



# Eletromagnetismo

## Aula 15 – Magnetodinâmica

---

Prof. Acélio Luna Mesquita

Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral

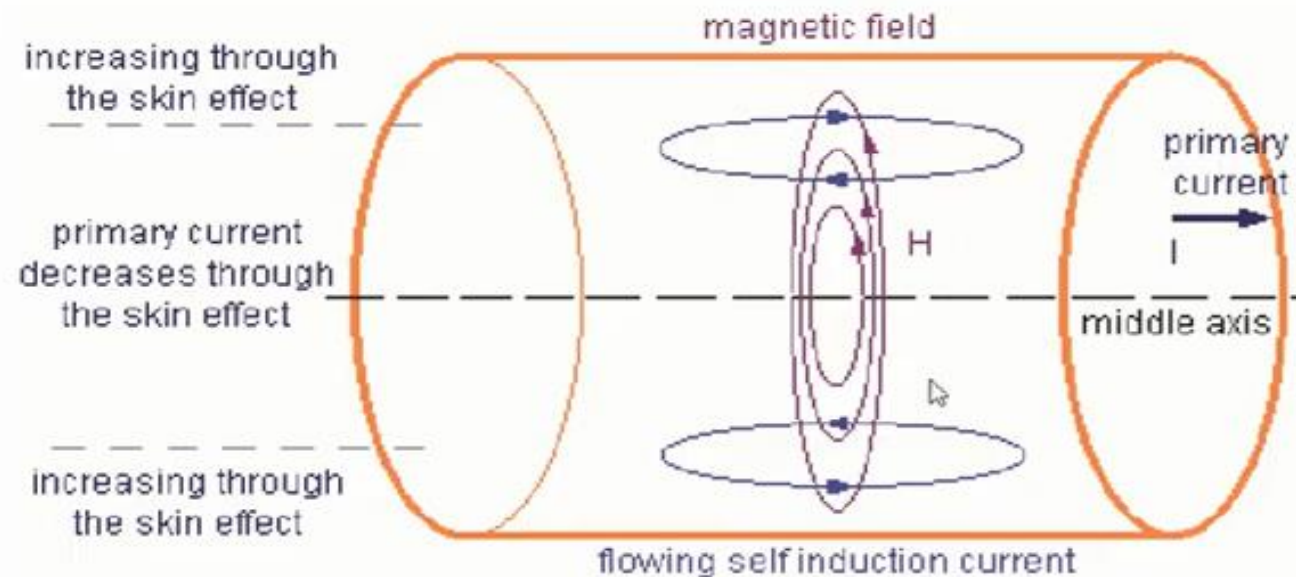
# Efeito pelicular (skin effect)

---

- Quando um fio homogêneo é percorrido por uma corrente contínua, as cargas tendem a se distribuir igualmente ao atravessar uma seção transversal do mesmo.
- Em corrente alternada a densidade de corrente varia do centro do condutor para a sua superfície externa, sendo mínima no centro e máxima na periferia.
- A consequência prática é o aumento da resistência elétrica aparente do condutor devido à redução de sua área efetiva.
- **Efeito pelicular:** é o efeito da concentração da corrente elétrica nas regiões periféricas de um condutor percorrido por corrente alternada.

# Efeito pelicular (skin effect)

- O efeito pelicular decorre da indução de campos magnéticos associados a passagem de corrente e aos campos elétricos induzidos, cujos sentidos tendem a opor-se ao movimento de elétrons no centro do condutor e reforçá-lo na periferia.



# Efeito pelicular (skin effect)

---

- As leis que governam a propagação de um campo eletromagnético em um meio condutor, permitem demonstrar que a densidade de corrente aumenta de intensidade do centro para a superfície do condutor.
- A distribuição resultante da corrente pode ser representada matematicamente pela equação:

$$J = J_s e^{-d/\delta}$$

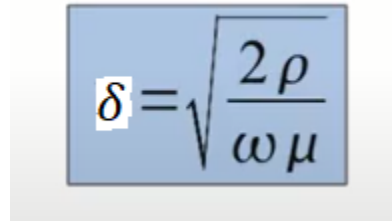
Onde:

- $J_s$  é o valor máximo da densidade de corrente (superfície do condutor);
- $d$  é a distância da superfície (profundidade);
- $\delta$  é um parâmetro chamado **profundidade pelicular** (skin depth).

