-se que essa perda esteja relacionada à **velocidade de movimentação das paredes de domínio magnético do material**, através de um termo de viscosidade.
- ▶ Para diminuir a perda magnética associada a essa parcela, é ideal que se tenha um material homogêneo, para facilitar a movimentação das paredes de domínio.

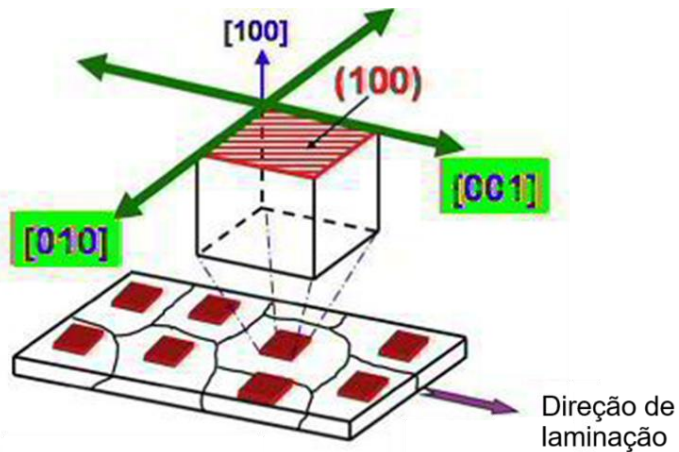
# Fe-Si

- ▶ Melhor que Fe puro → maior resistividade → menores perdas por correntes parasitas (mas menor  $M_s$ )
- ▶ Máximo de Si é de  $\sim 3 - 4\%$  em massa → monofásico (teores maiores → processamentos especiais)
- ▶ Impurezas como C, N, O e S  $< 20$  ppm e grãos grandes (pouco contorno de grão) → baixo  $H_c$
- ▶ Redução das perdas AC → chapas finas
- ▶ *Mas, a magnetostricção do Fe-3Si é relativamente alta, gerando ruídos em aplicações AC (barulho do transformador)*

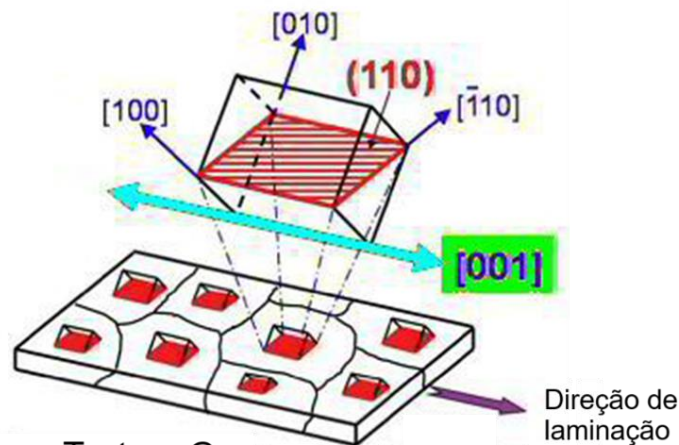
## Fe-Si: Perda magnética a 1,5T e 60 Hz

- ▶ Aço ABNT 1006 sem recozimento (SR) → 18 W/kg.
- ▶ Recozimento especial reduz de 18 → 10 W/kg.
- ▶ A adição de silício e alumínio ao aço aumenta sua resistividade elétrica (reduz a intensidade das correntes elétricas parasitas) → 4,2 W/kg.
- ▶ A redução da espessura de 0,5 para 0,3 mm é capaz de reduzir as perdas de 3,6 → 2,8 W/kg.
  - O aço tipo grão-orientado chega a apenas 1 W/kg na direção de laminação, mas tem perdas de 4 W/kg na direção transversal.

