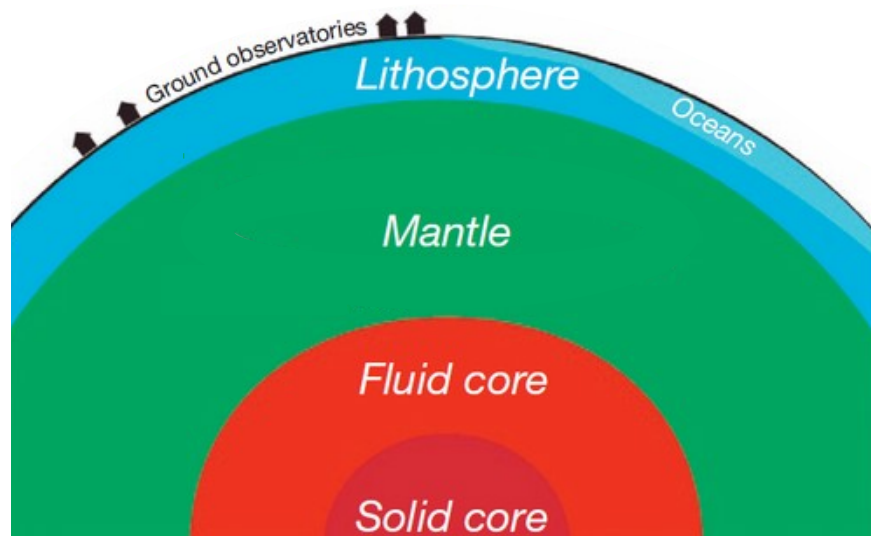


# **Campo geomagnético**

Parte A

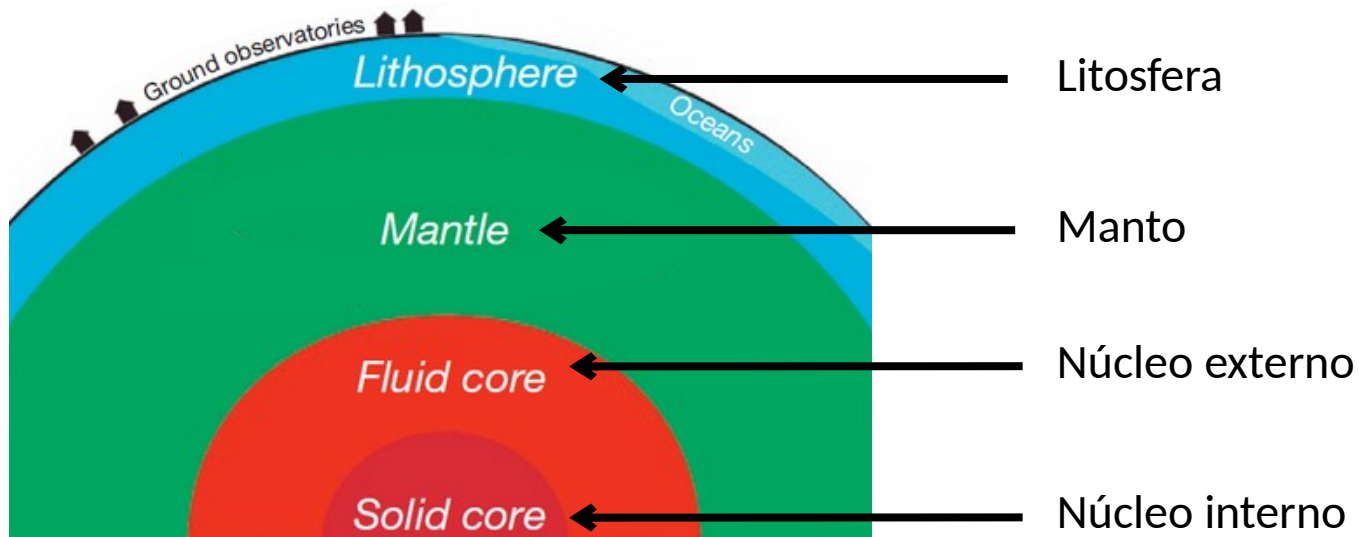
O campo magnético terrestre, ou **campo geomagnético**, é produzido por apenas dois tipos de fontes: **rochas magnetizadas** e **correntes elétricas**

# Representação simplificada da estrutura interna da Terra



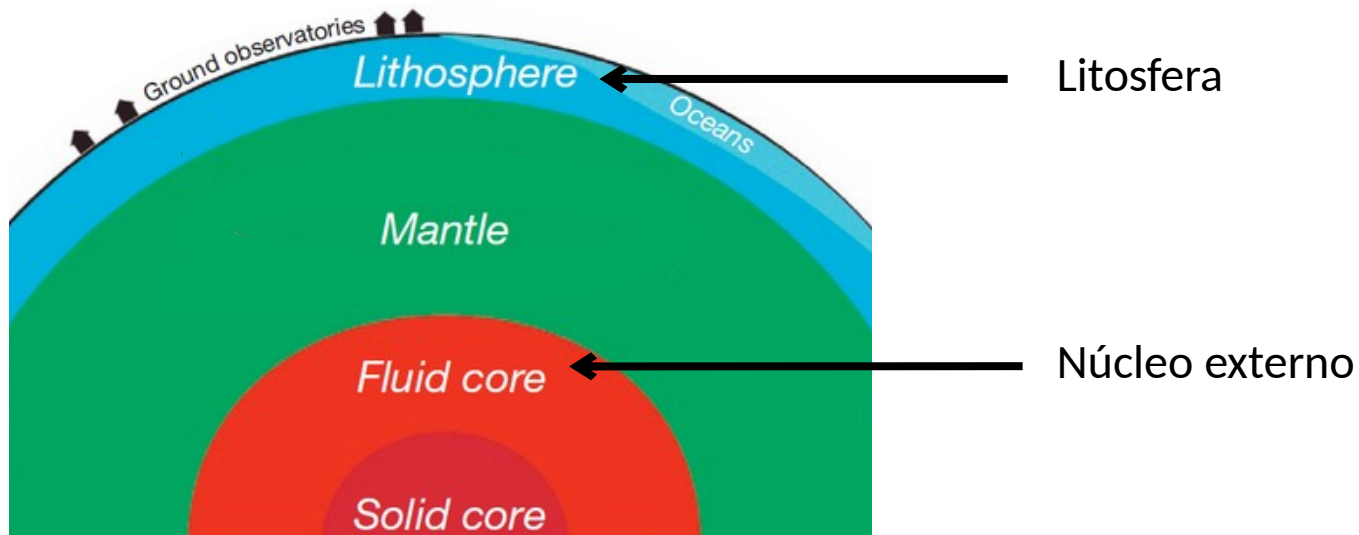
Modificado de Hulot et al. (2015)

## Representação simplificada da estrutura interna da Terra



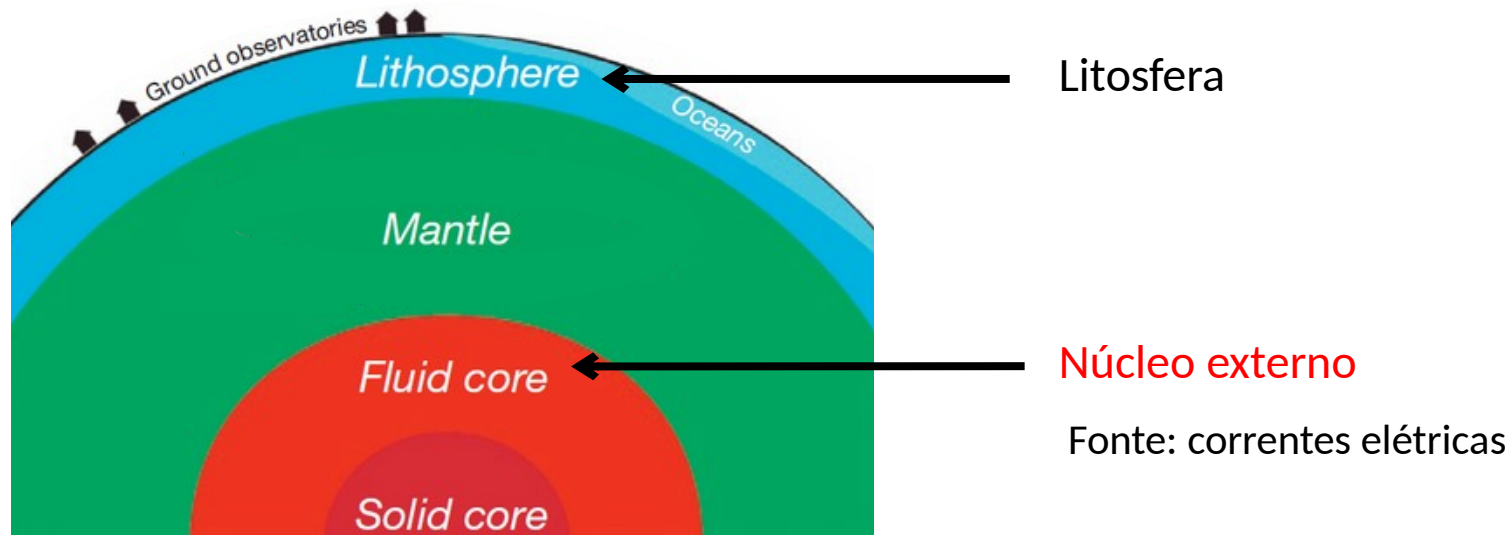
Modificado de Hulot et al. (2015)

Importantes fontes do  
campo geomagnético  
estão na litosfera e no  
núcleo externo



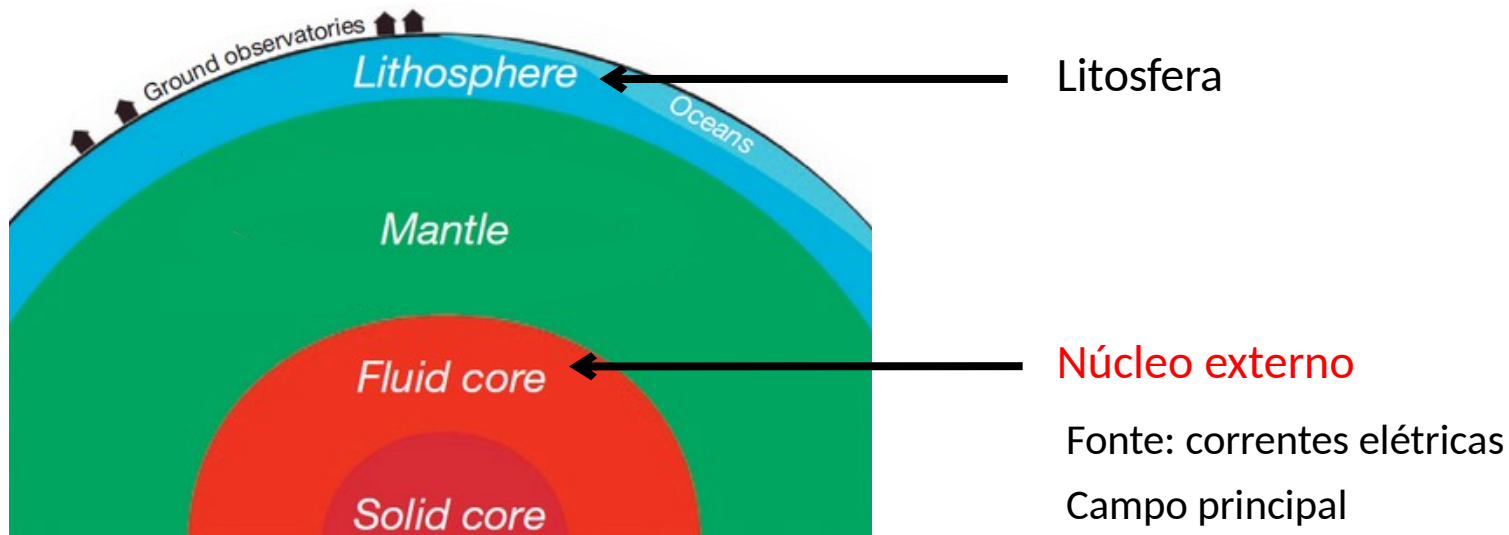
Modificado de Hulot et al. (2015)

De acordo com a teoria mais aceita pela comunidade geofísica, a principal fonte do campo geomagnético (responsável por mais de 95% do campo) são as **correntes elétricas** provenientes do movimento do **núcleo externo**, que é líquido e contém ferro e níquel.



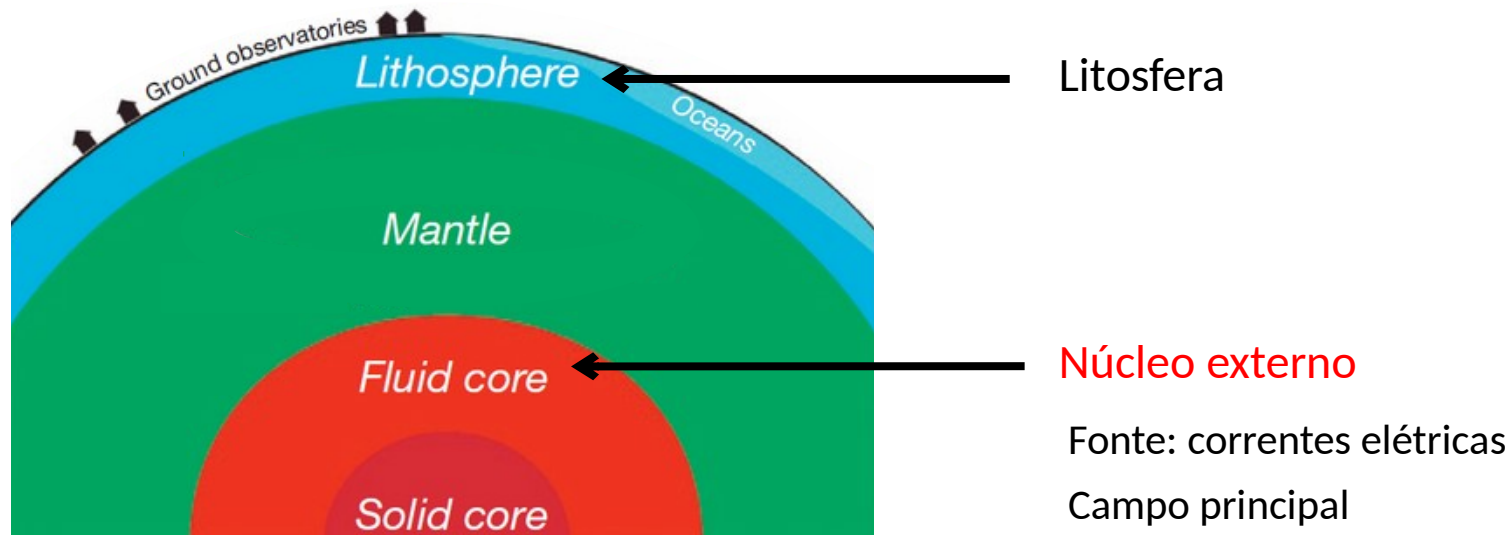
Modificado de Hulot et al. (2015)

O campo produzido por estas fontes é denominado **campo principal** (Langel e Hinze, 1998; Hulot et al., 2015).



Modificado de Hulot et al. (2015)

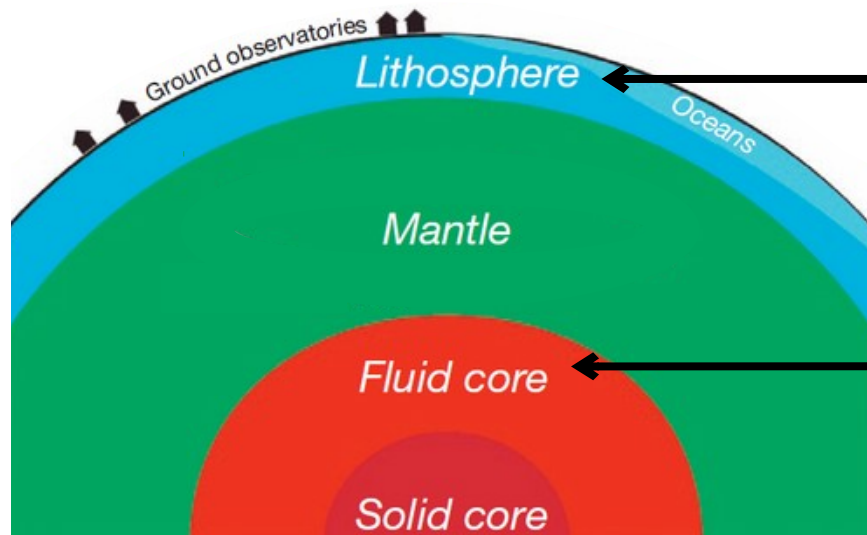
Este campo é predominantemente dipolar (já já veremos o que isso quer dizer), suas variações temporais são da ordem de anos e sua amplitude varia de  $\approx 22\ 600$  nT, sobre a anomalia magnética do Atlântico Sul, até  $\approx 66\ 670$  nT, próximo ao pólo sul (Hulot et al., 2015).



Modificado de Hulot et al. (2015)



As fontes presentes na **litosfera** são **rochas magnetizadas**. Estas rochas se mantêm magnetizadas porque estão abaixo de suas respectivas temperaturas de Curie.



**Litosfera**

Fonte: rochas magnetizadas

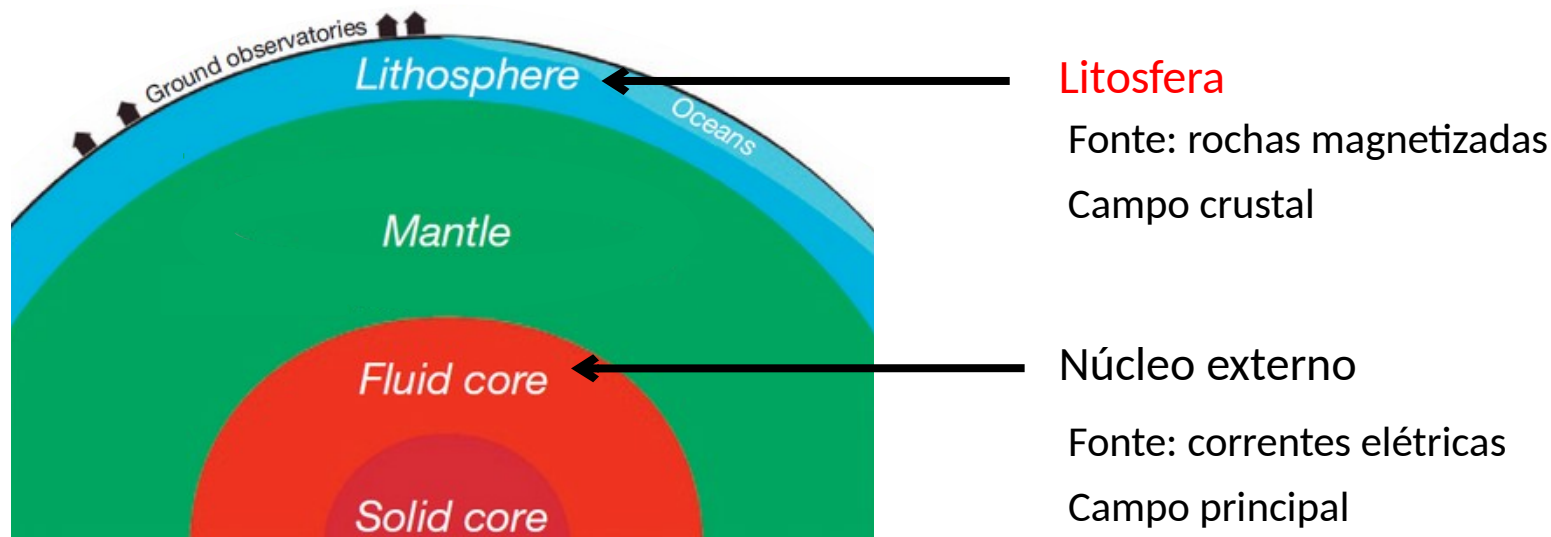
Núcleo externo

Fonte: correntes elétricas

Campo principal

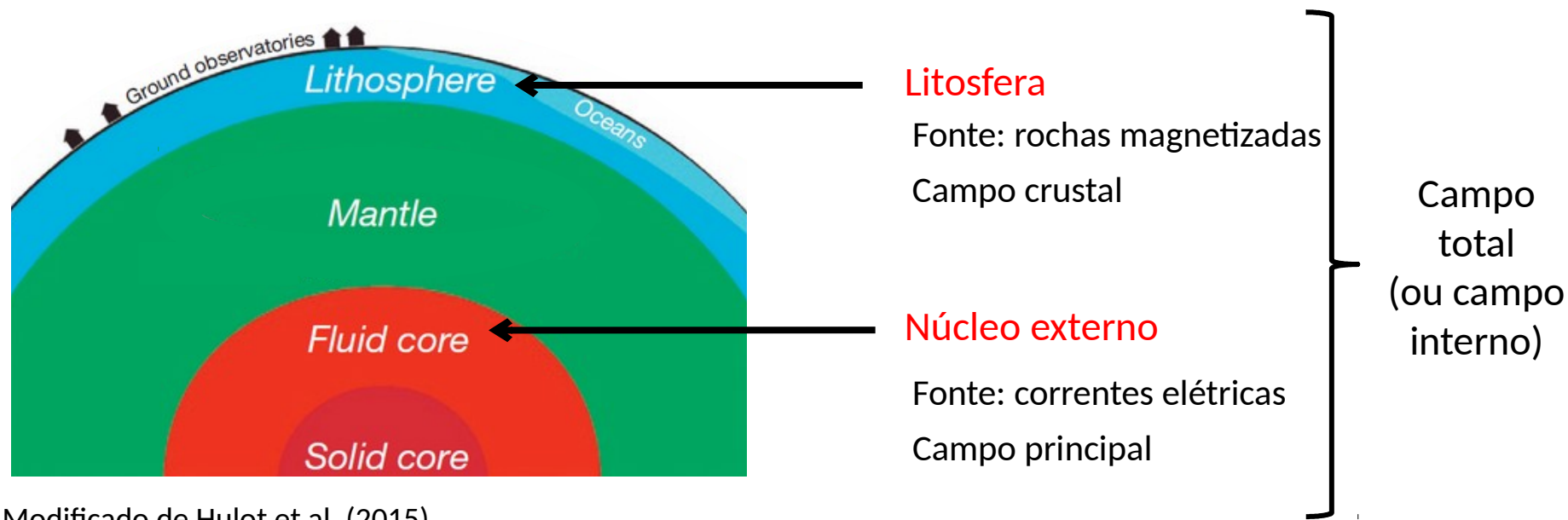
Modificado de Hulot et al. (2015)

O campo produzido por estas fontes é denominado **campo crustal** (Langel e Hinze, 1998; Hulot et al., 2015) e representa a principal componente do campo geomagnético para estudos de geofísica aplicada (Blakely, 1996; Nabighian et al., 2005).



