

Materiais Magnéticos

Macios (soft)

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

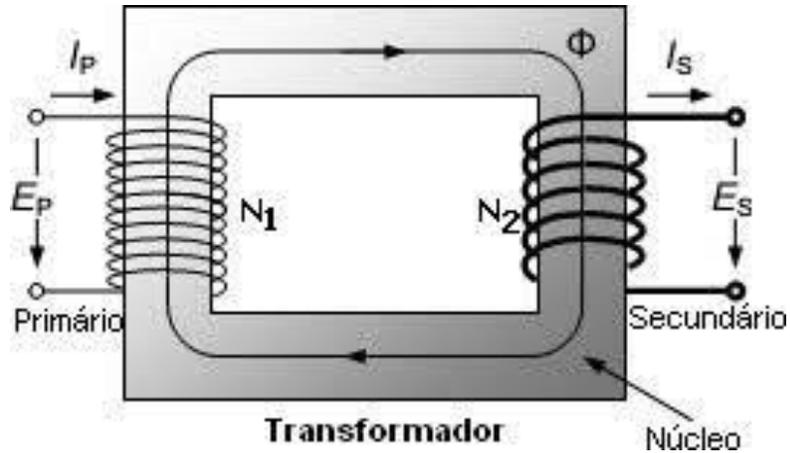
Fe-Ni e Fe-Co

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

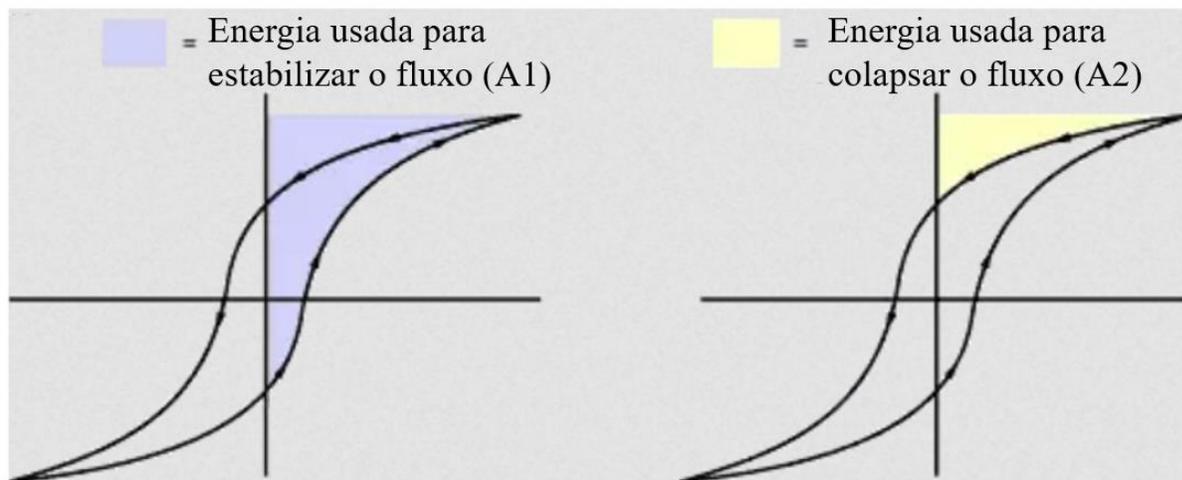
- ▶ Perdas histeréticas - P_h
- ▶ Perda por corrente de Foucault ou corrente parasita (*Eddy Current*) - P_{cp}
- ▶ Perda anômala ou perda de excesso - P_a
- ▶ Perda magnética total

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 (3).

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

- 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/m³ e ρ = resistividade em $\Omega \cdot m$.
- ▶ \Downarrow espessura da chapa (e) → \Downarrow os valores de P_{cp} → diminui o caminho percorrido pelas correntes.
- ▶ \Uparrow resistividade $\Downarrow P_{cp}$

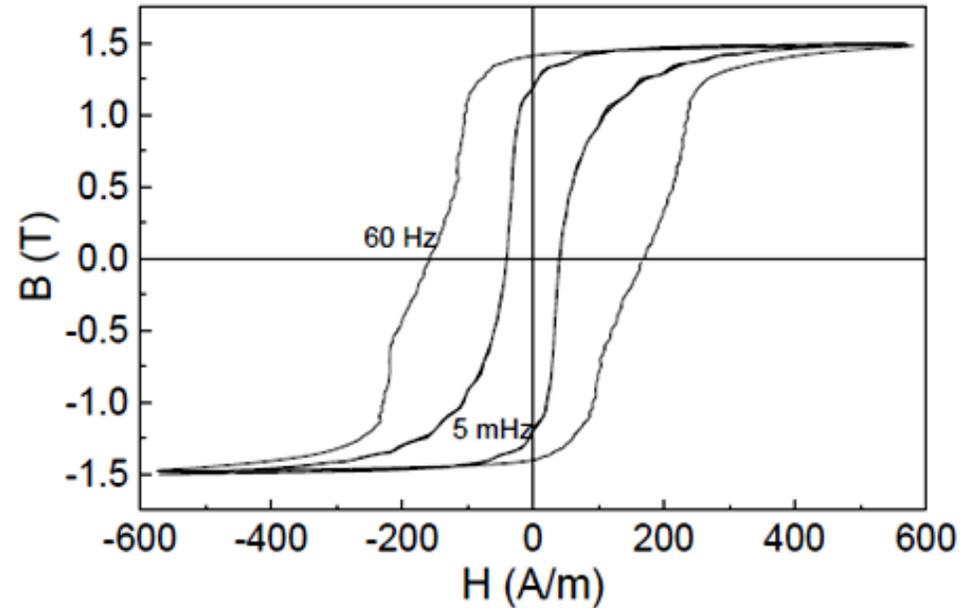
Perda anômala ou perda de excesso - P_a

- ▶ 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.