# Profundidade Pelicular(Skin Depth)

---

- É a profundidade (distância da superfície) para qual a intensidade da corrente cai a 36,8% de seu valor na superfície.
- Matematicamente, a profundidade pelicular ( $\delta$ ) pode ser calculada por:

The equation for skin depth is displayed within a blue rectangular box with a thin black border. The equation is 
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$
 where  $\delta$  is the skin depth,  $\rho$  is the resistivity,  $\omega$  is the angular frequency, and  $\mu$  is the permeability.
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

- Onde:
  - $\rho$  é a resistividade do material;
  - $\omega$  é a frequência de oscilação da corrente ( $2\pi f$ );
  - $\mu$  é a permeabilidade absoluta do material ( $\mu_r \mu_0$ )

# Efeito Pelicular

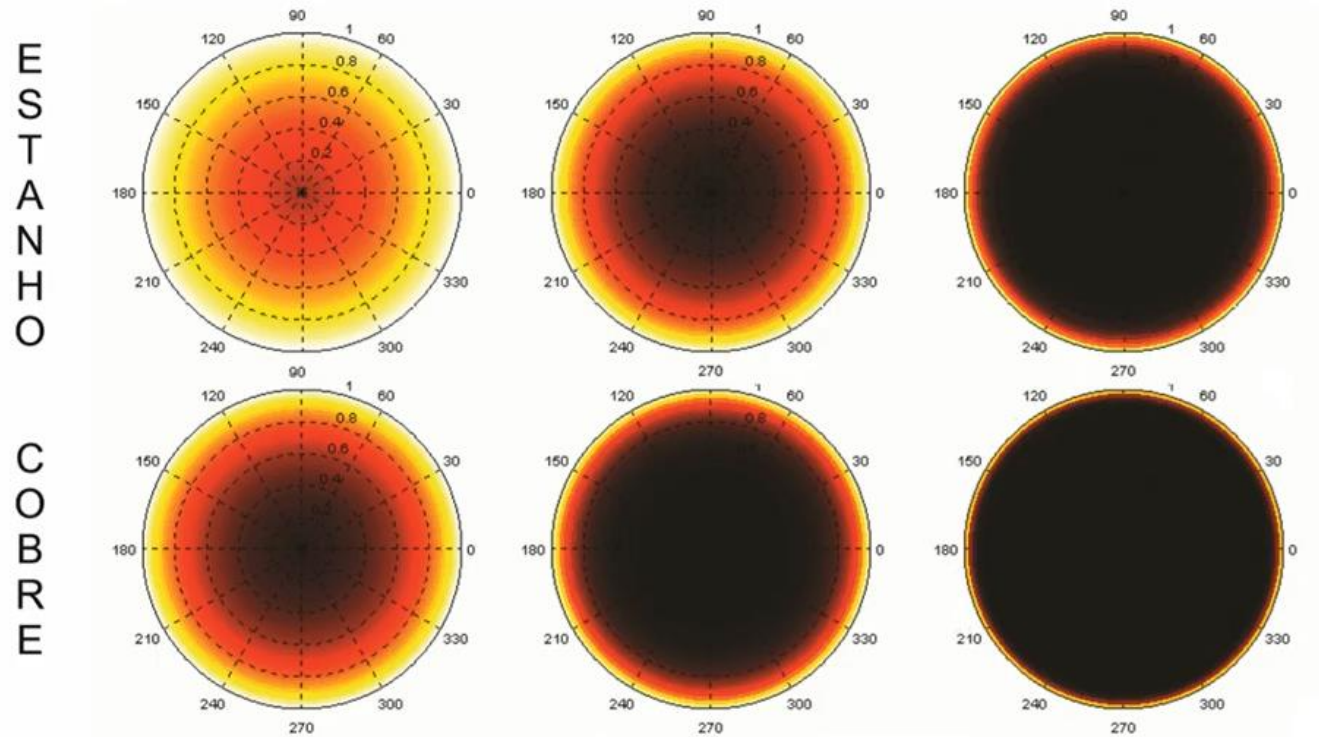
---

$$J = J_s e^{-\left(\frac{d}{\delta}\right)} = J_s e^{-d \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\rho}}}$$

- Se  $f=0$  então  $\delta \rightarrow \infty$  (não há efeito pelicular, a densidade de corrente independe da profundidade);
- Quanto maior a frequência, menor o valor de  $\delta$  e maior a variação de  $J$  com a distância da superfície do condutor;
- Quanto maior a frequência, maior o efeito pelicular;
- Bons condutores (baixo  $\rho$ ) possuem efeito pelicular mais pronunciado;
- Quanto maior a permeabilidade magnética do material ( $\mu$ ), maior será o efeito pelicular.