Modificado de Hulot et al. (2015)

Em geomagnetismo, a soma dos campos crustal e principal é denominada **campo interno** (Langel e Hinze, 1998; Hulot et al., 2015). Já em geofísica aplicada, é denominada **campo total** (Blakely, 1996; Nabighian et al., 2005).



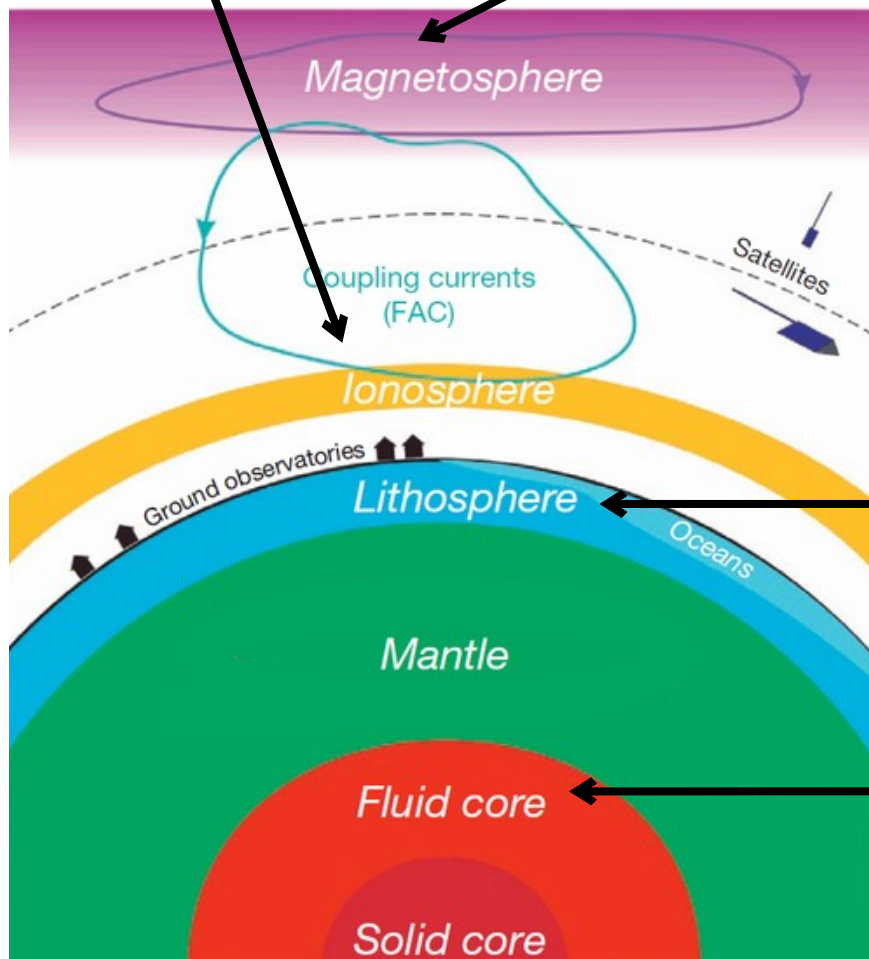
Modificado de Hulot et al. (2015)

Fonte: correntes elétricas

Fonte: correntes elétricas

**Ionosfera**

**Magnetosfera**



Outras fontes do campo geomagnético são correntes elétricas provenientes do movimento de partículas carregadas na **magnetosfera** e **ionosfera**.

Litosfera

Fonte: rochas magnetizadas

Campo crustal

Núcleo externo

Fonte: correntes elétricas

Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

Campo ionosférico

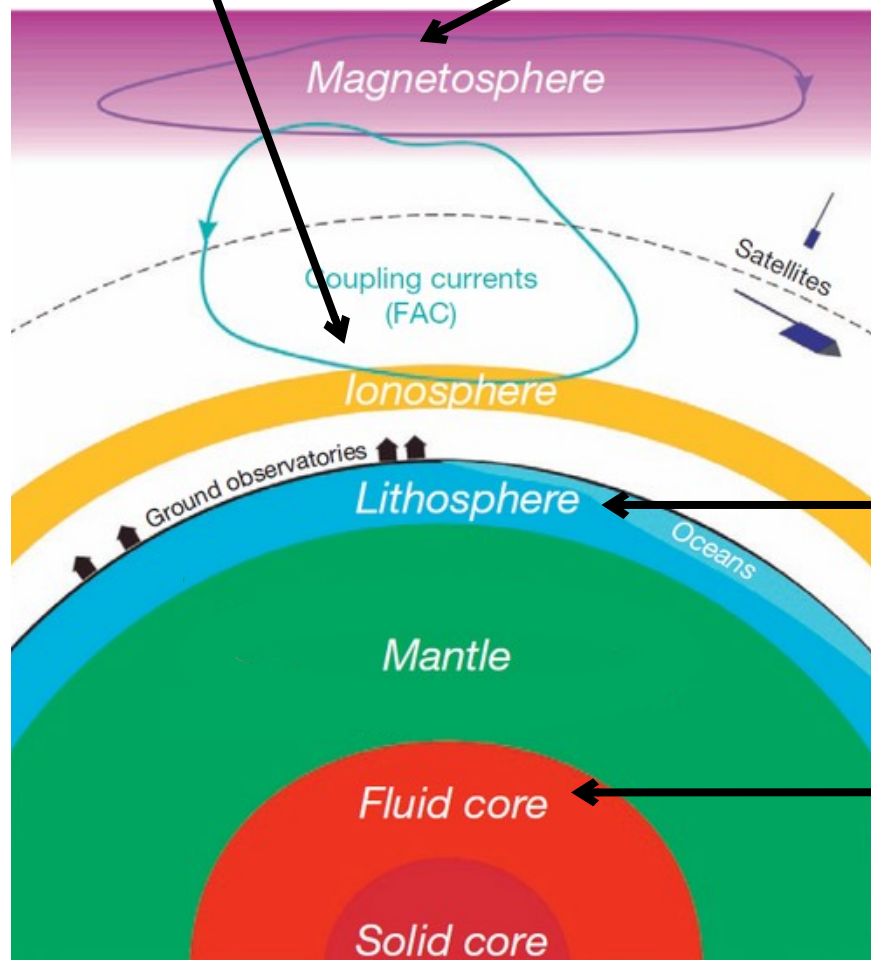
Fonte: correntes elétricas

Campo magnetosférico

Fonte: correntes elétricas

Ionosfera

Magnetosfera



Os campos produzidos por estas fontes são denominados, respectivamente, **campo magnetosférico** e **campo ionosférico** (Langel e Hinze, 1998; Hulot et al., 2015).

Litosfera

Fonte: rochas magnetizadas

Campo crustal

Núcleo externo

Fonte: correntes elétricas

Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

Campo ionosférico

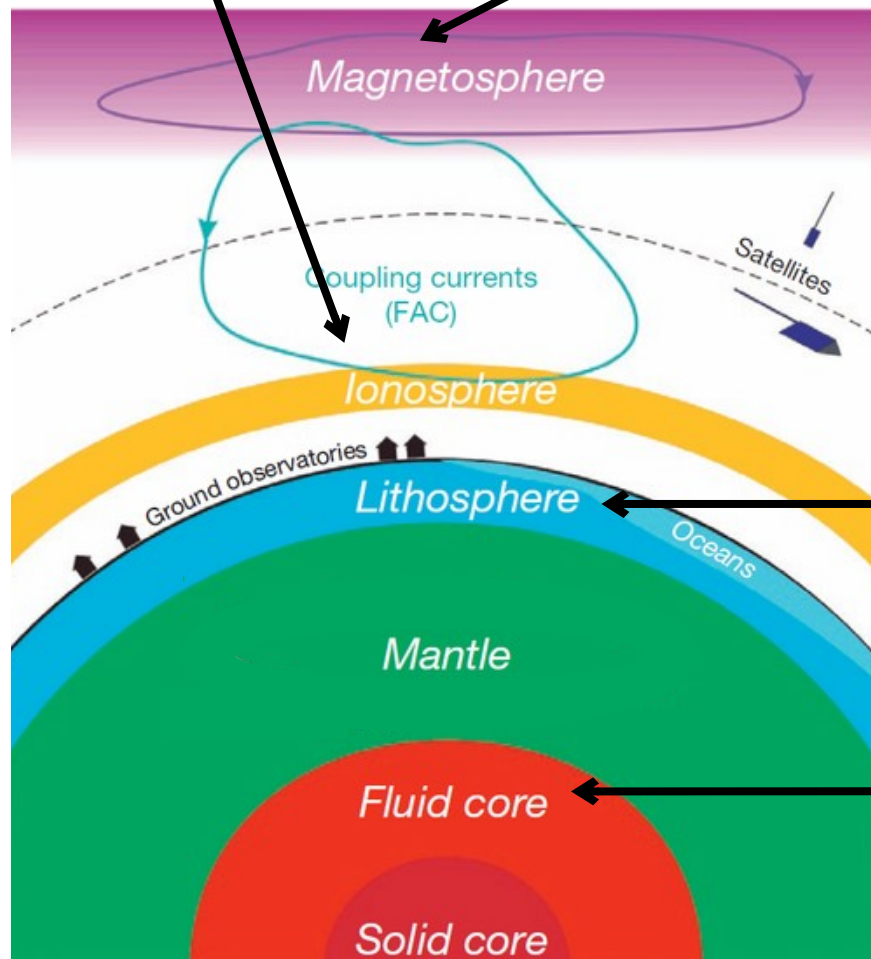
Fonte: correntes elétricas

Campo magnetosférico

Fonte: correntes elétricas

**Ionosfera**

**Magnetosfera**



Embora os processos físicos que controlam os sistemas de correntes elétricas nestas duas regiões sejam distintos, eles estão acoplados.

Litosfera

Fonte: rochas magnetizadas

Campo crustal

Núcleo externo

Fonte: correntes elétricas

Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

Campo ionosférico

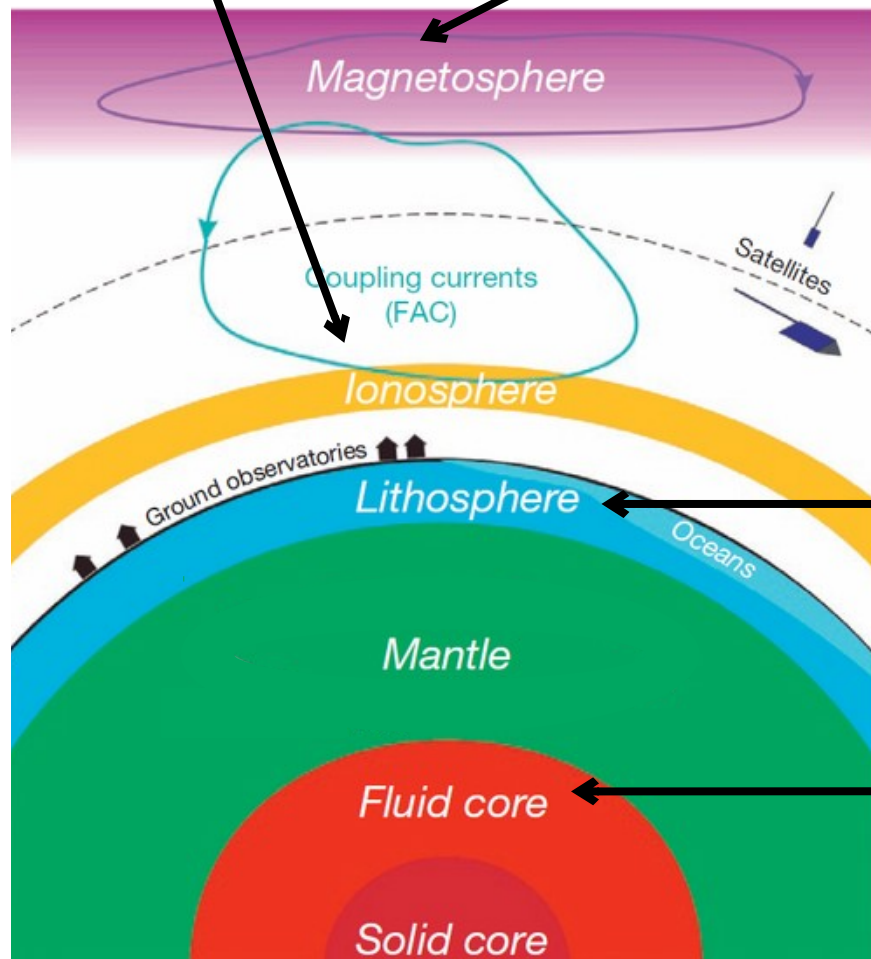
Fonte: correntes elétricas

Campo magnetosférico

Fonte: correntes elétricas

Ionosfera

Magnetosfera



As variações temporais destes campos vão de frações de segundo até dias e as variações da amplitude vão de dezenas até milhares de nanotesla.

Litosfera

Fonte: rochas magnetizadas

Campo crustal

Núcleo externo

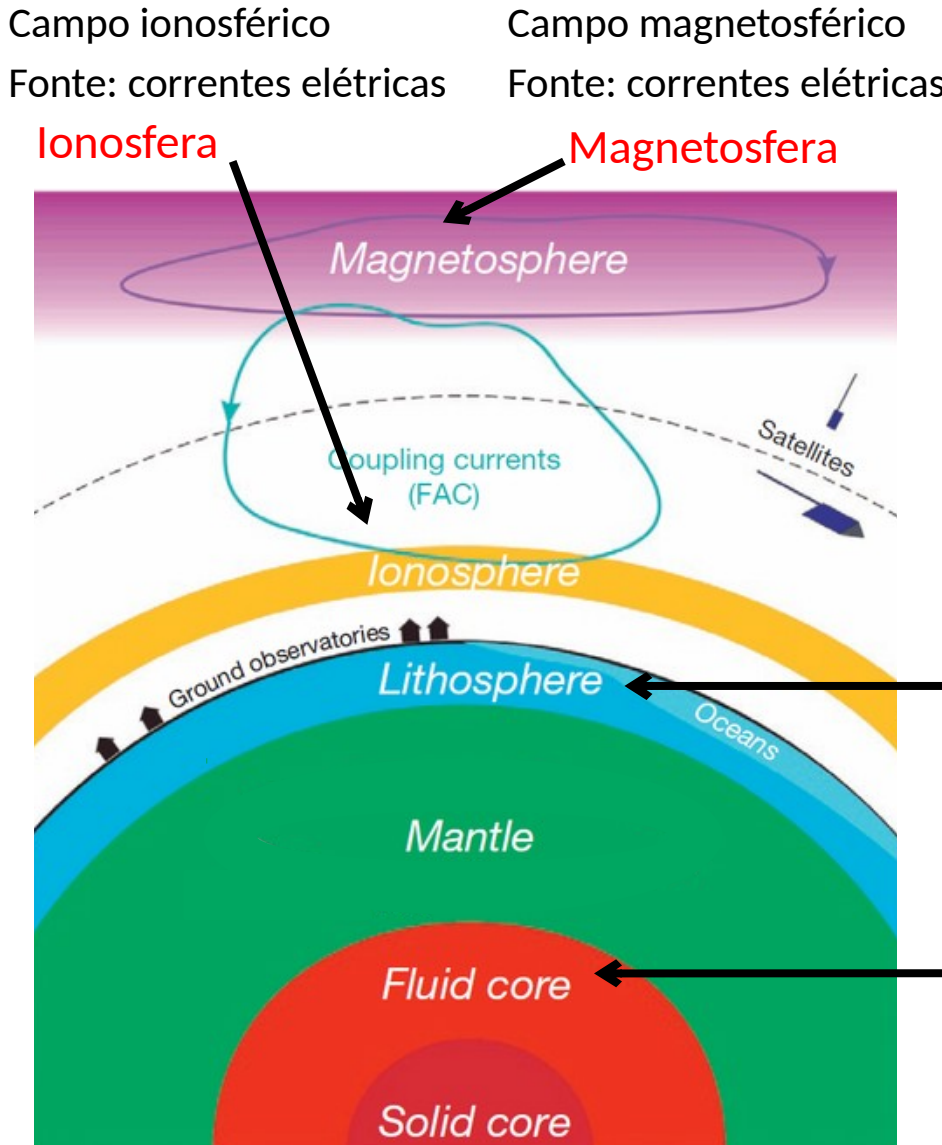
Fonte: correntes elétricas

Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)





Campo externo

O campo resultante produzido por estas fontes é denominado **campo externo** (Langel e Hinze, 1998; Hulot et al., 2015).

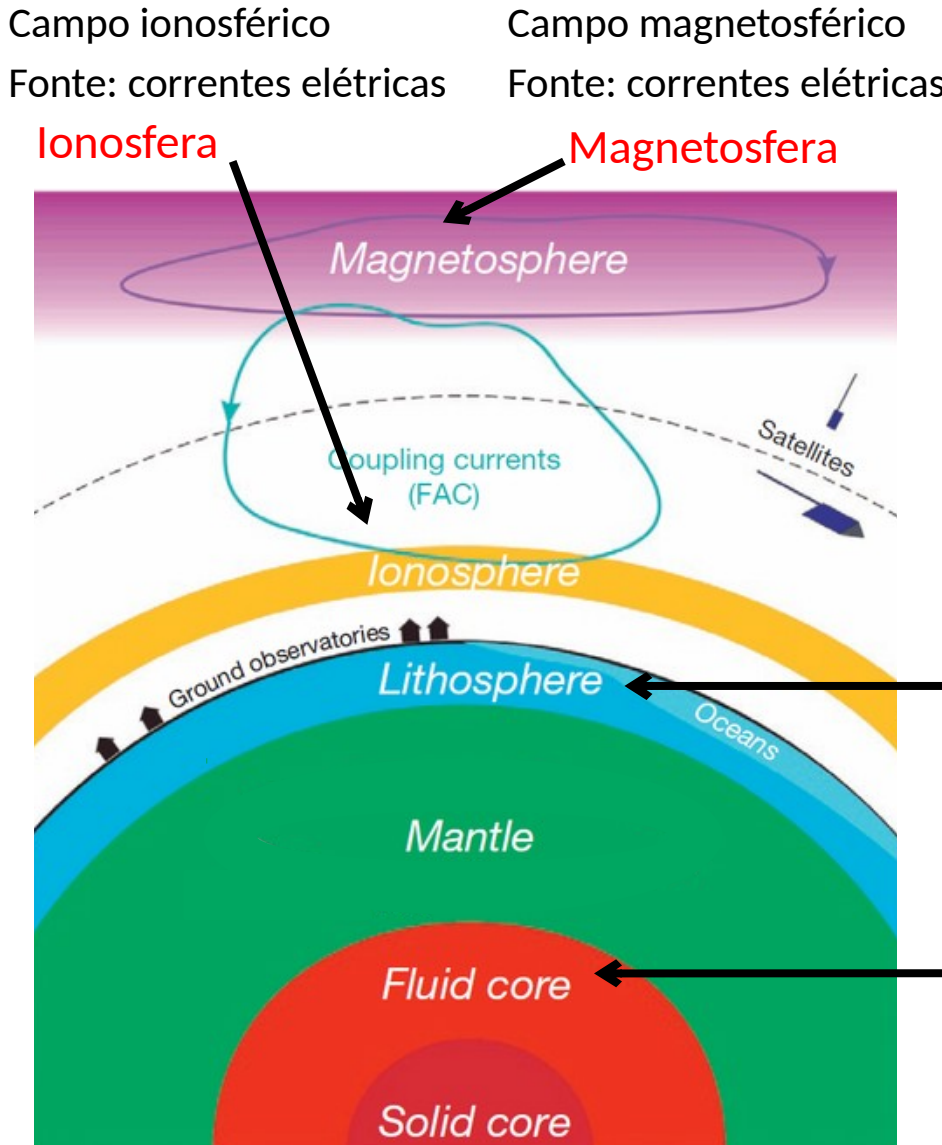
Litosfera  
Fonte: rochas magnetizadas  
Campo crustal

Núcleo externo  
Fonte: correntes elétricas  
Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

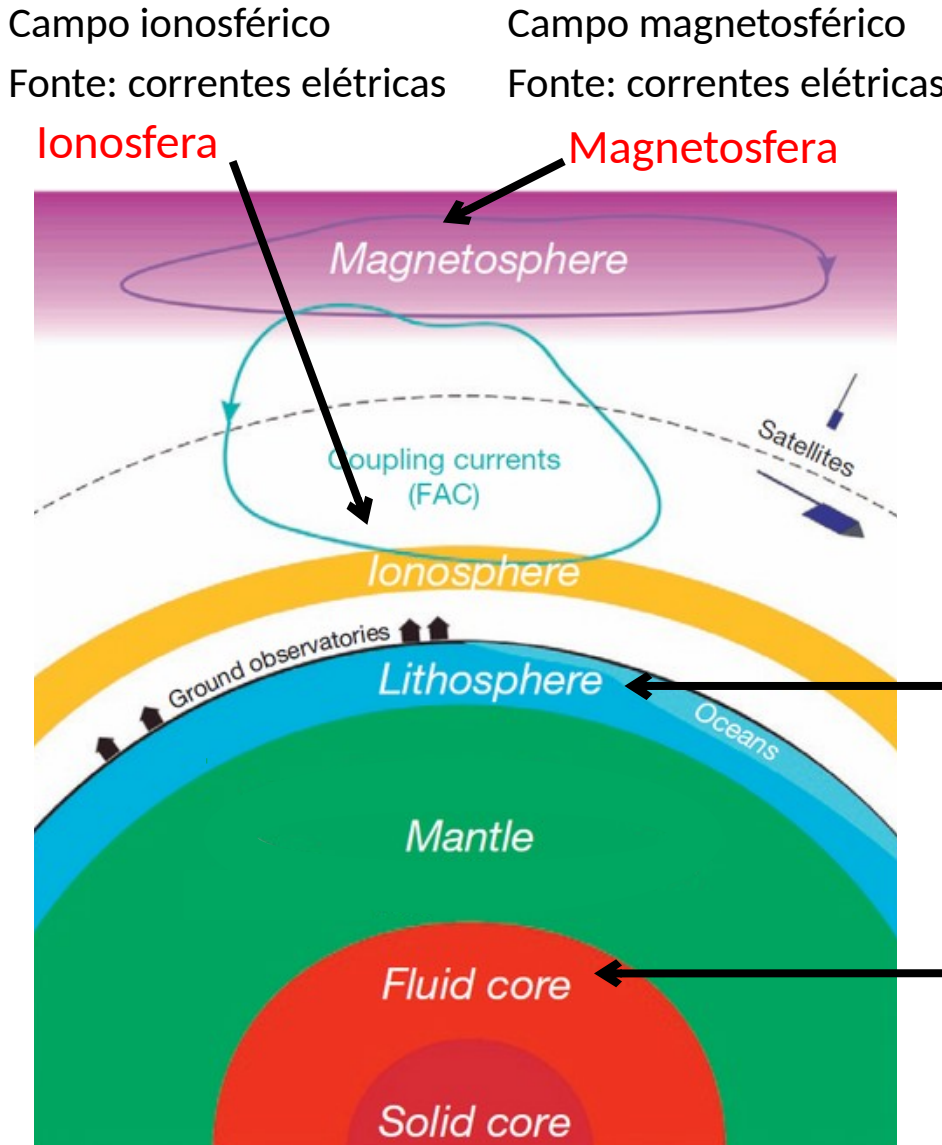
Modificado de Hulot et al. (2015)





À grosso modo, dias em que o campo externo atinge amplitudes baixas (dezenas de nanotesla) são considerados **dias magneticamente calmos.**

Modificado de Hulot et al. (2015)



Por outro lado, dias em que o campo externo atinge amplitudes altas (milhares de nanotesla) são considerados **dias magneticamente perturbados**.