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.

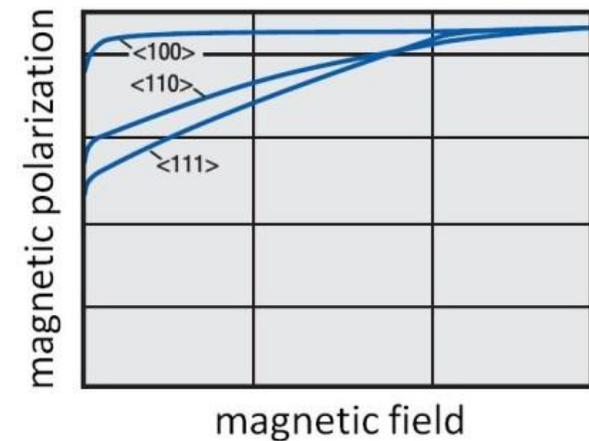
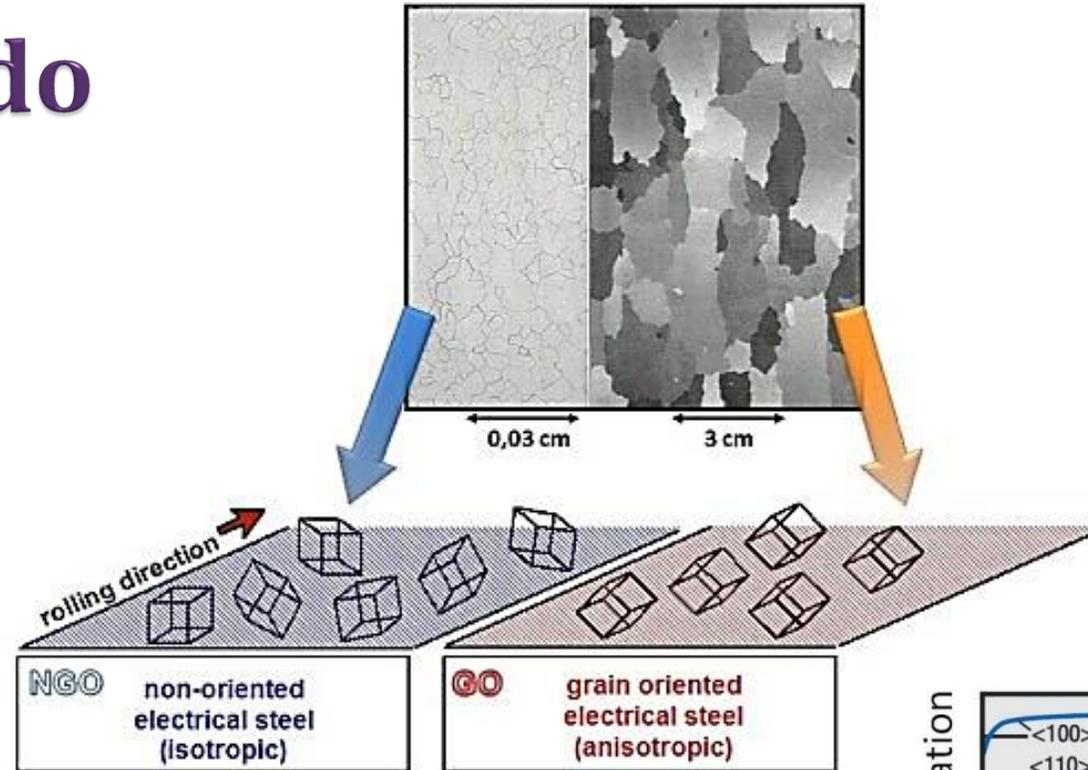
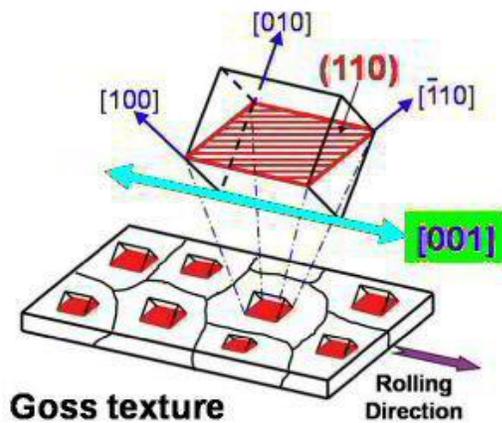
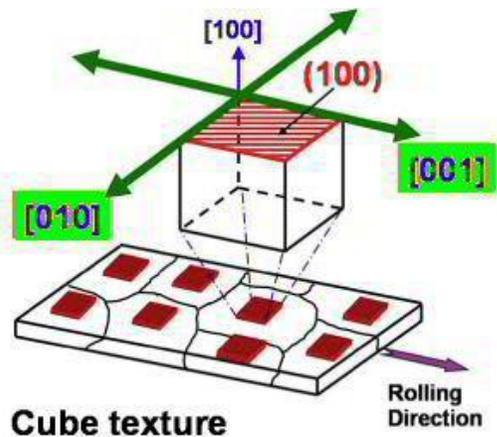
Fe-Si

- ▶ 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

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



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 μm
→ 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.