# Efeito Pelicular

- Densidade de corrente a 60Hz, 500Hz e 100KHz em um condutor de estanho e um condutor de cobre:



# Efeito Pelicular

---

- Alguns condutores para média e alta tensão





# Efeito Pelicular

---

- Resistência de um condutor cilíndrico em corrente contínua:

$$R_{CC} = \rho \frac{L}{\pi r^2}$$

- Onde:
  - $L$  = comprimento do condutor (m);
  - $r$  = raio da secção reta do condutor (m).
- Resistência aparente de um condutor cilíndrico em corrente alternada:

$$R_{CA} \approx \sqrt[7.1]{(r/2\delta + 0.26)^{7.1} + 1} \cdot R_{CC}$$

# Principais Tipos de Perdas

---

- Perdas por condução:

- Resistência de um guia:  $R = \frac{l}{\sigma \cdot S_c}$

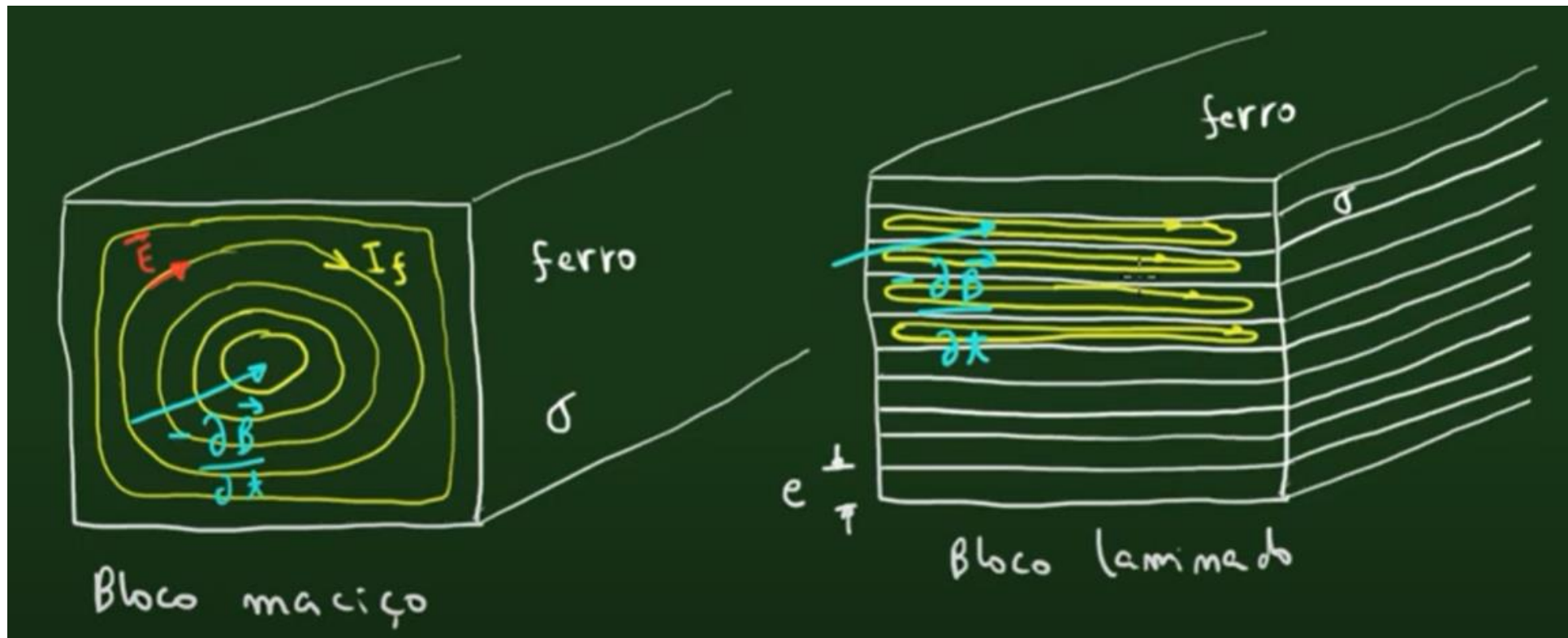
- Lei de Ohm:  $V = R \cdot i$

- Potência elétrica:  $P = V \cdot i$   $\left\{ \begin{array}{l} P = R \cdot i^2 \\ P = \frac{V^2}{R} \end{array} \right.$

- Valor eficaz:  $s_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T s^2(t) dt} \xrightarrow{\text{sen cos}} s_{rms} = \frac{S_o}{\sqrt{2}}$