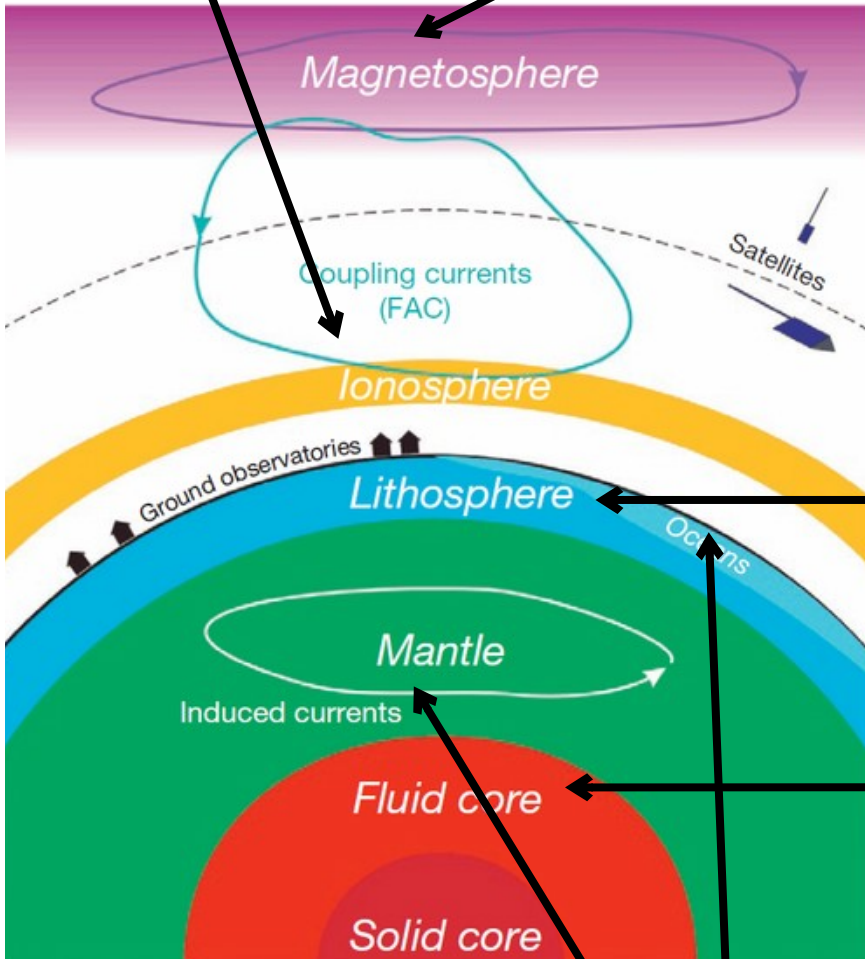
Modificado de Hulot et al. (2015)

Campo ionosférico  
Fonte: correntes elétricas

Campo magnetosférico  
Fonte: correntes elétricas

Ionosfera

Magnetosfera



Campo externo

Por fim, outras fontes do campo geomagnético são correntes elétricas induzidas na crosta, manto e oceanos. Estas correntes são produzidas por variações temporais do campo geomagnético.

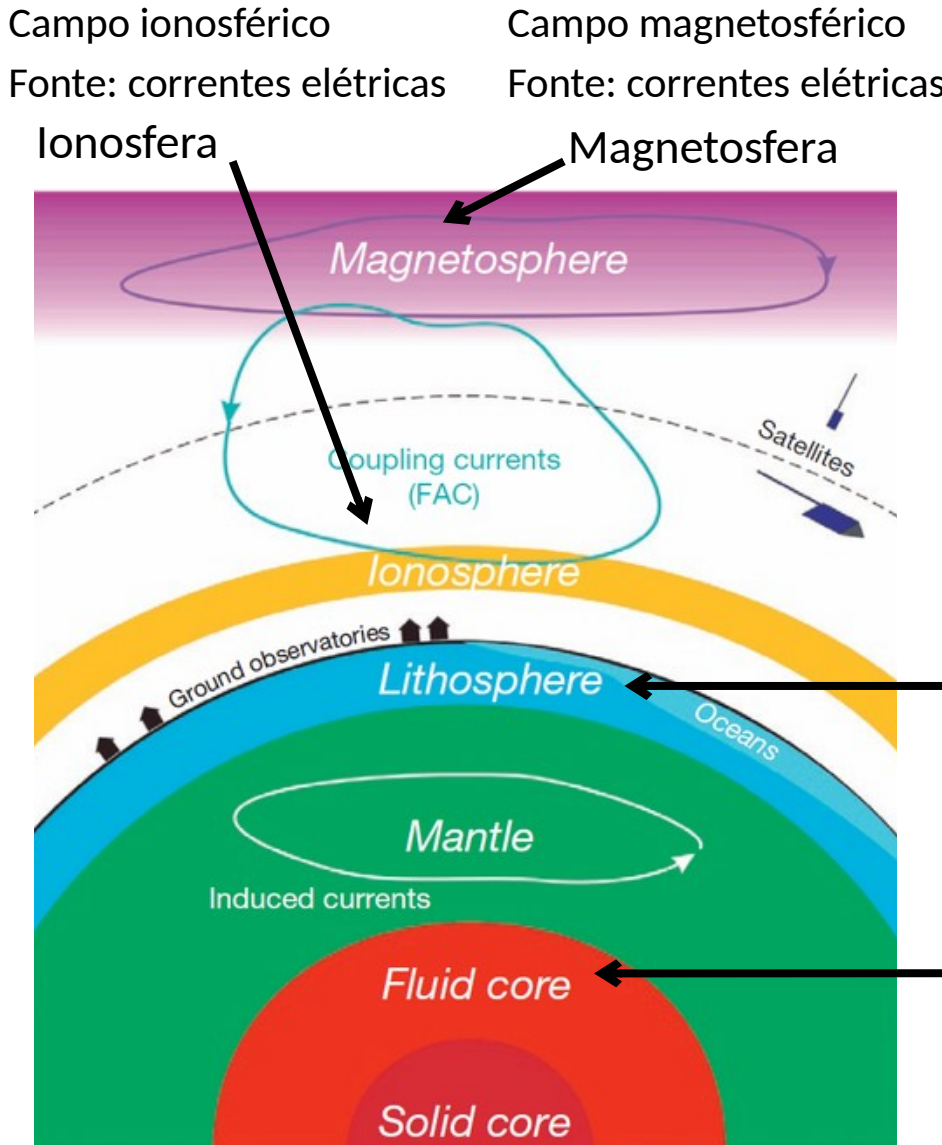
Litosfera  
Fonte: rochas magnetizadas  
Campo crustal

Núcleo externo  
Fonte: correntes elétricas  
Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

Crosta, manto e oceanos  
Fonte: correntes elétricas



Estas componentes do campo geomagnético são denominadas **campos induzidos**.

Campo externo

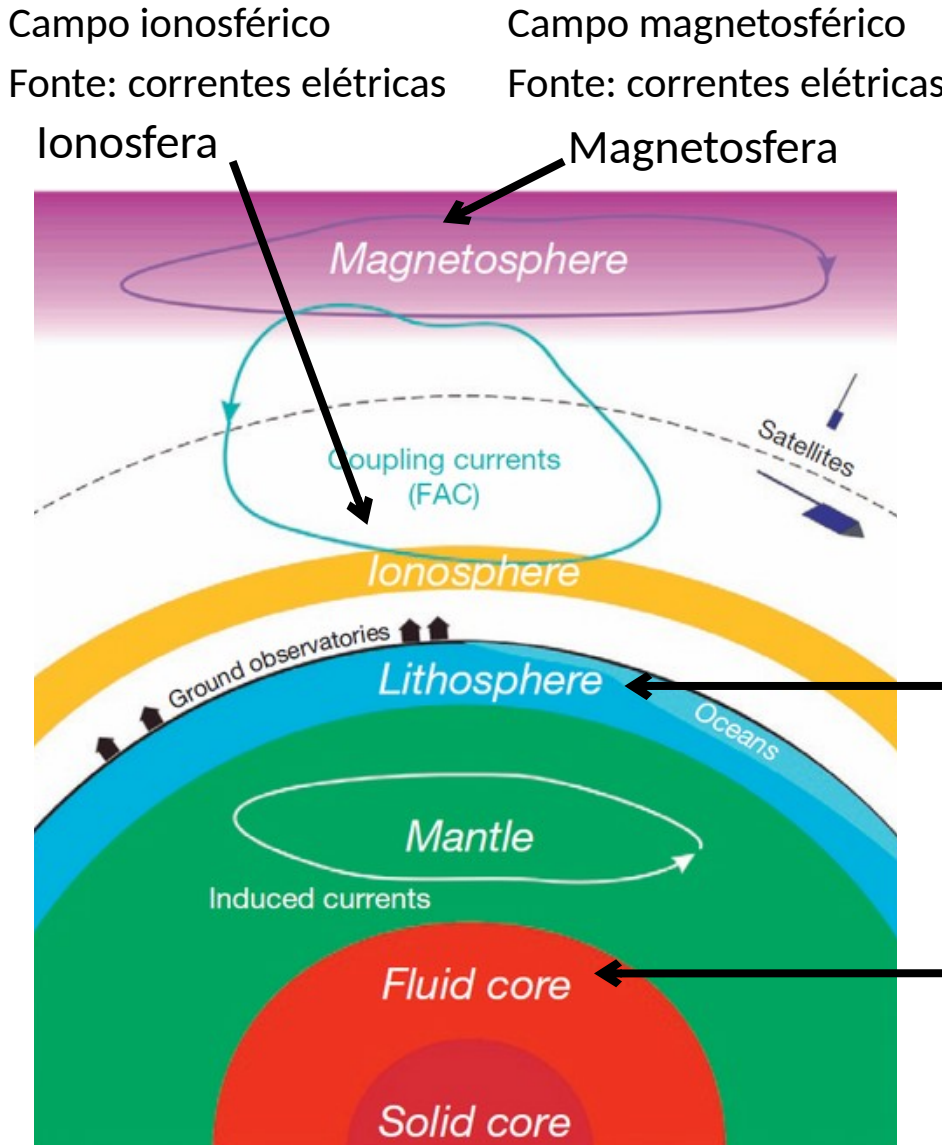
Litosfera  
Fonte: rochas magnetizadas  
Campo crustal

Núcleo externo  
Fonte: correntes elétricas  
Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

Crosta, manto e oceanos  
Fonte: correntes elétricas  
Campos induzidos



Estes campos, sobretudo a parcela produzida por variações temporais do campo externo, podem atingir amplitudes significativas. Contudo, sempre menores que as observadas para o campo externo.

**Litosfera**  
Fonte: rochas magnetizadas  
Campo crustal

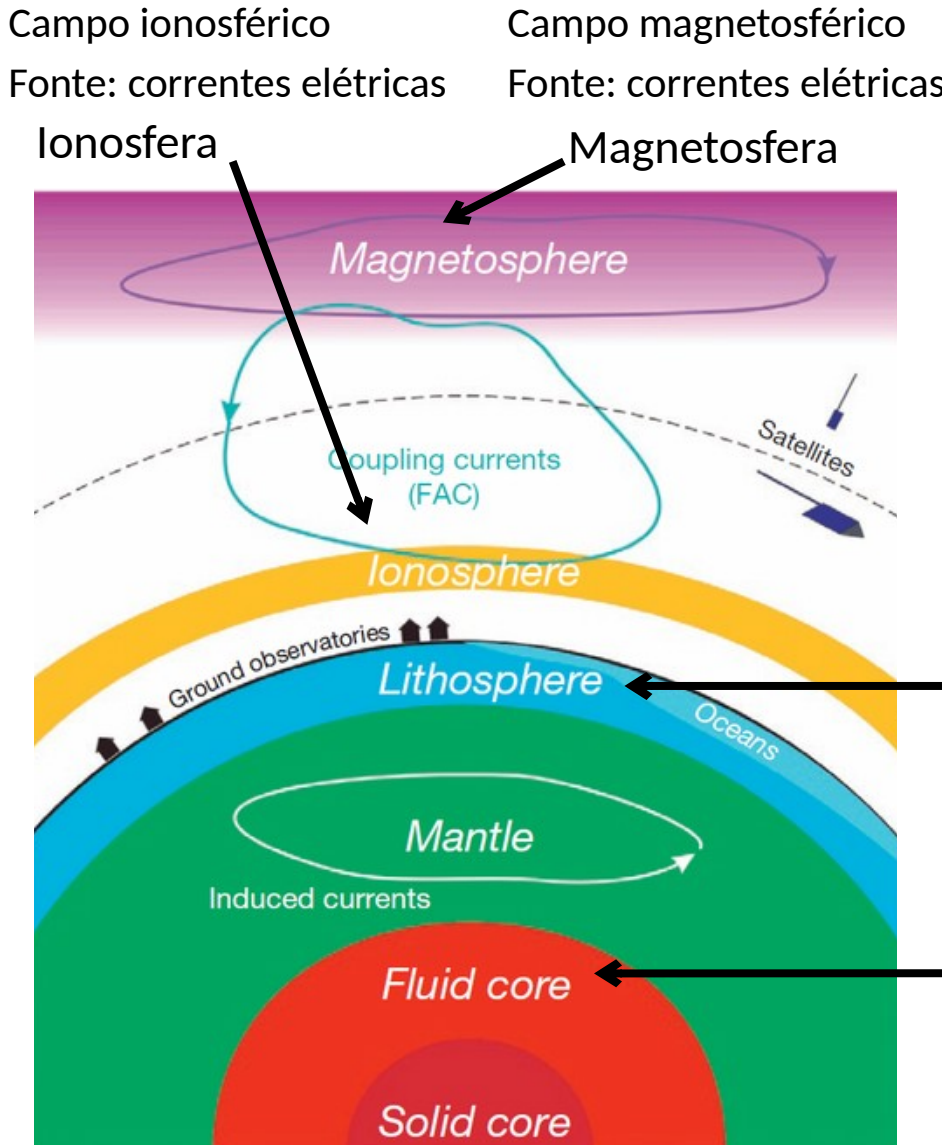
**Núcleo externo**  
Fonte: correntes elétricas  
Campo principal

**Campo total (ou campo interno)**

Modificado de Hulot et al. (2015)

**Crosta, manto e oceanos**  
Fonte: correntes elétricas  
Campos induzidos





Em resumo...

Campo externo

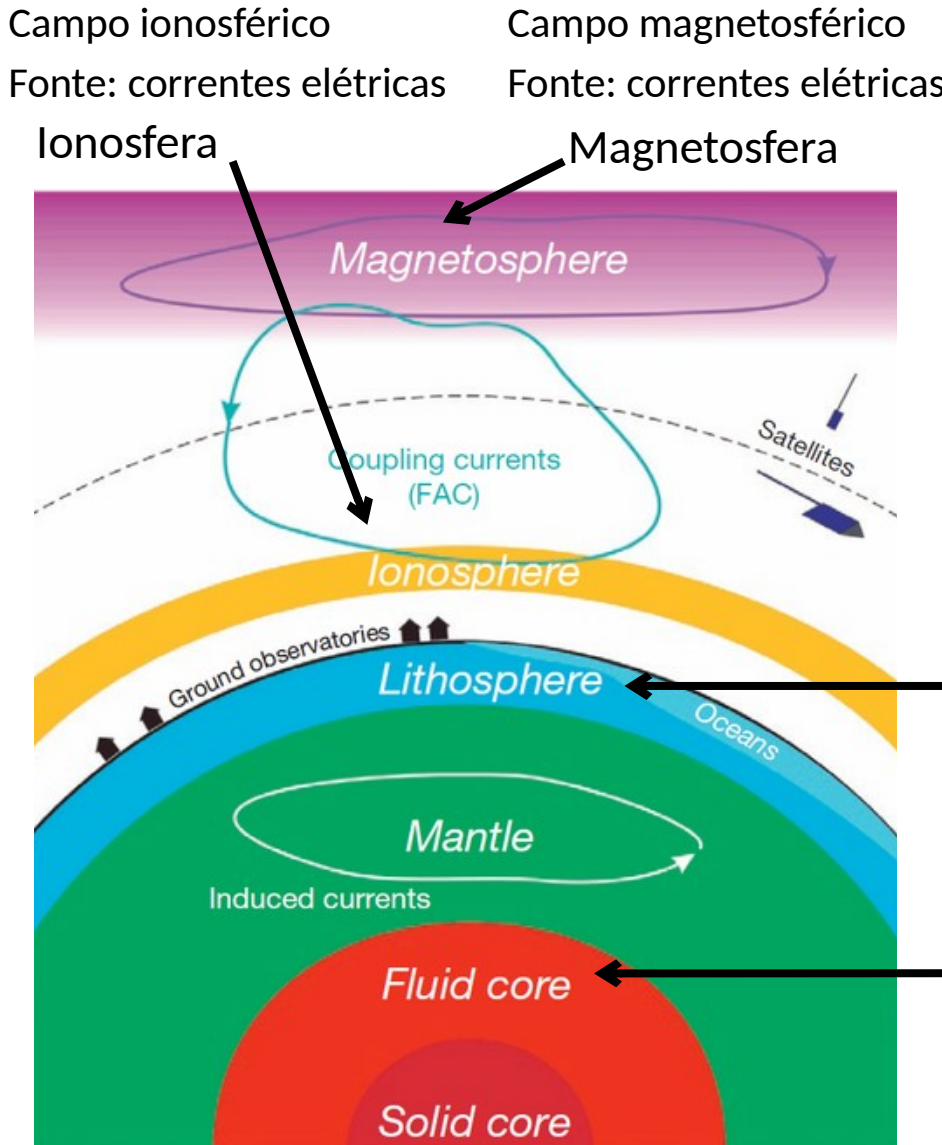
Litosfera  
Fonte: rochas magnetizadas  
Campo crustal

Núcleo externo  
Fonte: correntes elétricas  
Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

Crosta, manto e oceanos  
Fonte: correntes elétricas  
Campos induzidos



Em resumo...

Litosfera  
Fonte: rochas magnetizadas

Campo crustal

Núcleo externo  
Fonte: correntes elétricas

Campo principal

Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

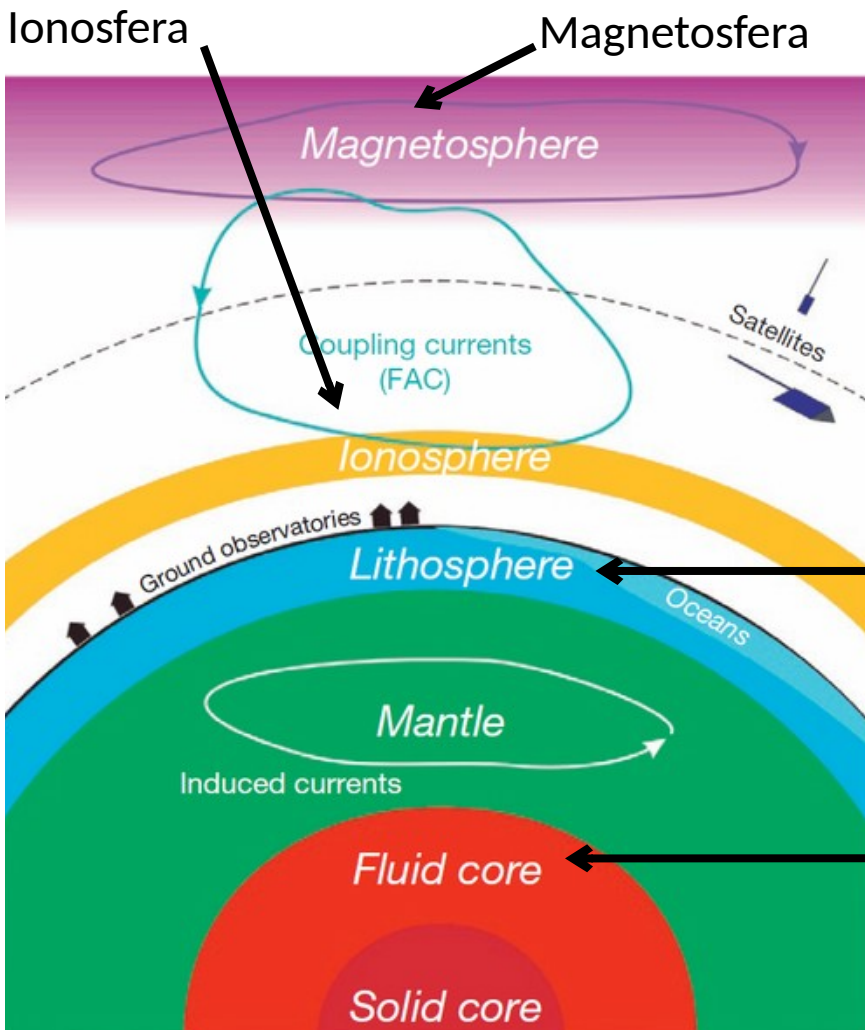
Crosta, manto e oceanos  
Fonte: correntes elétricas  
Campos induzidos

**Campo ionosférico**

Fonte: correntes elétricas

**Campo magnetosférico**

Fonte: correntes elétricas



**Campo externo**

Em resumo...