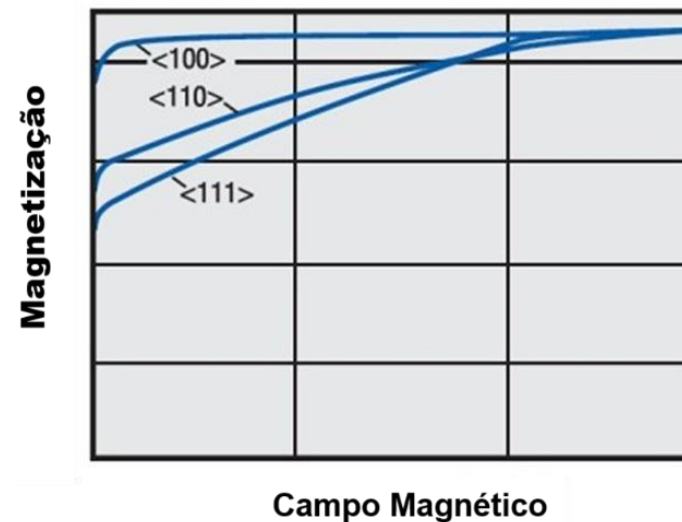
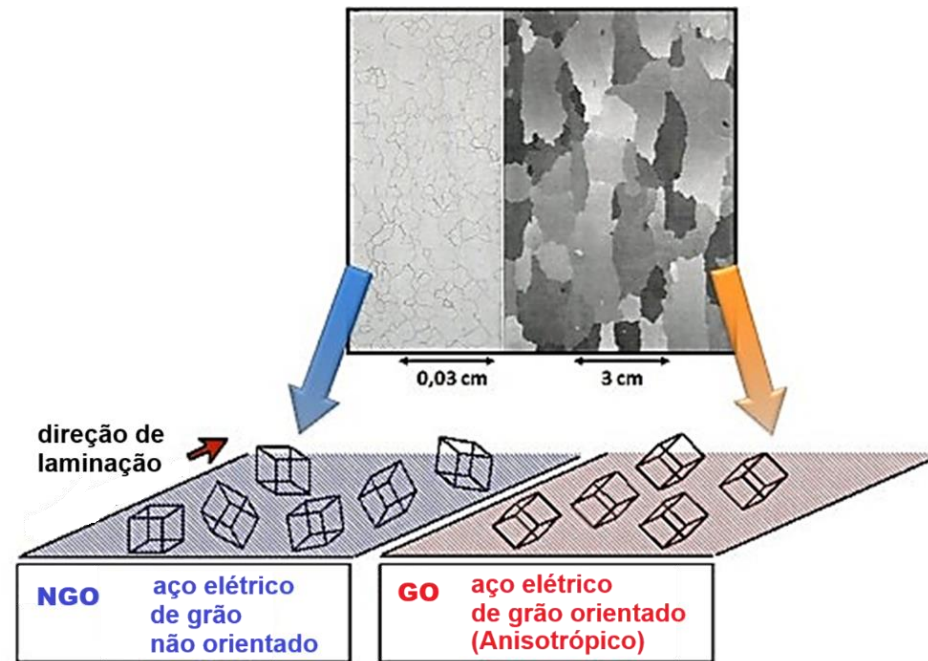
# Fe-Si: Grão Orientado



Textura Cubo



Textura Goss



# Fe-Si: aplicações

- ▶ **Chapas finas:**
- ▶ **dispositivos em que haja variação rápida de indução;**
- ▶ **máquinas rotativas de altas velocidades;**
- ▶ **máquinas com um número grande de polos,**
- ▶ **etc**

# Fe-Si: aplicações

- ▶ **Ligas com alto teor de Si:** 6,5% de Si é o teor que maximiza as propriedades eletromagnéticas da liga:
  - **magnetostricção nula**, alta resistividade, propriedades de supressão da formação de carbeto.
  - **Mas ... extremamente frágil, não é possível laminar.**

## Como ultrapassar esta limitação?

Solidificação rápida → fitas de espessuras de 30 a ~ 150  $\mu\text{m}$   
→ TT para  $T < 1100^\circ\text{C}$  → grãos grandes e textura adequada.  
Ligas enriquecidas em Si, por difusão → estágios finais de fabricação, após a laminação.