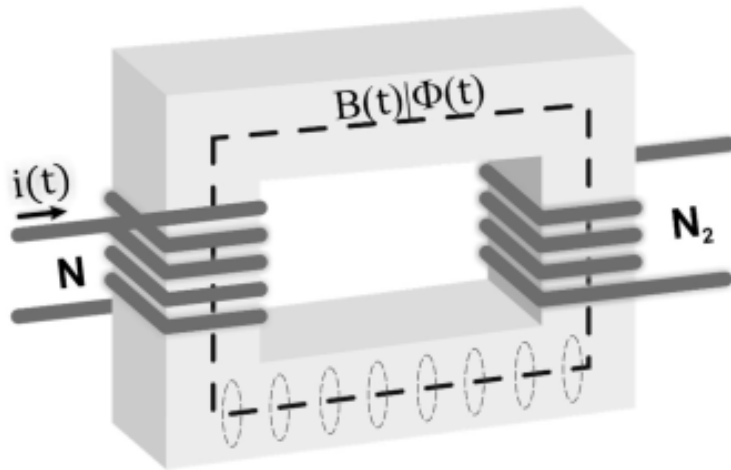
# Principais Tipos de Perdas

- Perdas por correntes de Foucault:



# Principais Tipos de Perdas

- Perdas por correntes de Foucault:



$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t}$$



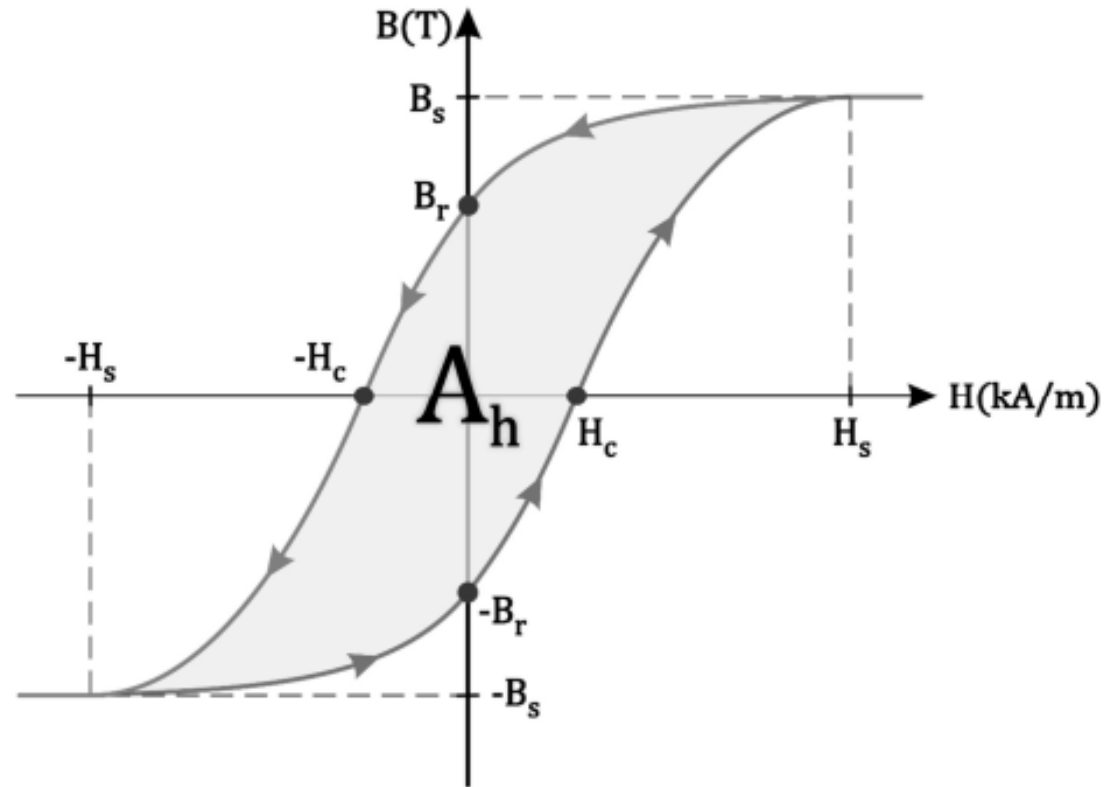
$$P_f = \frac{1}{24} \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot e^2 \cdot B_m^2 \left( \frac{W}{m^3} \right)$$

# Perdas por histerese

- Perdas por Histerese:

$$P_h = A_h \cdot f \cdot Vol \text{ (W)}$$

$$A_h = \eta \cdot B_m^{1,6}$$





# UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CAMPUS SOBRAL

Perguntas?

[acelio.luna@ufc.br](mailto:acelio.luna@ufc.br)