Litosfera  
Fonte: rochas magnetizadas

**Campo crustal**

Núcleo externo  
Fonte: correntes elétricas

**Campo principal**

**Campo total  
(ou campo interno)**

Modificado de Hulot et al. (2015)

Crosta, manto e oceanos

Fonte: correntes elétricas

Campos induzidos



## Campo ionosférico

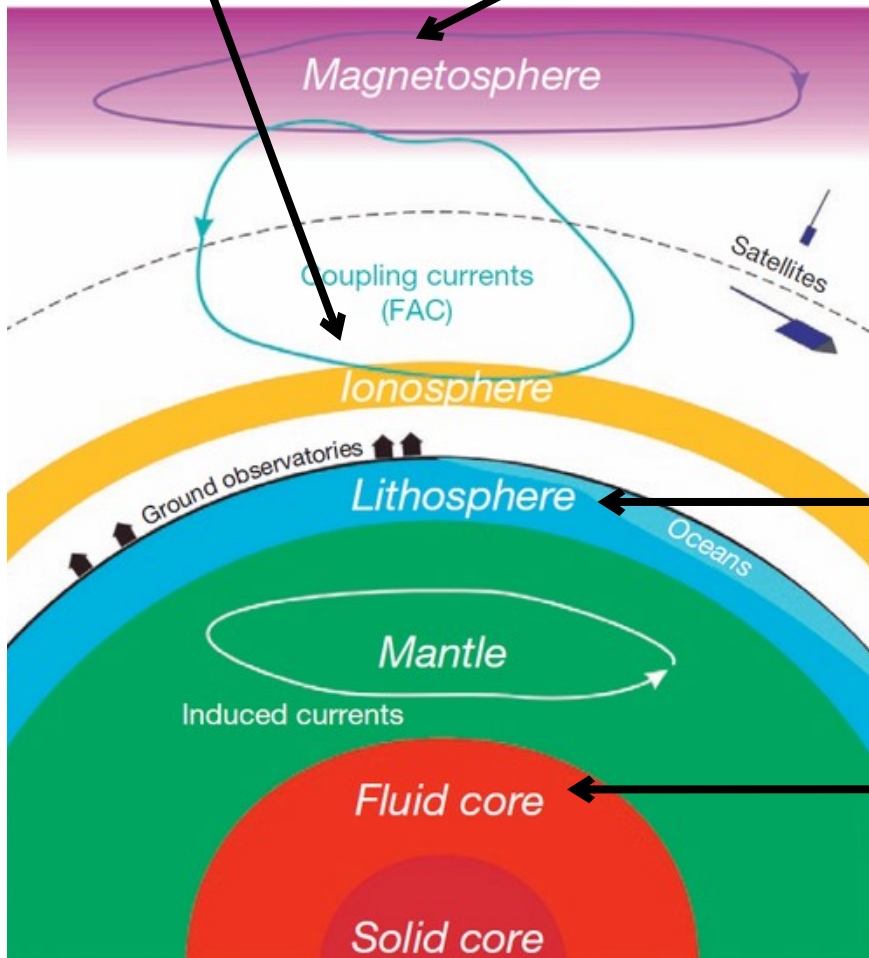
Fonte: correntes elétricas

## Campo magnetosférico

Fonte: correntes elétricas

# Ionosfera

## Magnetosfera



Campo  
externo

## Em resumo...

# Litosfera

Fonte: rochas magnetizadas

## Campo crustal

Núcleo externo

Fonte: correntes elétricas

## Campo principal

Campo  
total  
(ou campo  
interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

## Crosta, manto e oceanos

Fonte: correntes elétricas

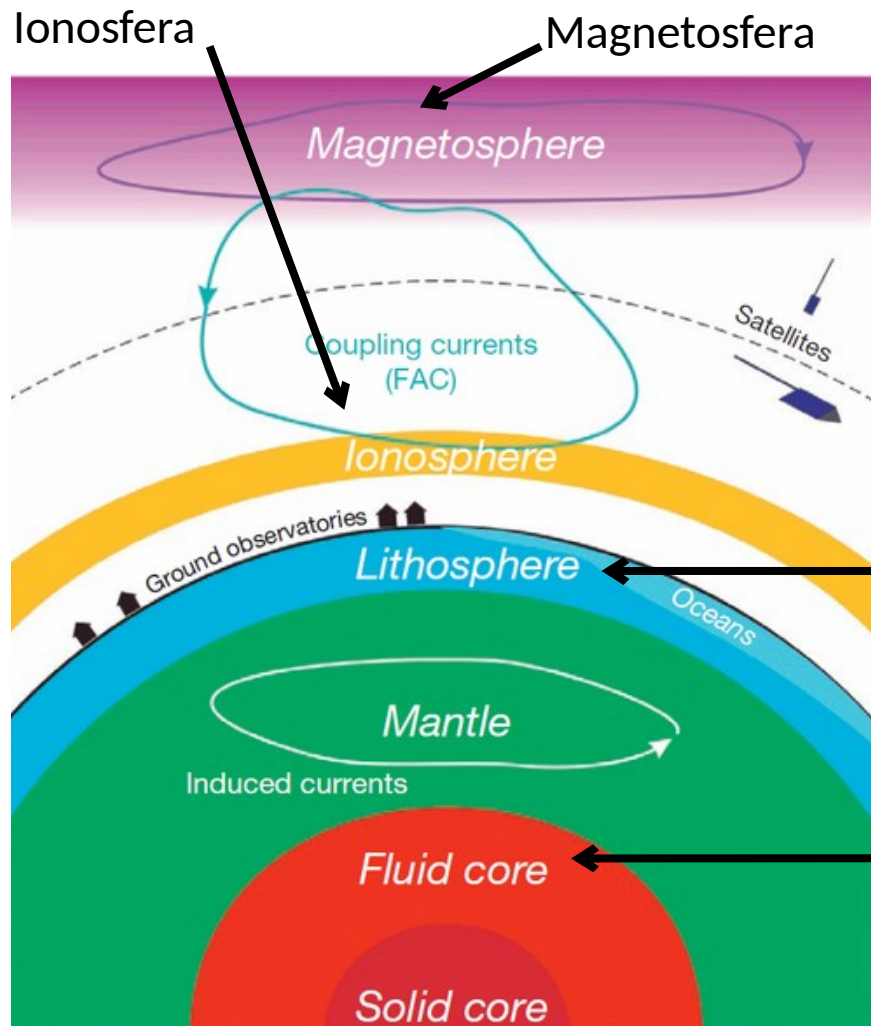
## Campos induzidos

## Campo ionosférico

Fonte: correntes elétricas

## Campo magnetosférico

Fonte: correntes elétricas



Campo externo

Contudo, em  
geofísica  
aplicada...

Litosfera

Fonte: rochas magnetizadas

Campo crustal

Núcleo externo

Fonte: correntes elétricas

Campo principal

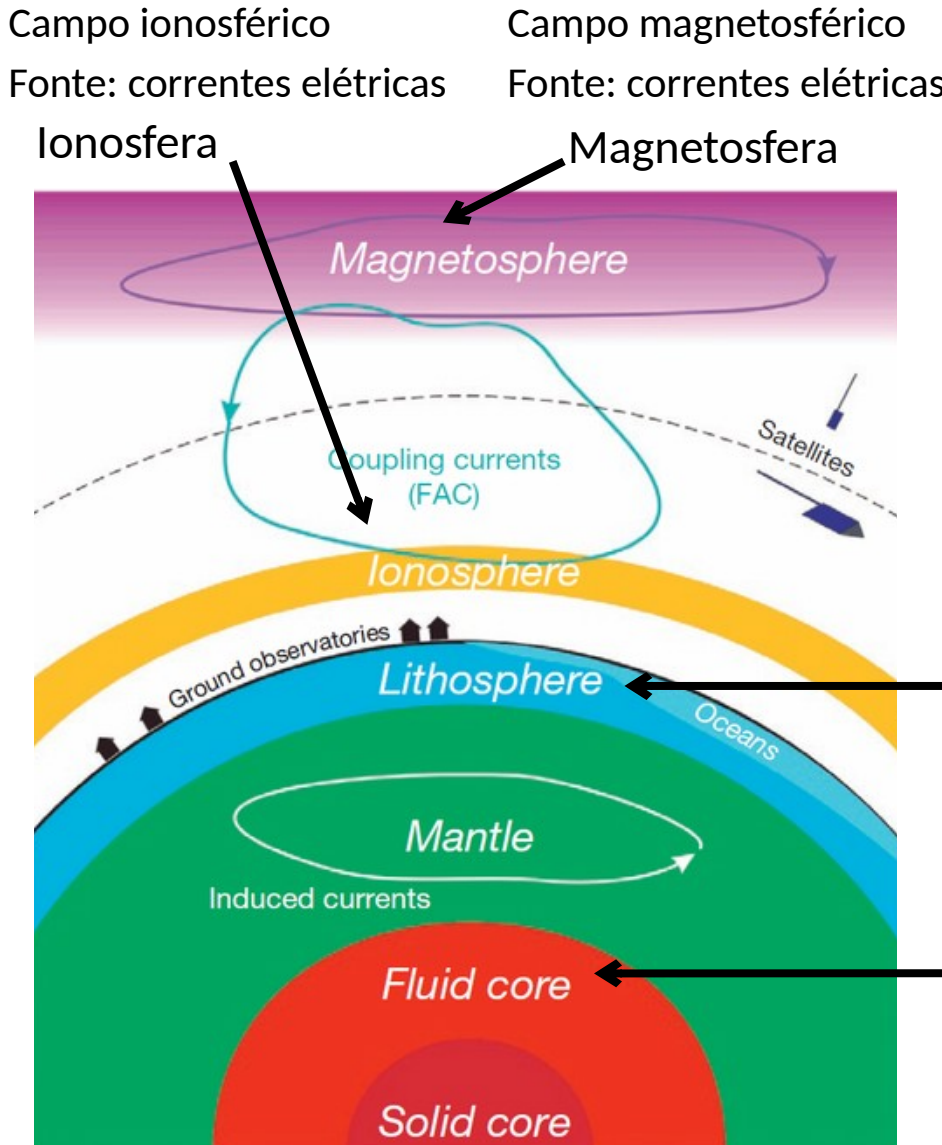
Campo total  
(ou campo interno)

Modificado de Hulot et al. (2015)

Crosta, manto e oceanos

Fonte: correntes elétricas

Campos induzidos



... estamos interessados apenas no campo total

Litosfera  
Fonte: rochas magnetizadas  
Campo crustal

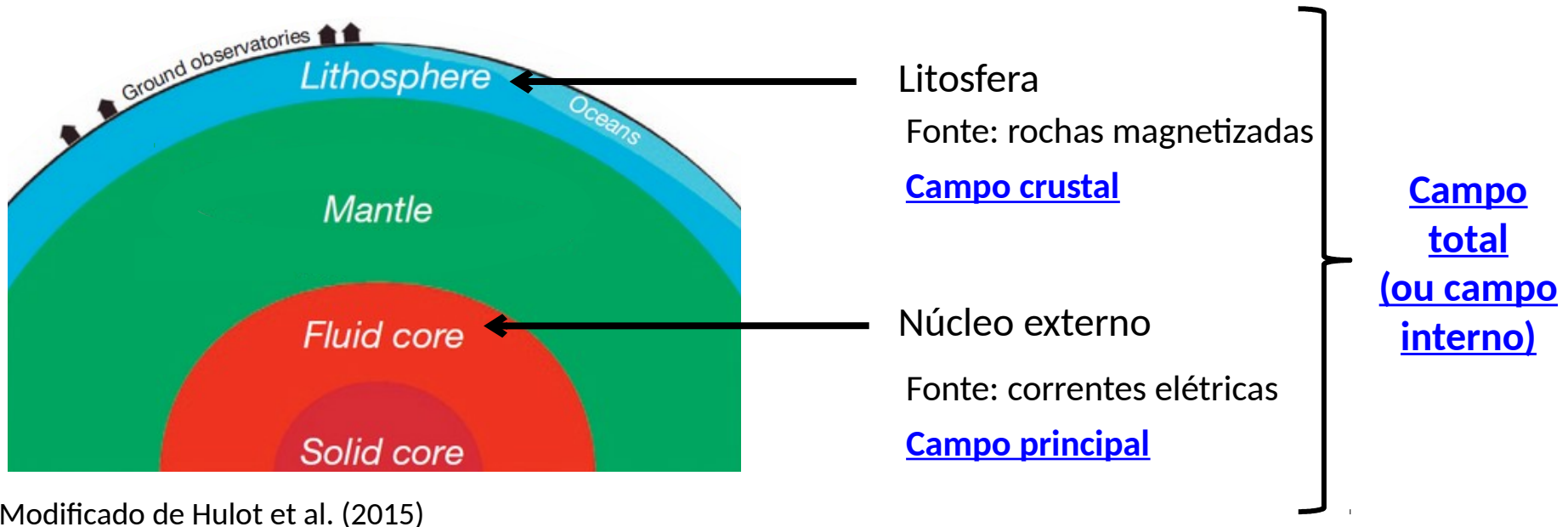
Núcleo externo  
Fonte: correntes elétricas  
Campo principal

Campo total (ou campo interno)

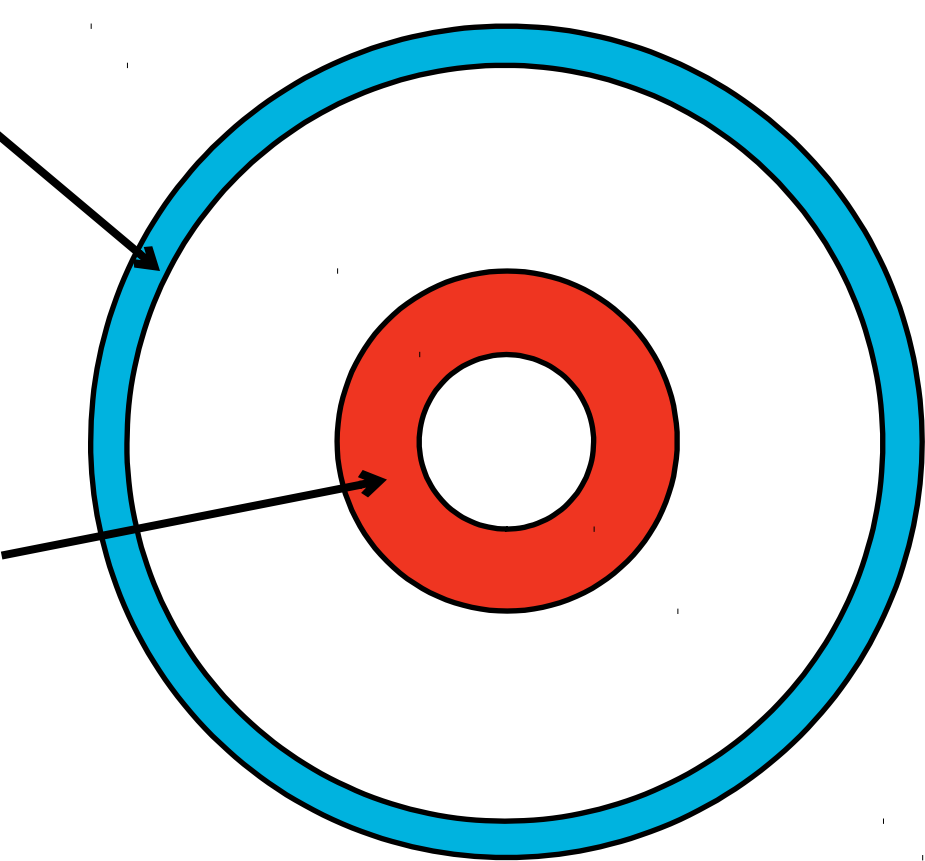
Modificado de Hulot et al. (2015)

Crosta, manto e oceanos  
Fonte: correntes elétricas  
Campos induzidos

As demais componentes do campo geomagnético são removidas no processamento dos dados

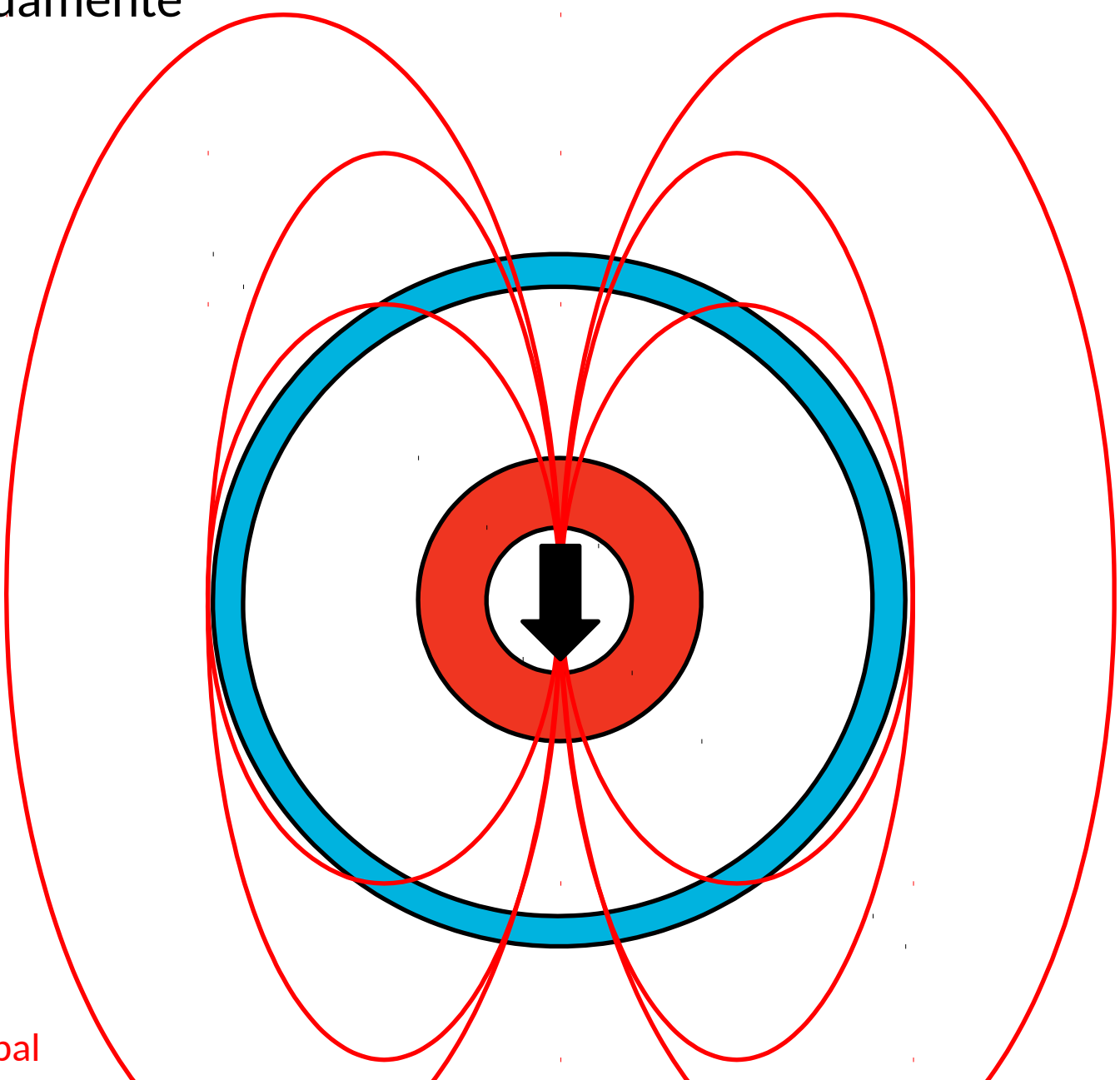


Litosfera

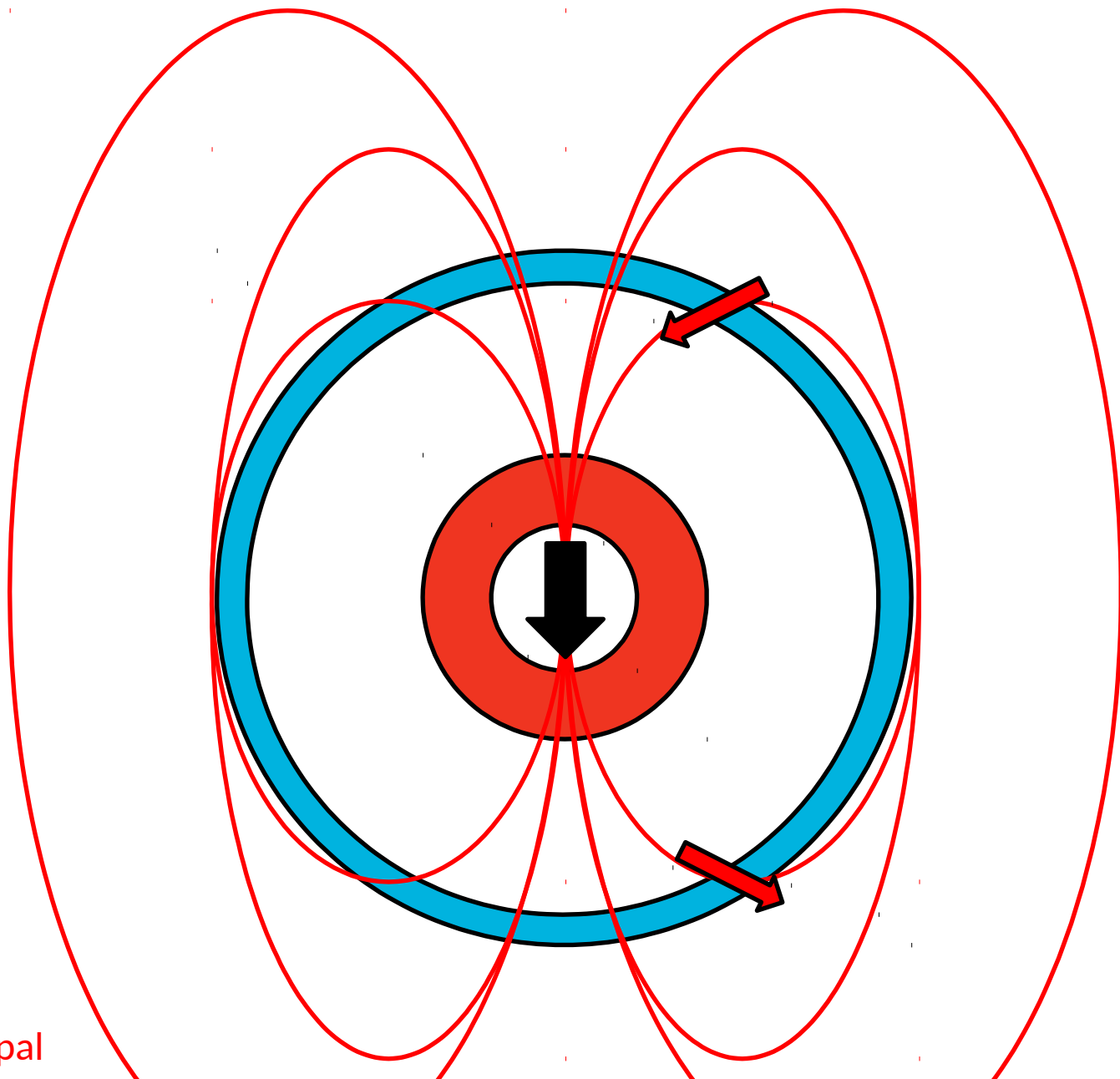


Núcleo externo

O campo principal é  
aproximadamente  
dipolar

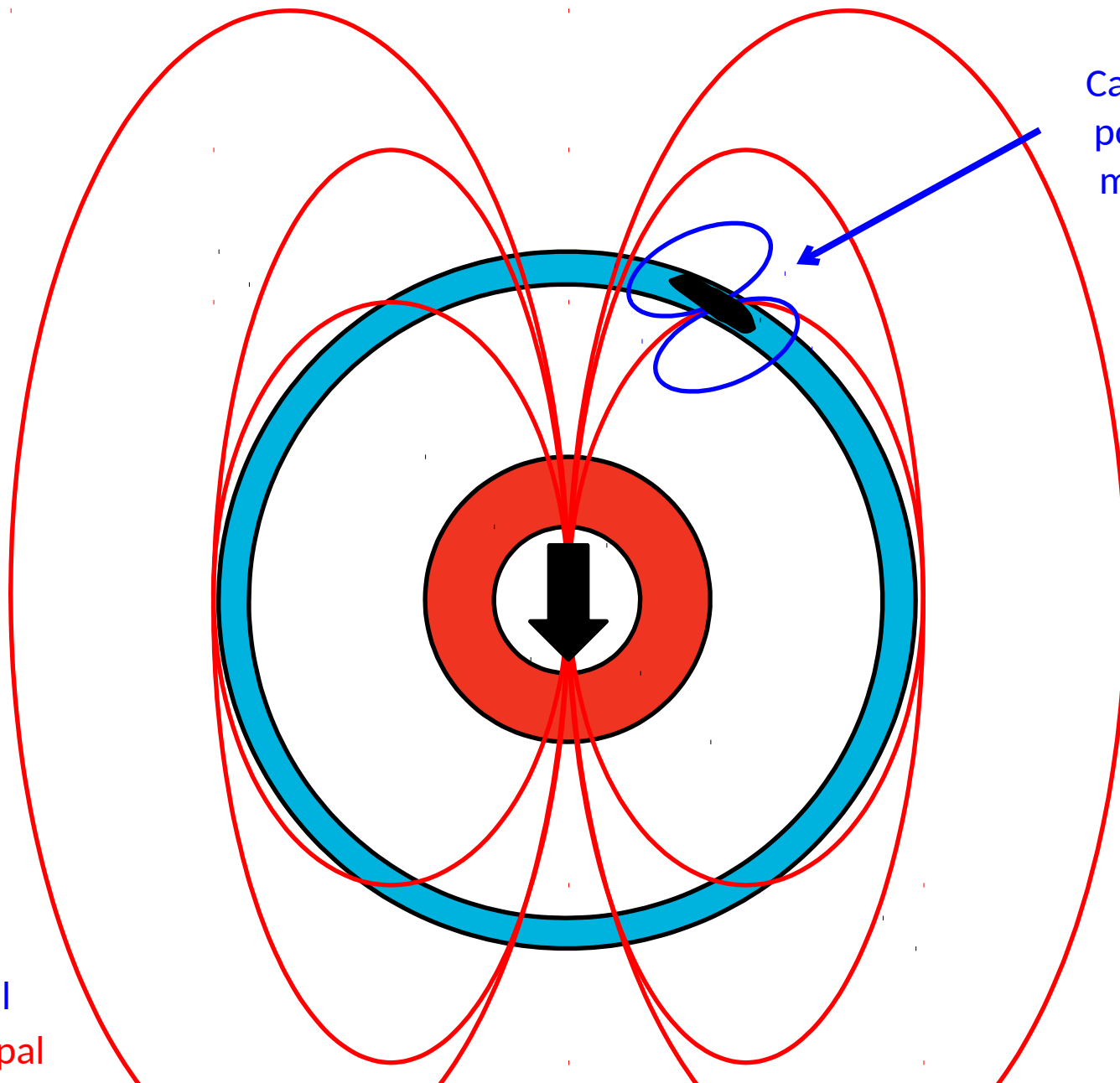


Campo principal



Campo principal

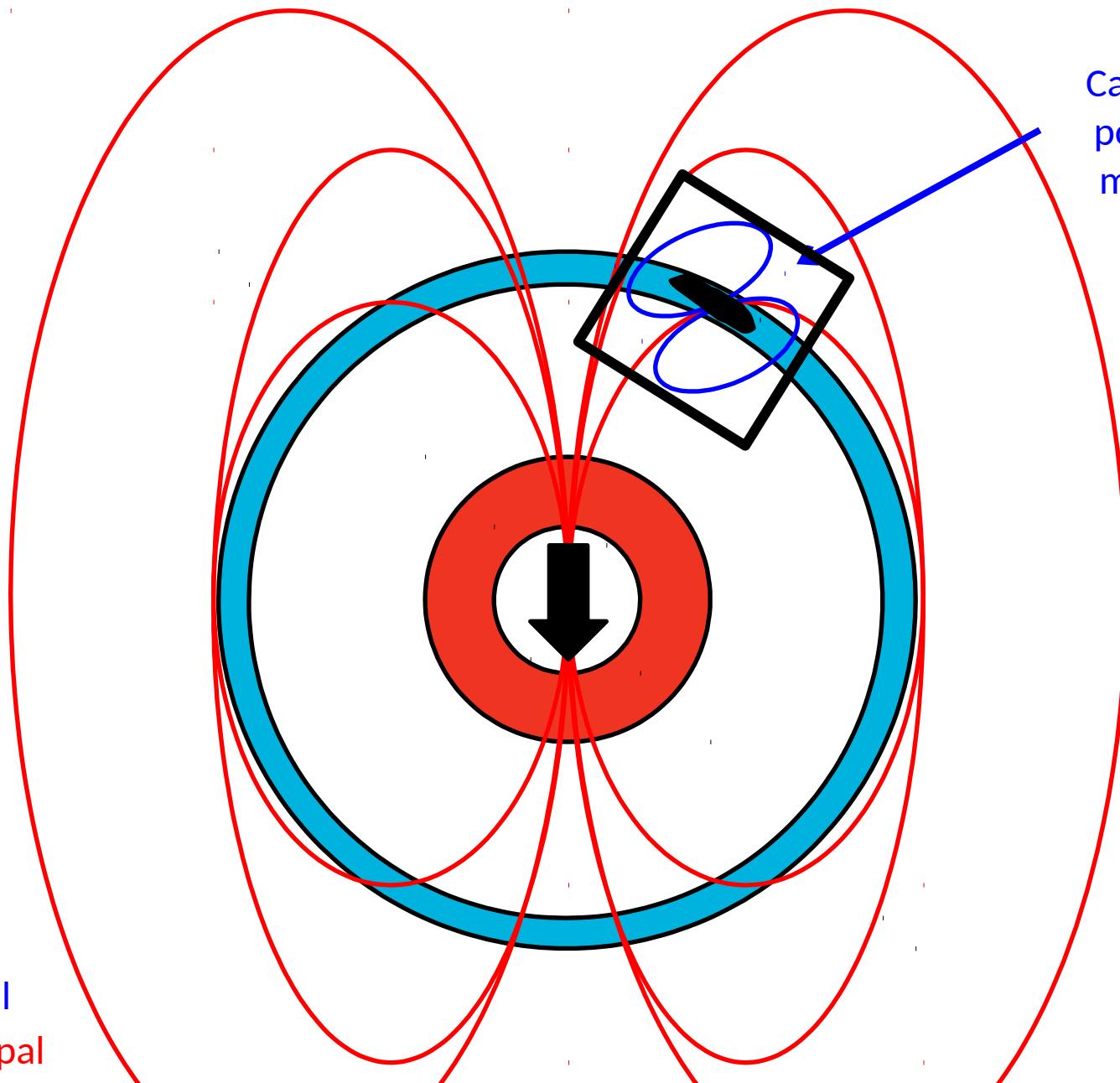
Campo gerado  
por um corpo  
magnetizado



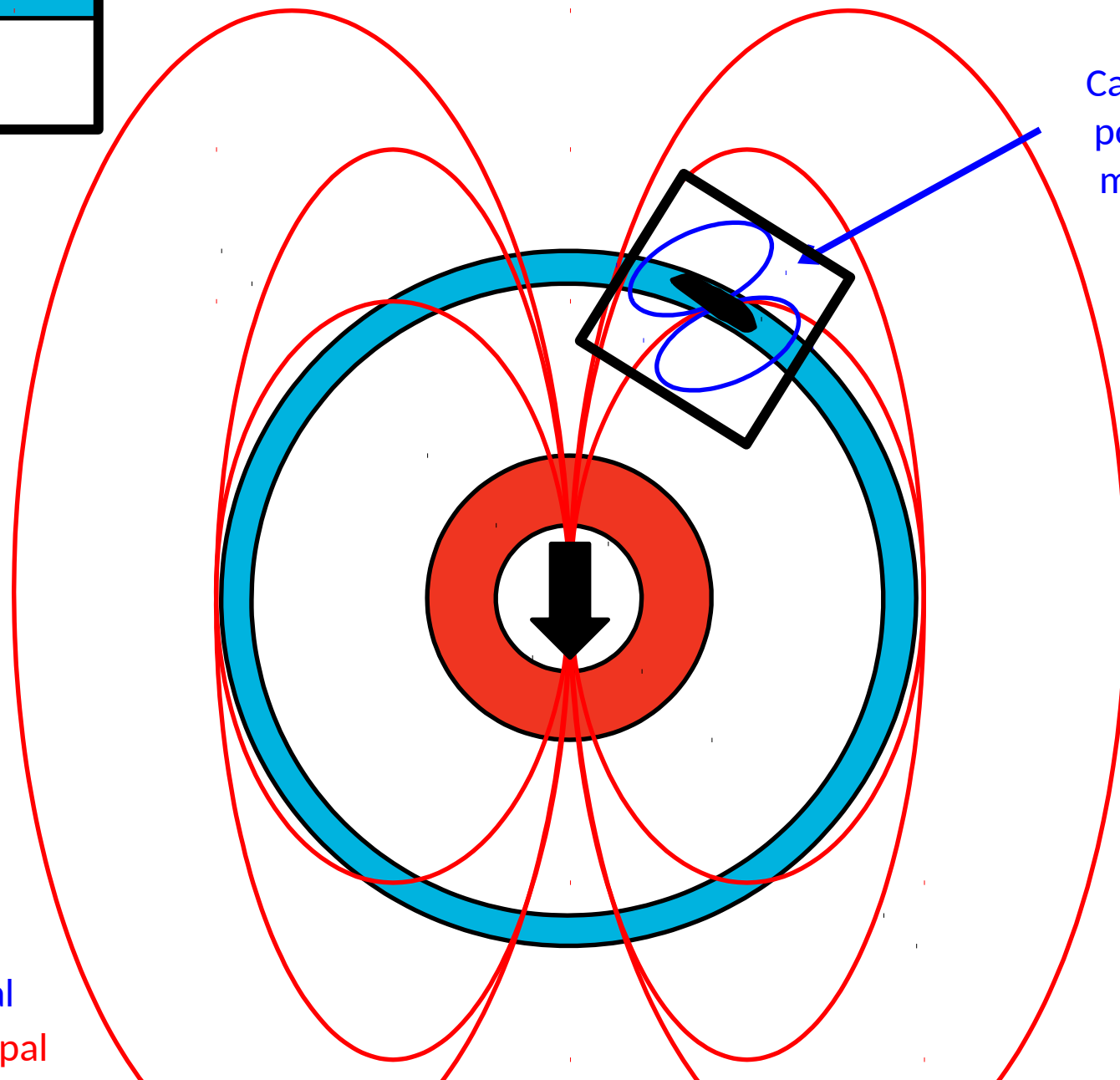
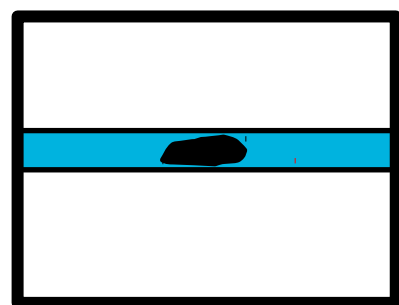
Campo crustal  
Campo principal



Campo gerado  
por um corpo  
magnetizado

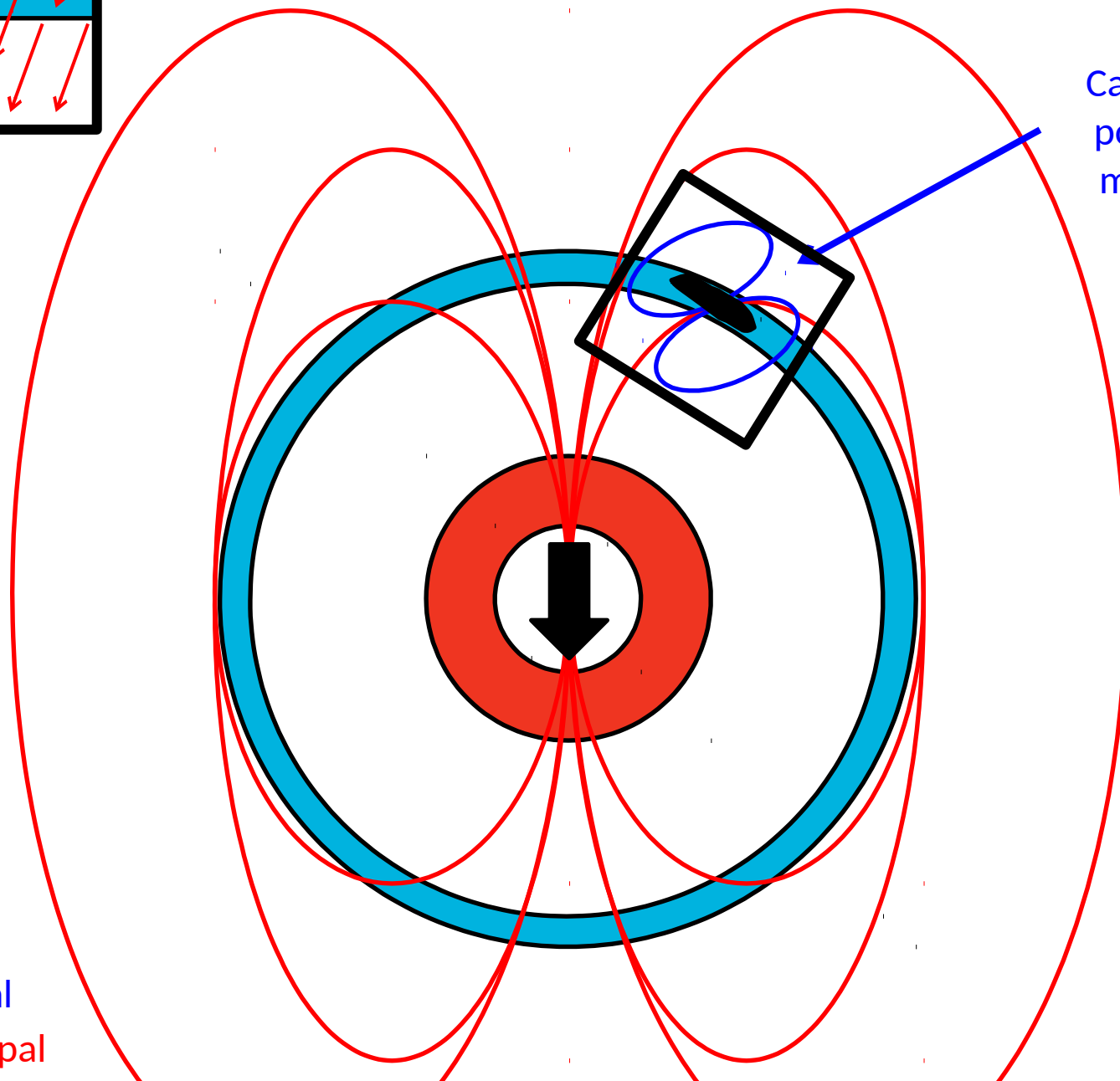
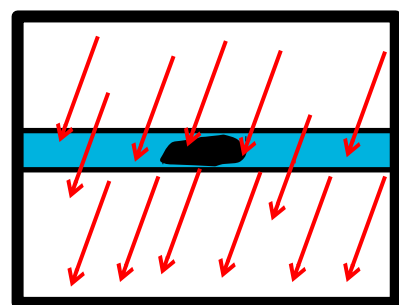


Campo crustal  
Campo principal



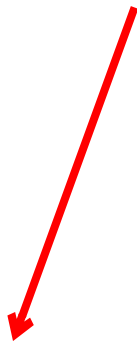
Campo gerado  
por um corpo  
magnetizado

Campo crustal  
Campo principal



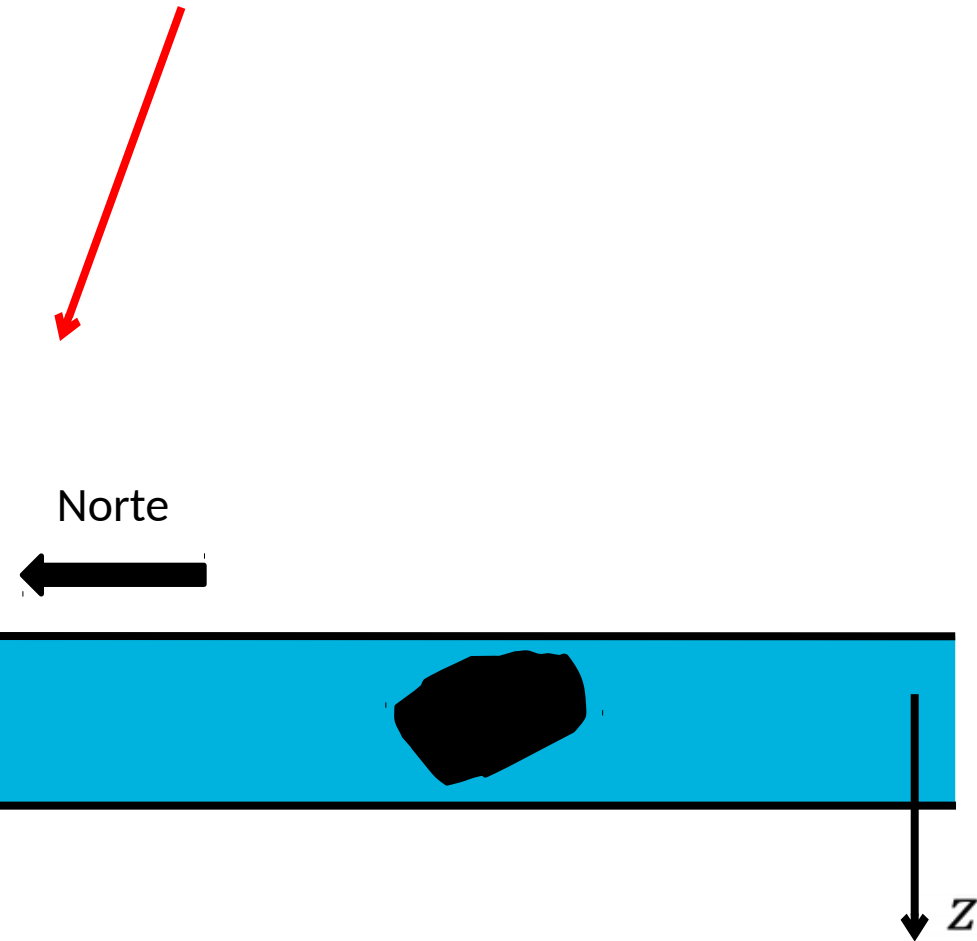
Campo gerado  
por um corpo  
magnetizado

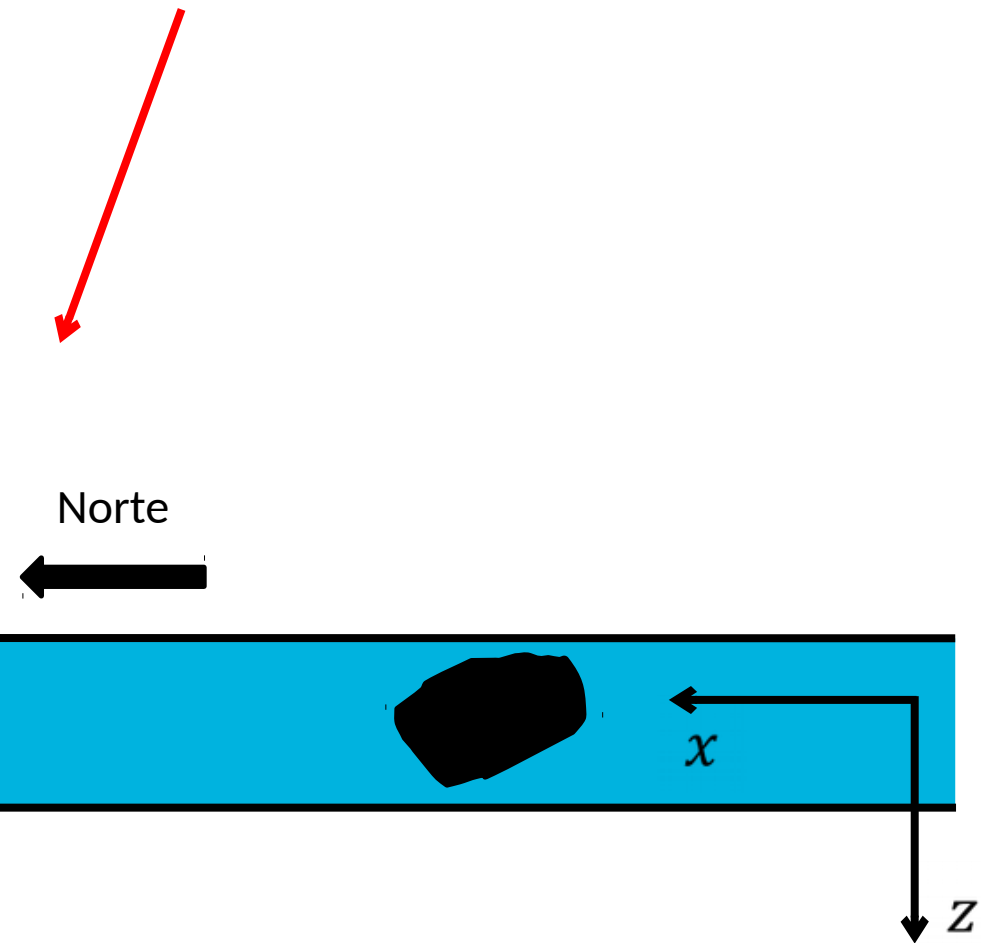
Campo crustal  
Campo principal

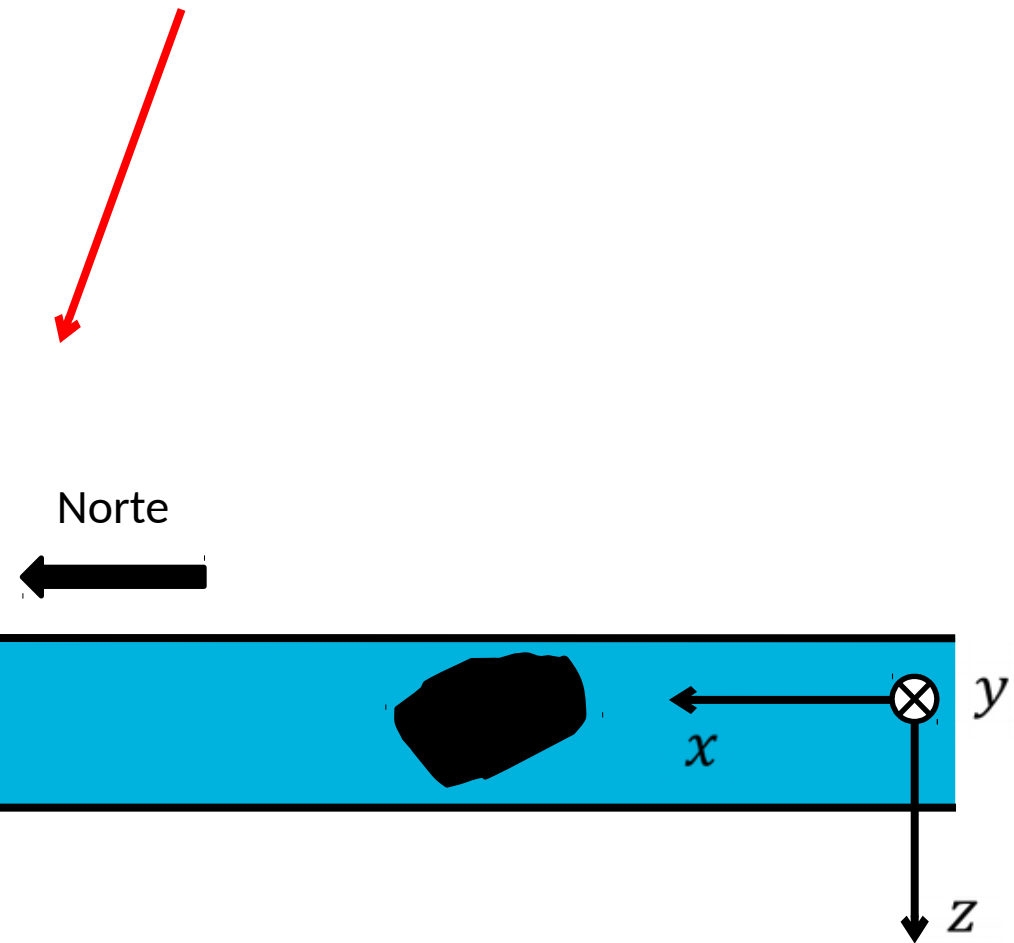


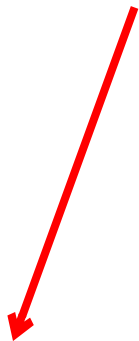
Norte



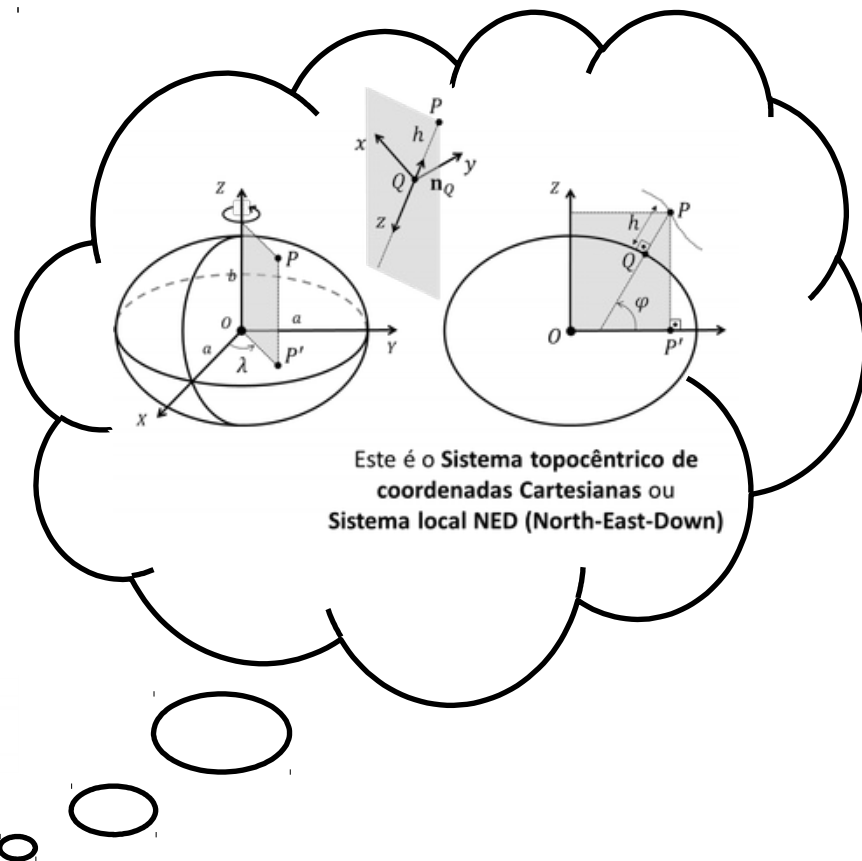




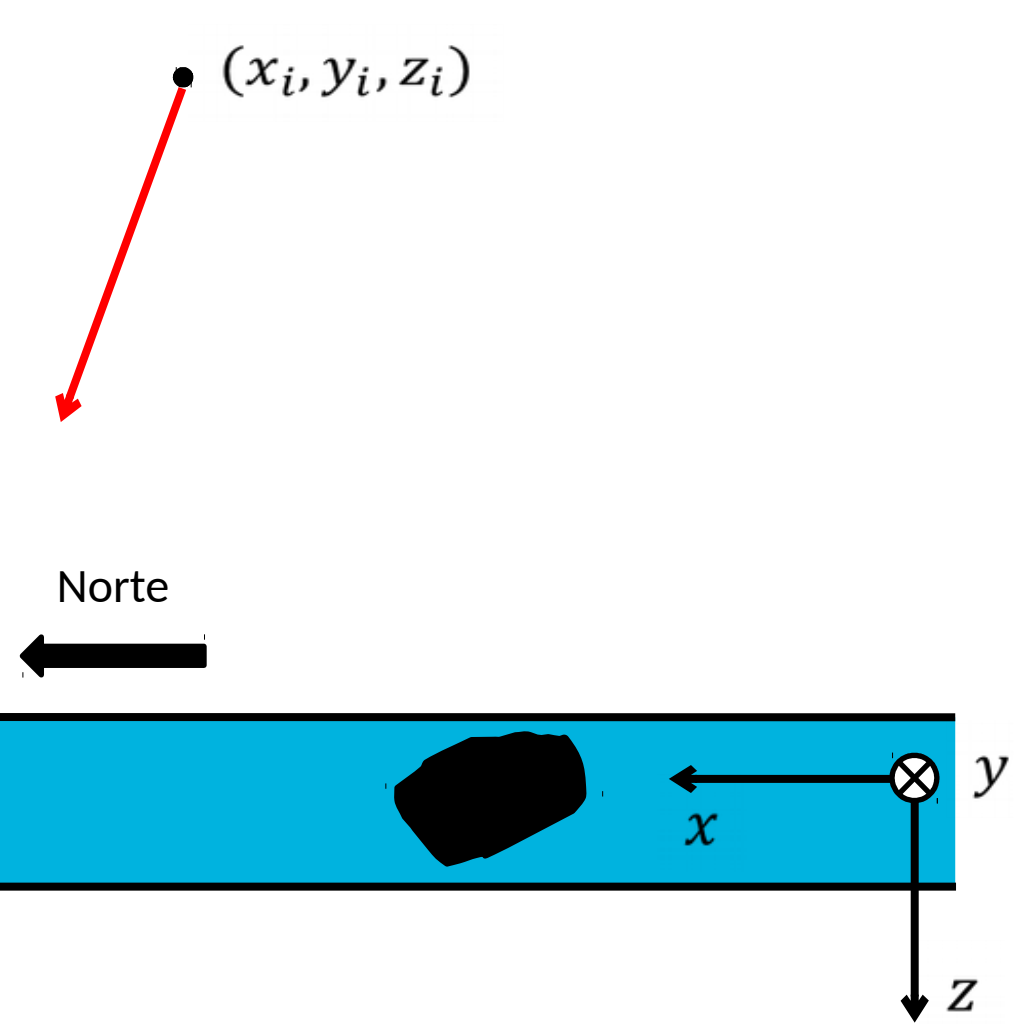


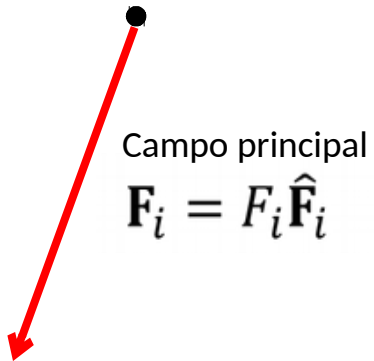


Norte



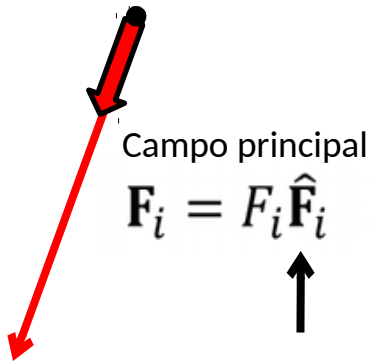






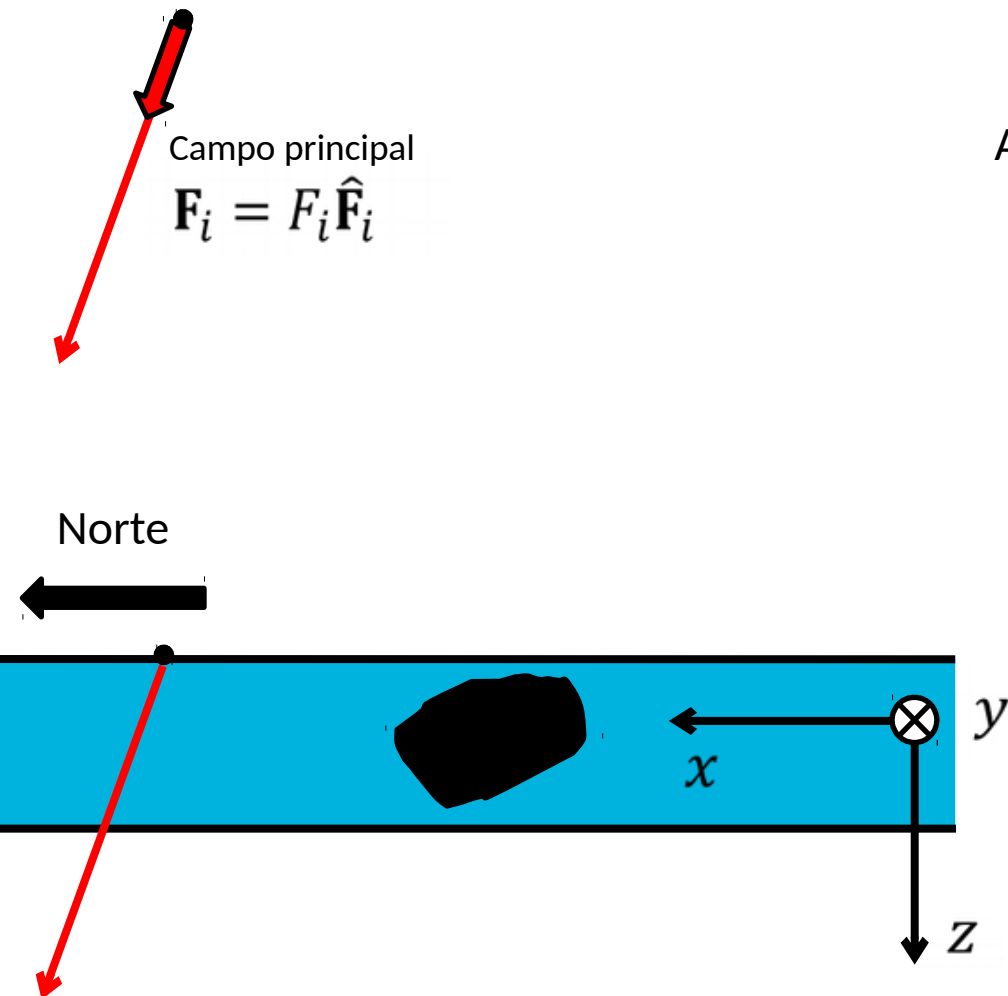
Norte





Norte

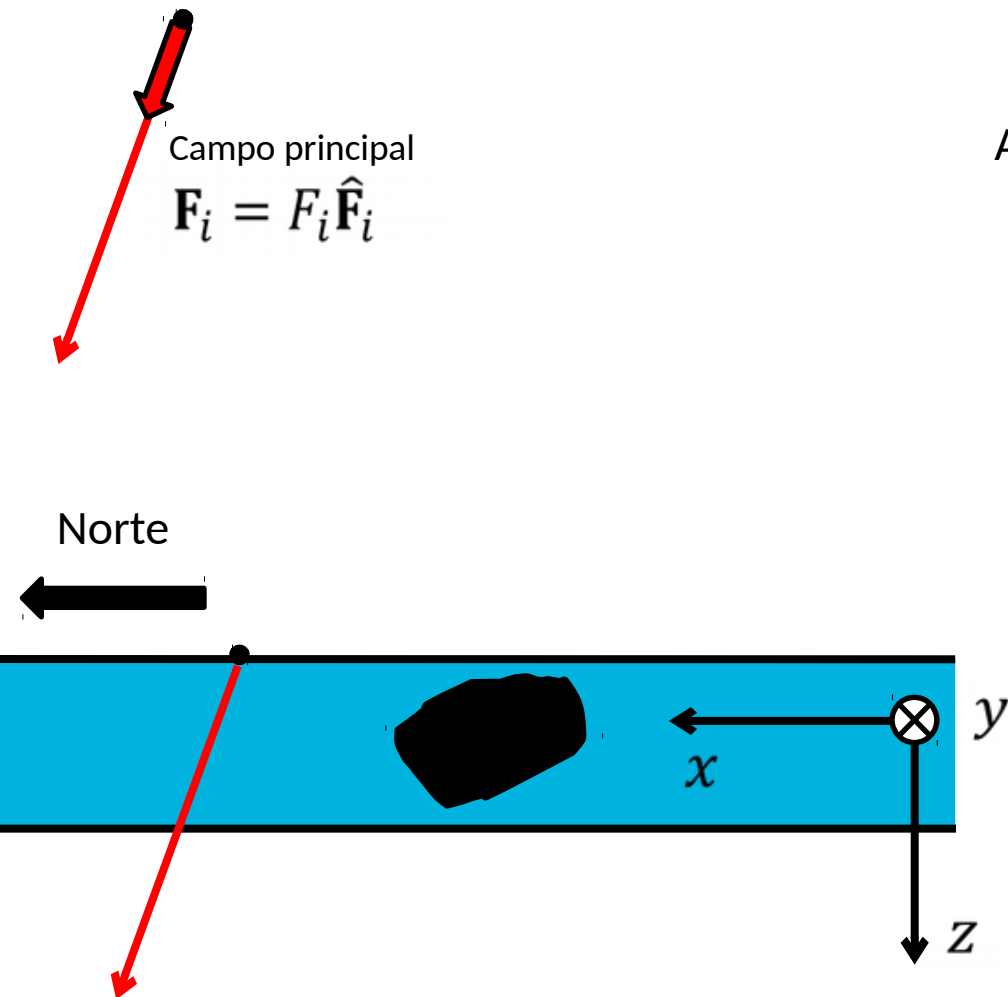




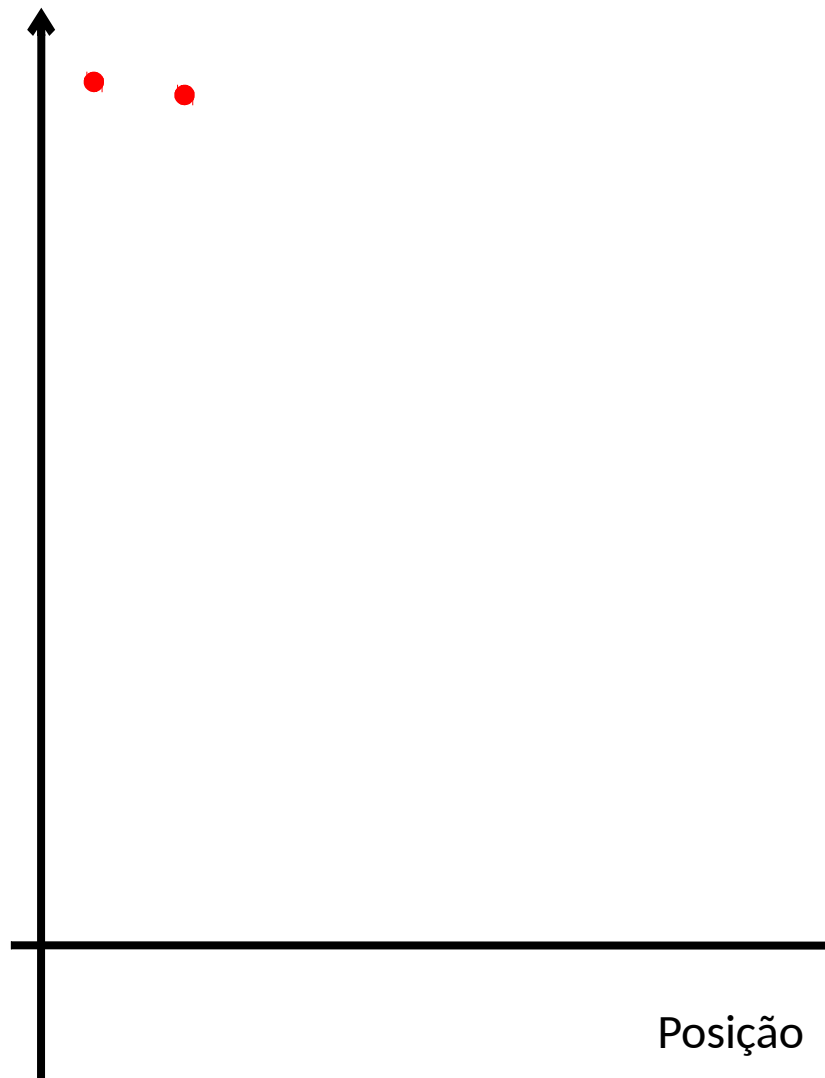
Amplitude  
(nT)

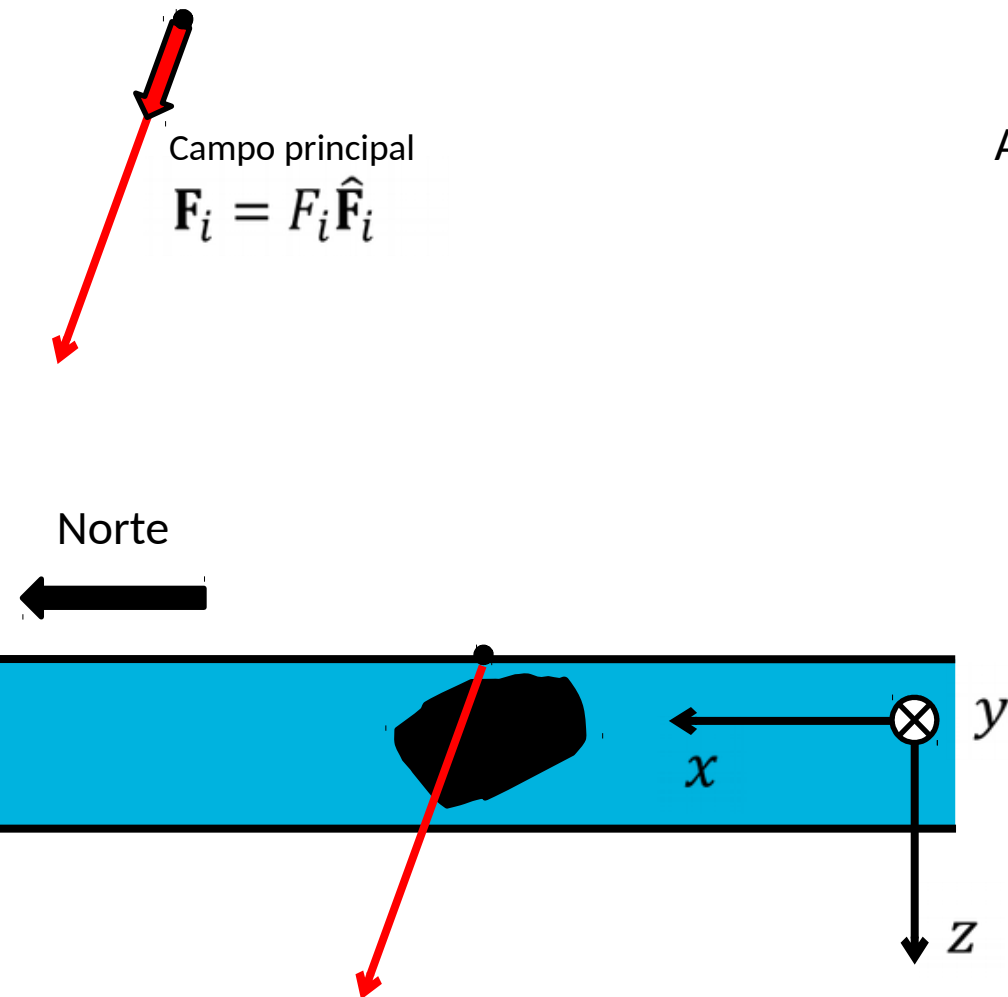


Posição

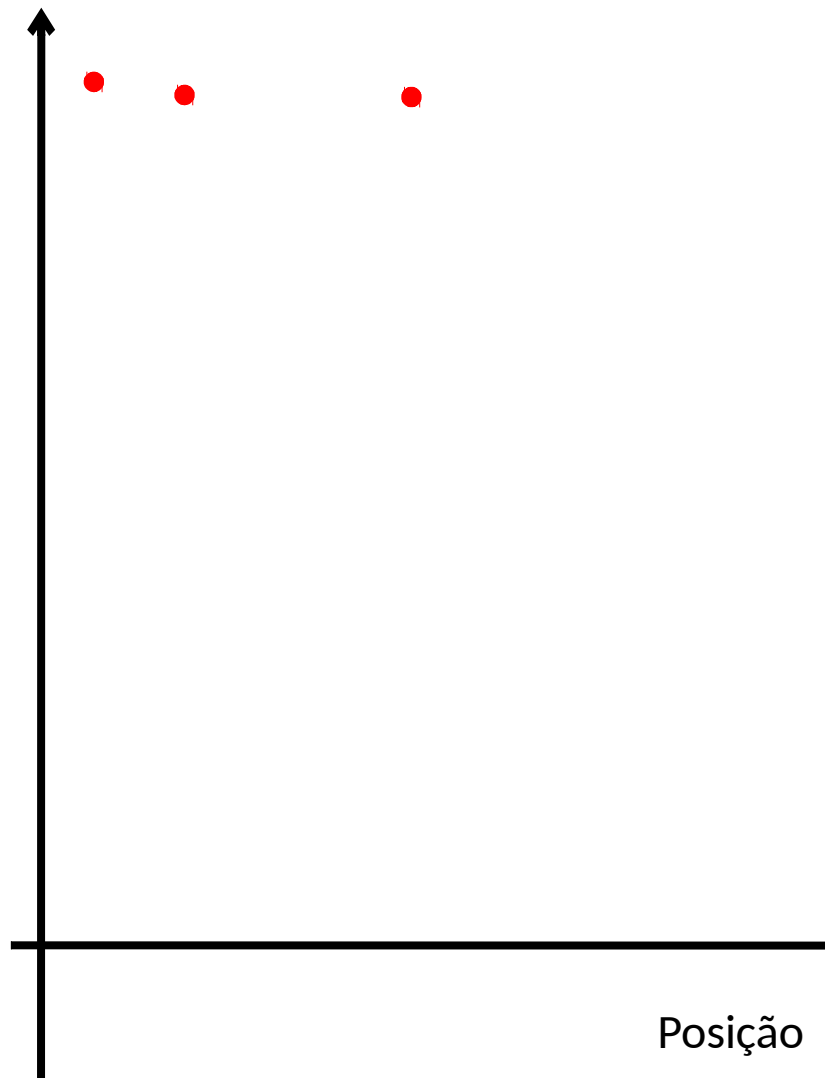


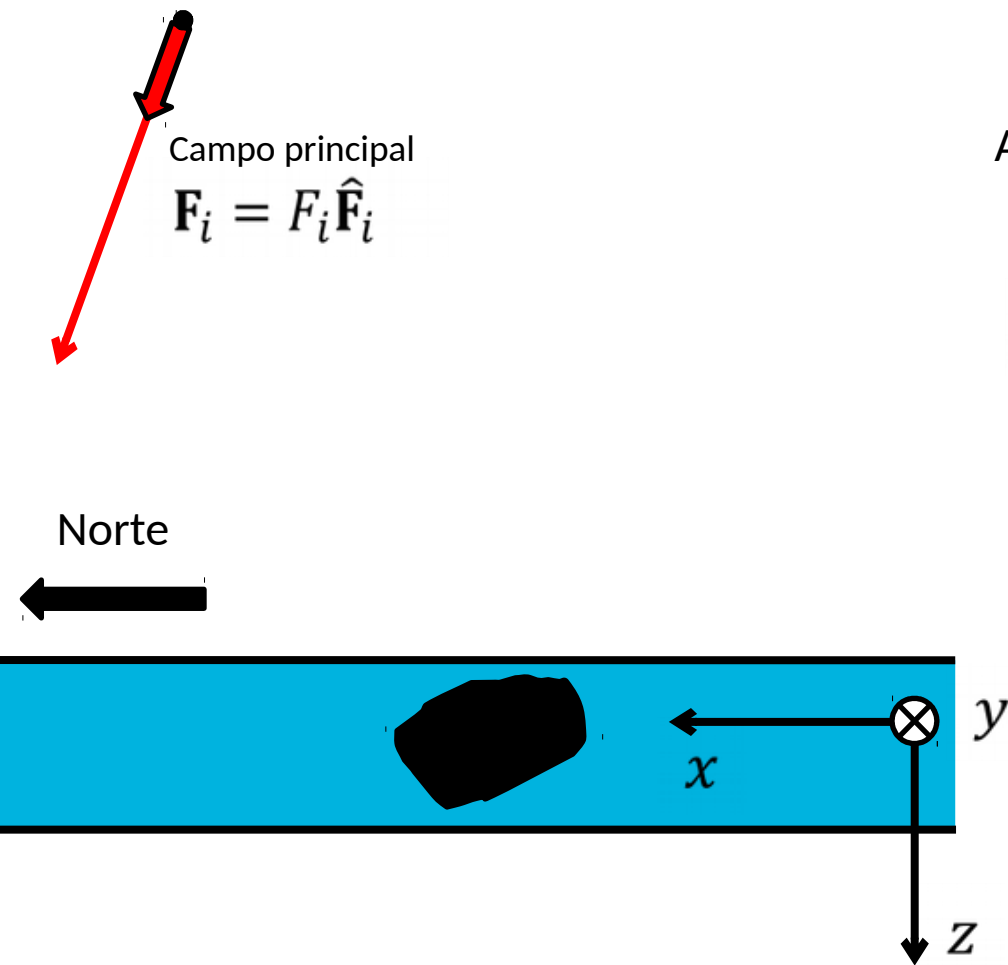
Amplitude  
(nT)





Amplitude  
(nT)

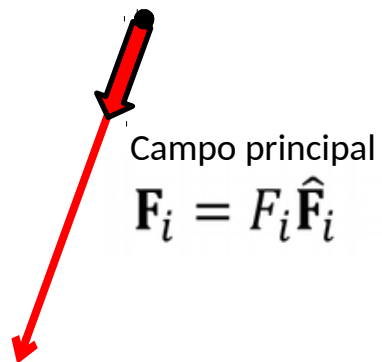




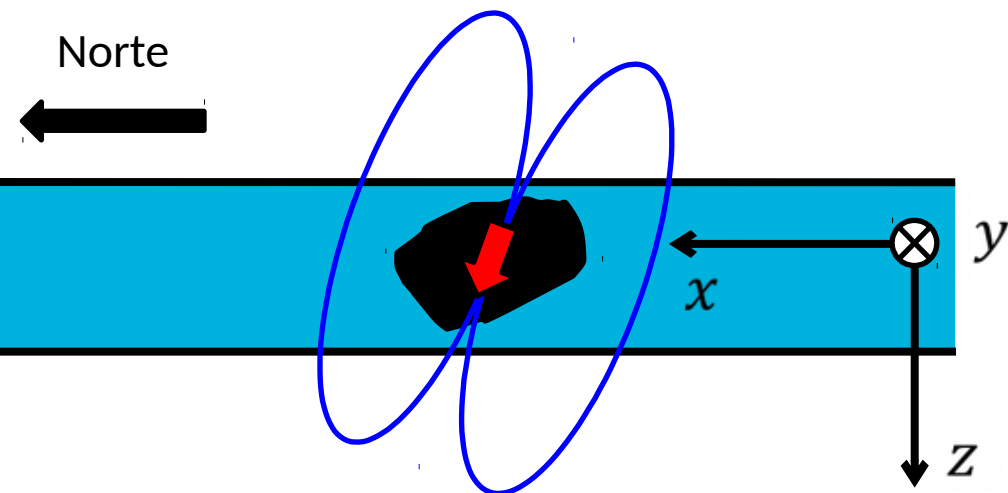
Amplitude  
(nT)



Posição



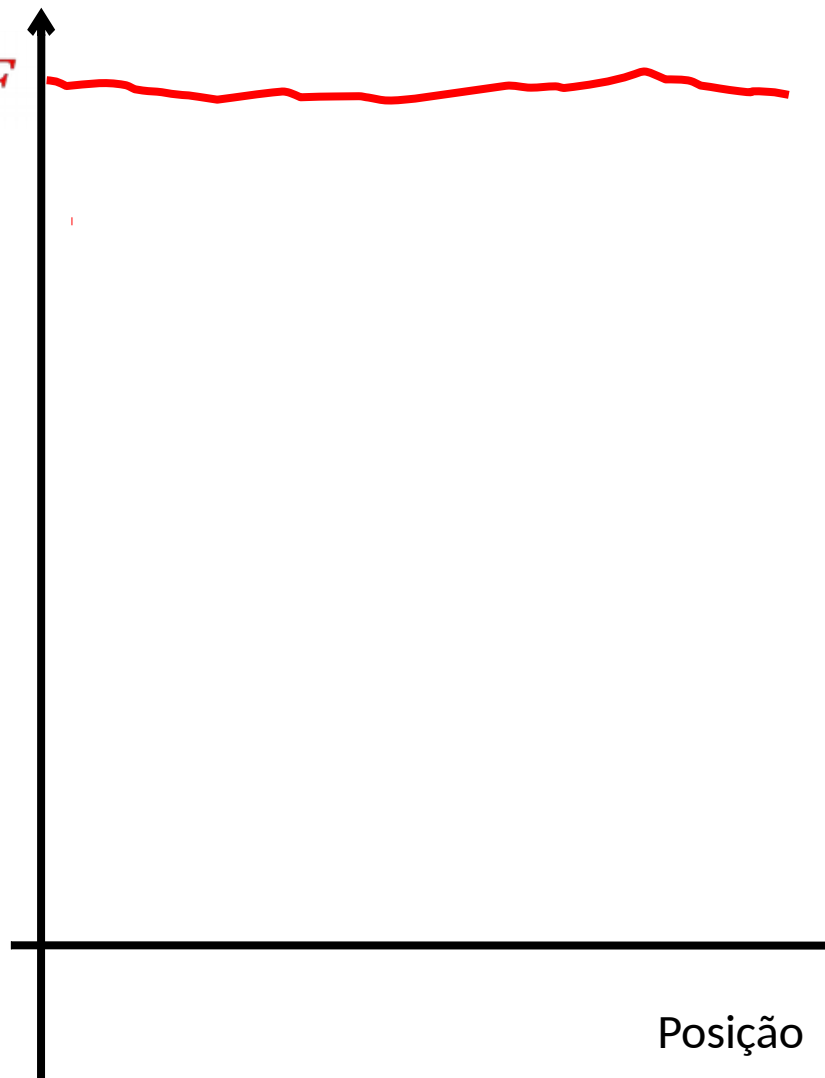
Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

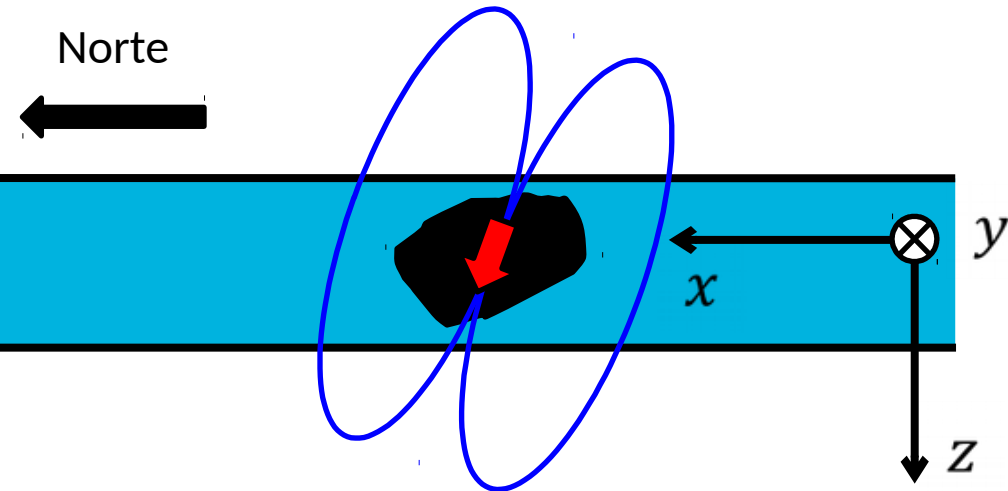
$F$



Posição



Campo cristal  
 $\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$

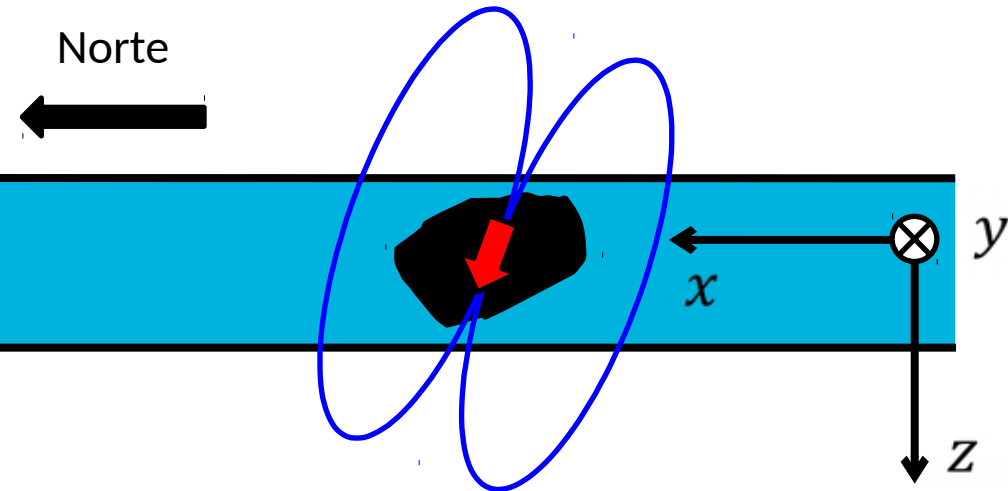
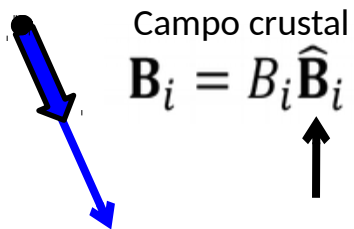


Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$

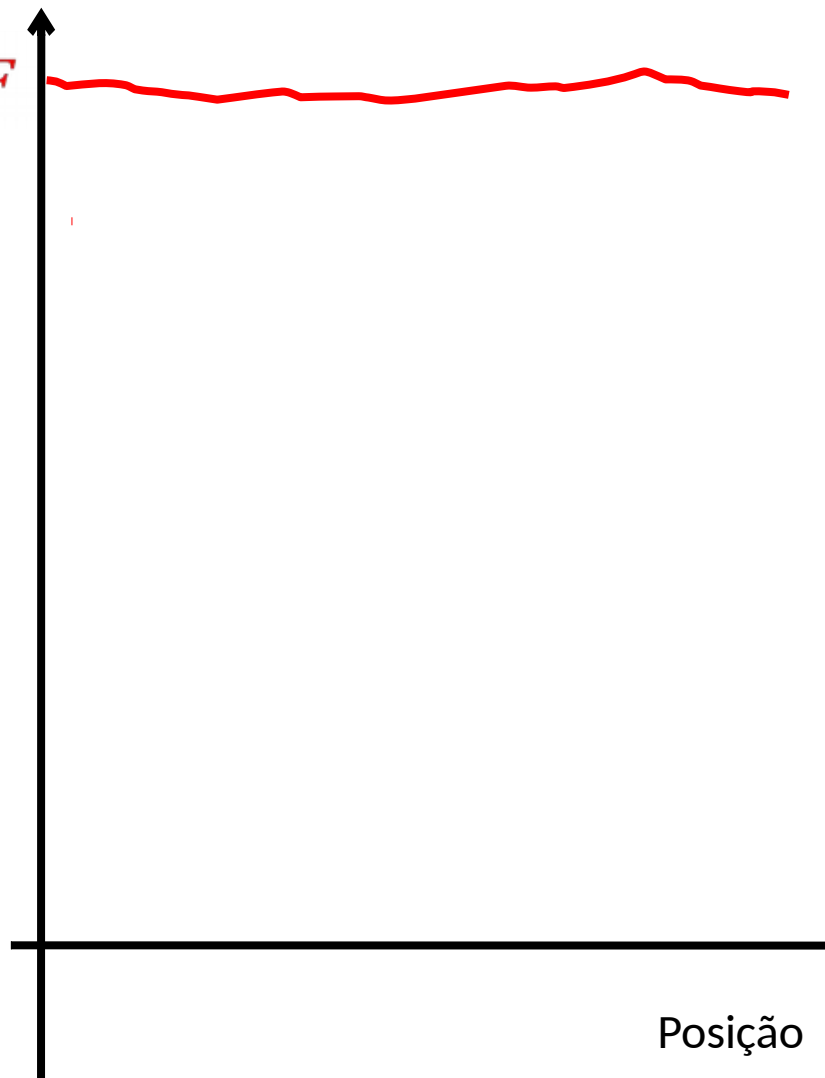
Posição



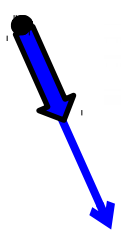
Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Posição



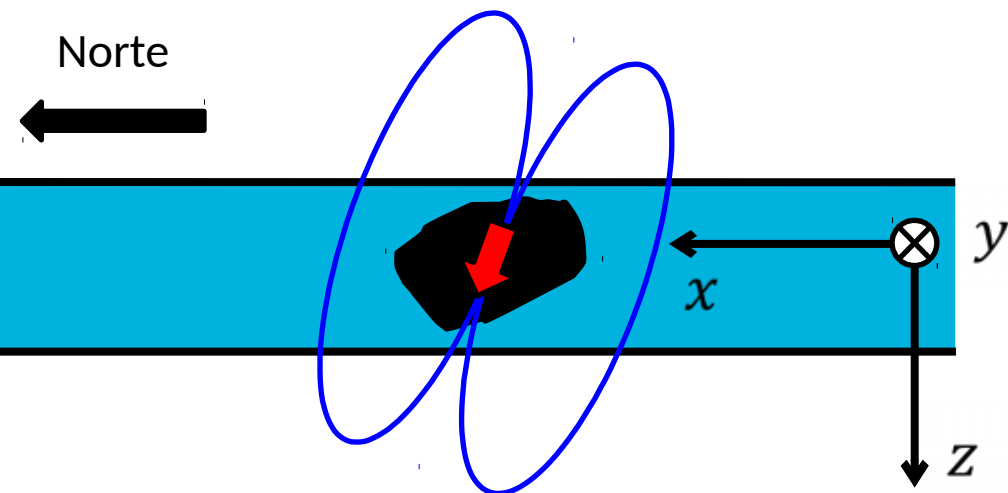
Campo cristal  
 $\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$

$$F_i \gg B_i$$

Amplitude  
(nT)

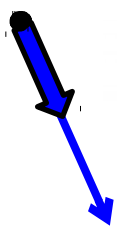
$F$

Norte



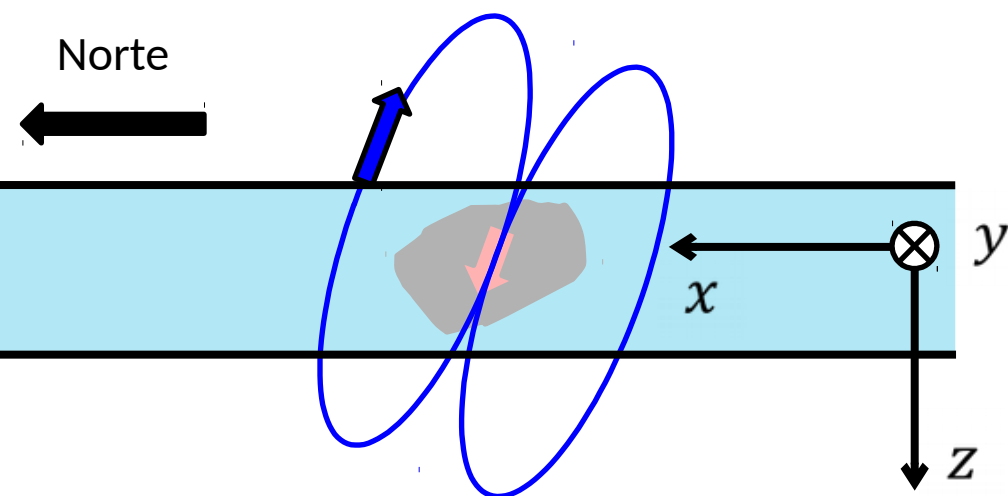
Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Posição



Campo cristal  
 $\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$

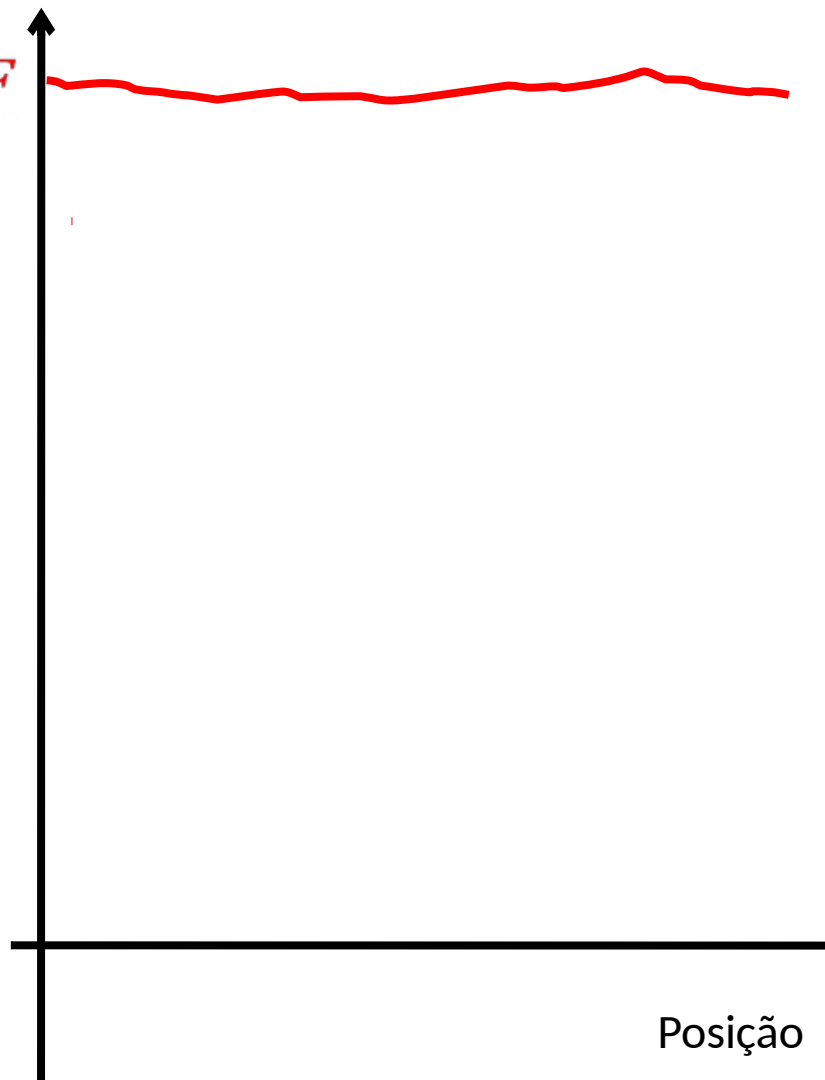
$$F_i \gg B_i$$



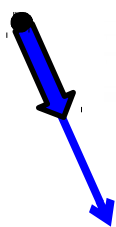
Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Posição



Campo cristal

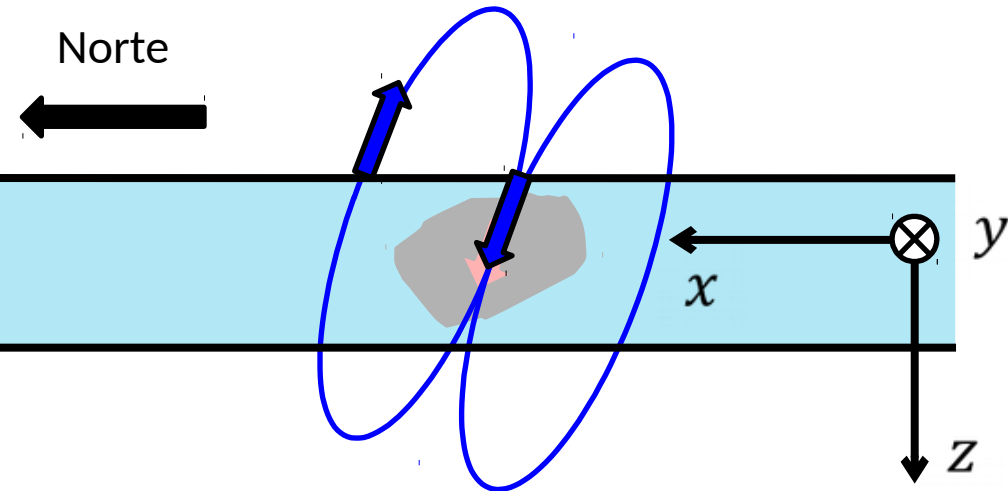
$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

Amplitude  
(nT)

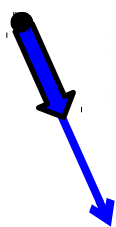
$F$

Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Posição



Campo crustal

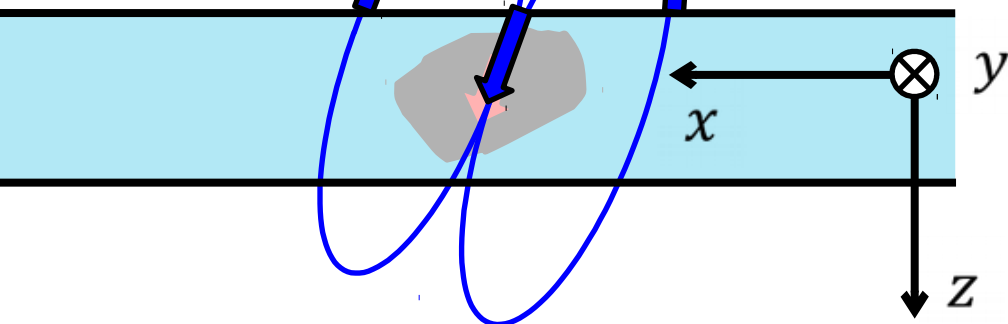
$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

Amplitude  
(nT)

$F$

Norte



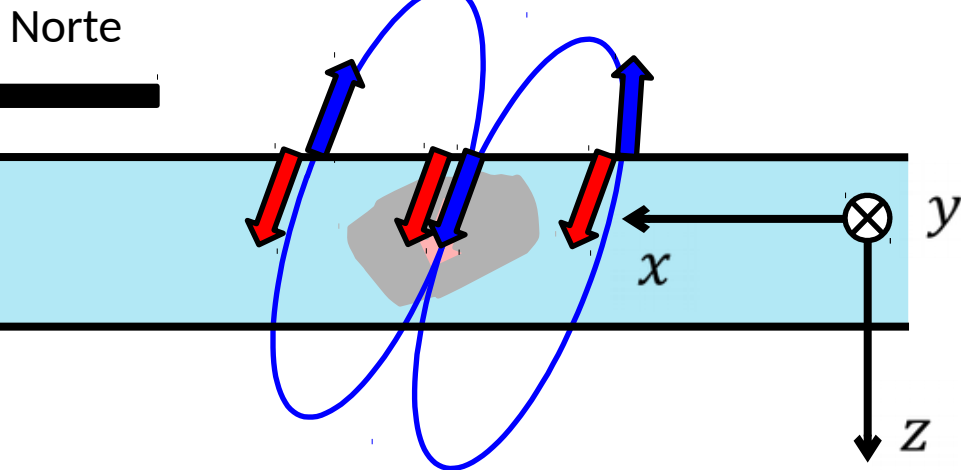
Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Posição

Campo crustal  
 $\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$

$$F_i \gg B_i$$

Campo principal  
 $\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$

Posição

Campo crustal

$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

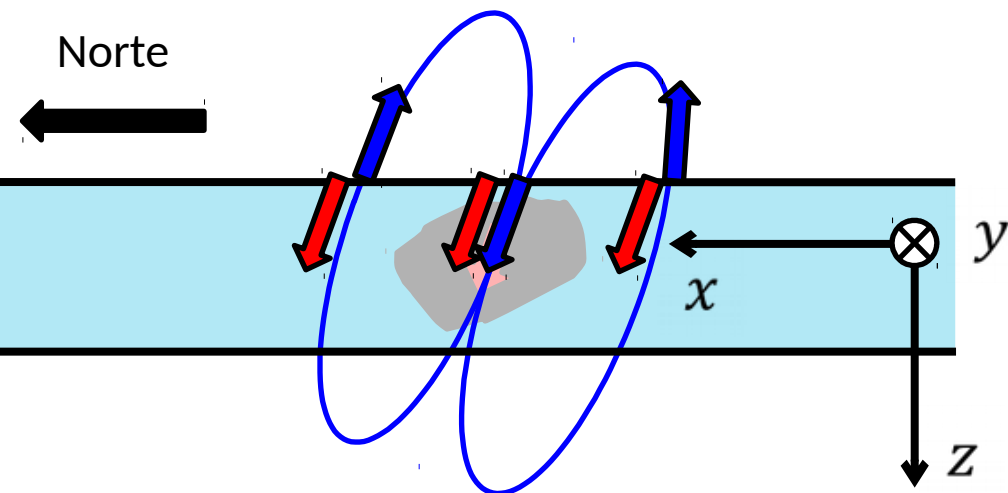
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

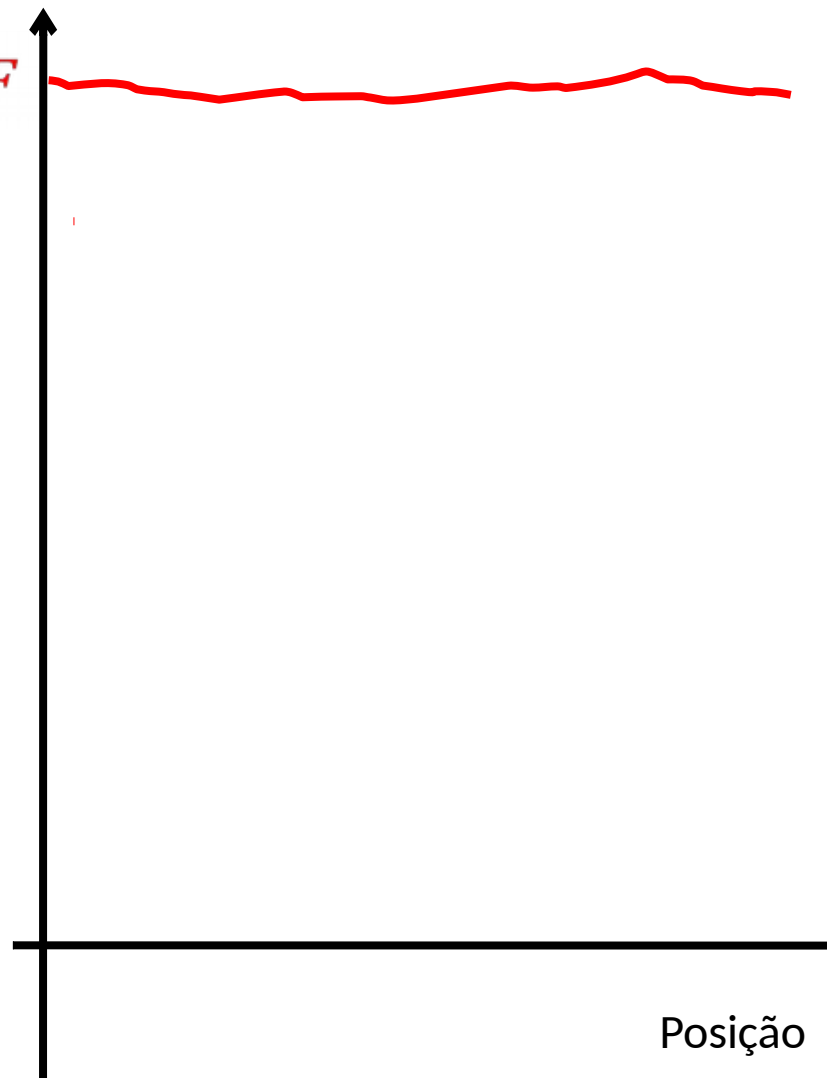
Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Posição



Campo crustal

$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

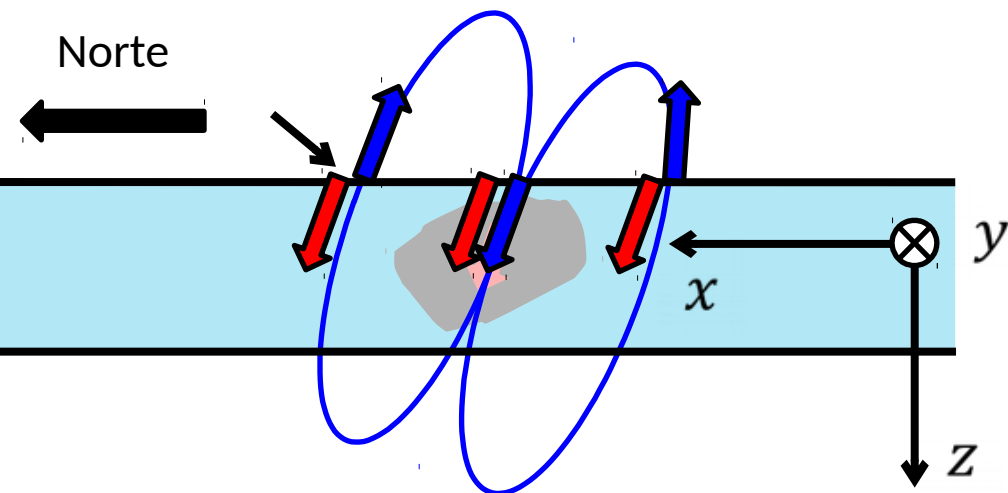
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

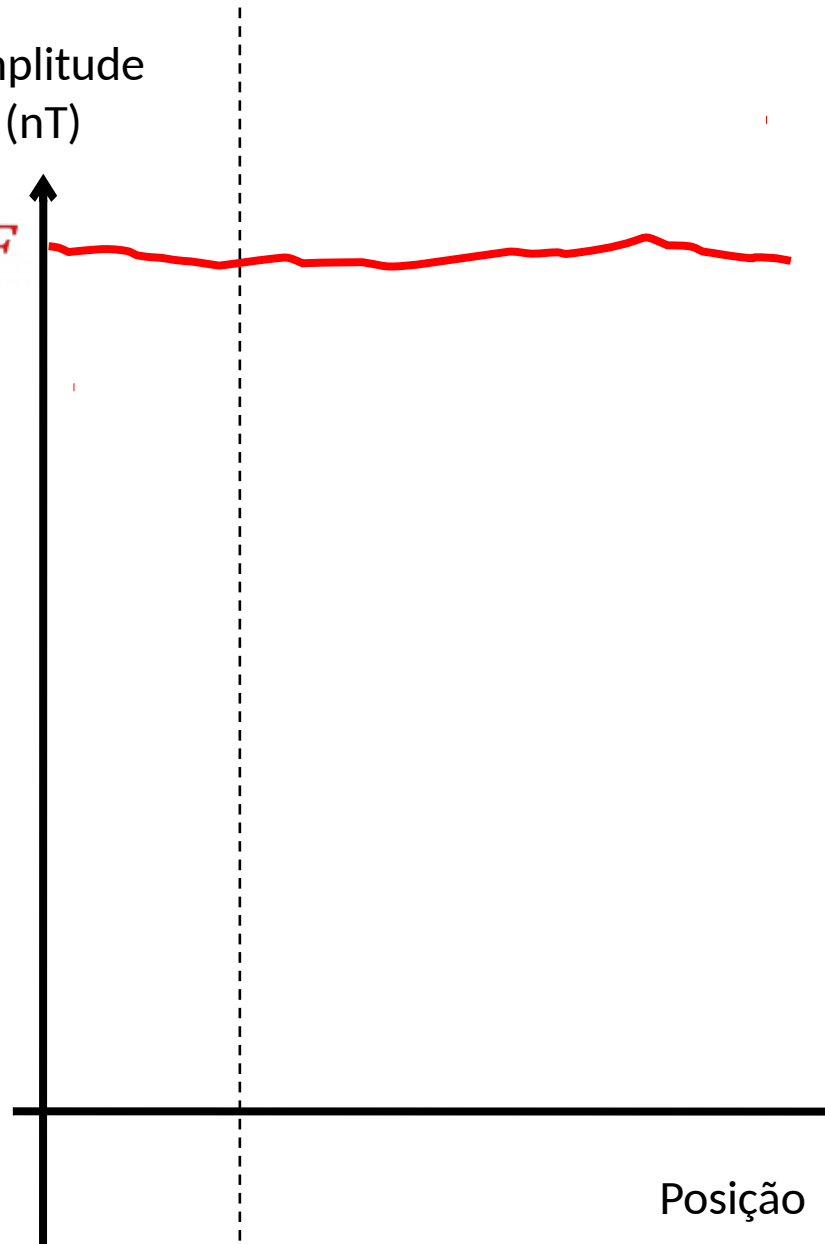
Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Posição

Campo crustal  
 $\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$

$$F_i \gg B_i$$

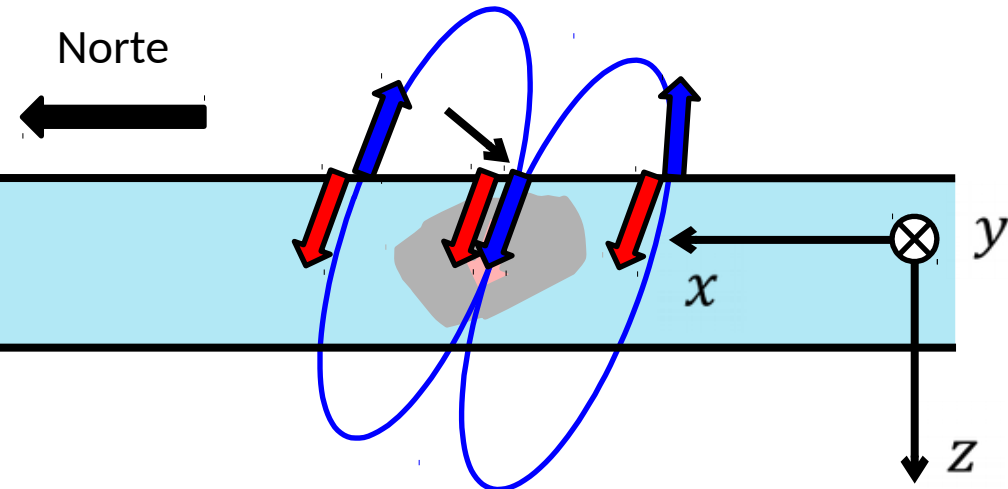
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

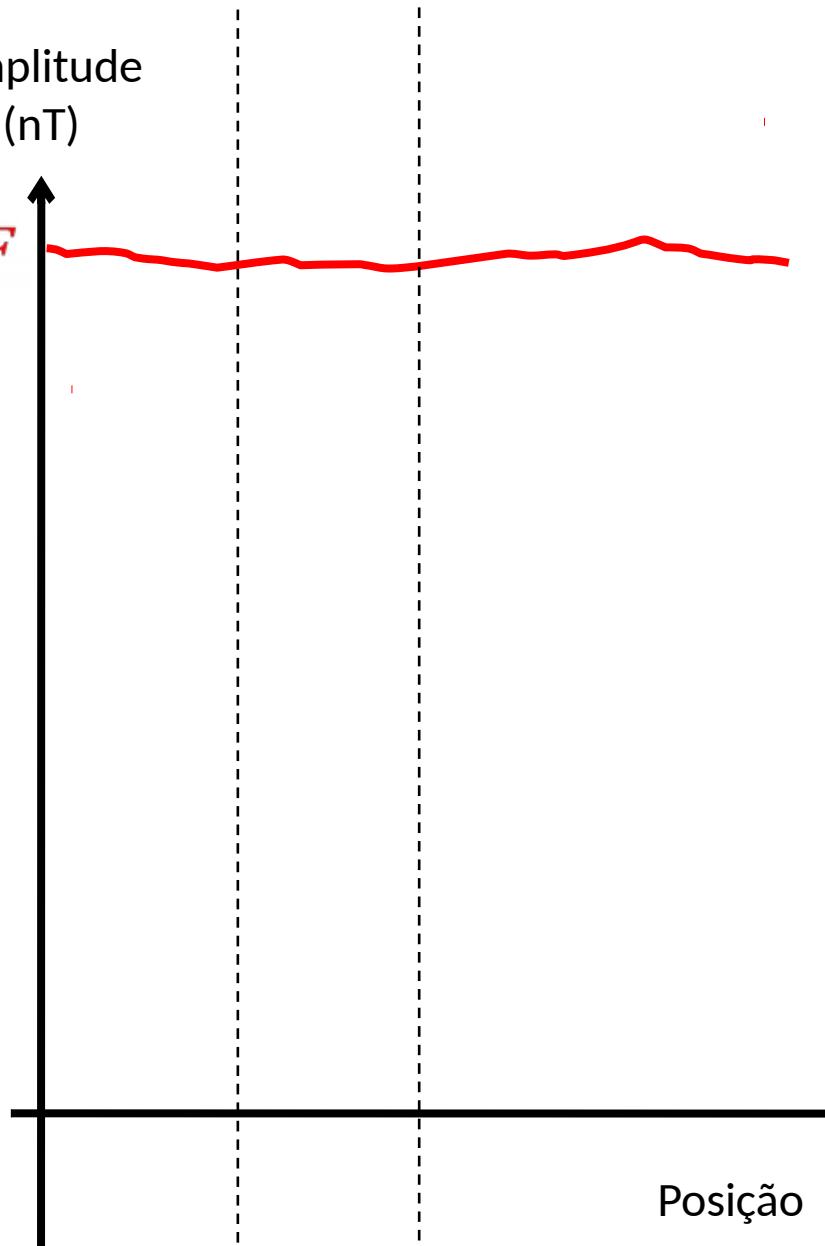
Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Campo crustal  
 $\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$

$$F_i \gg B_i$$

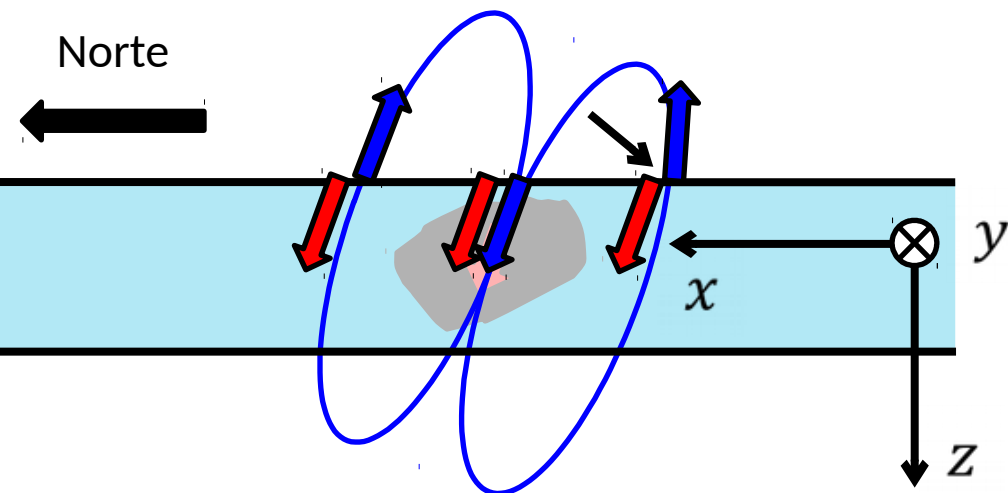
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

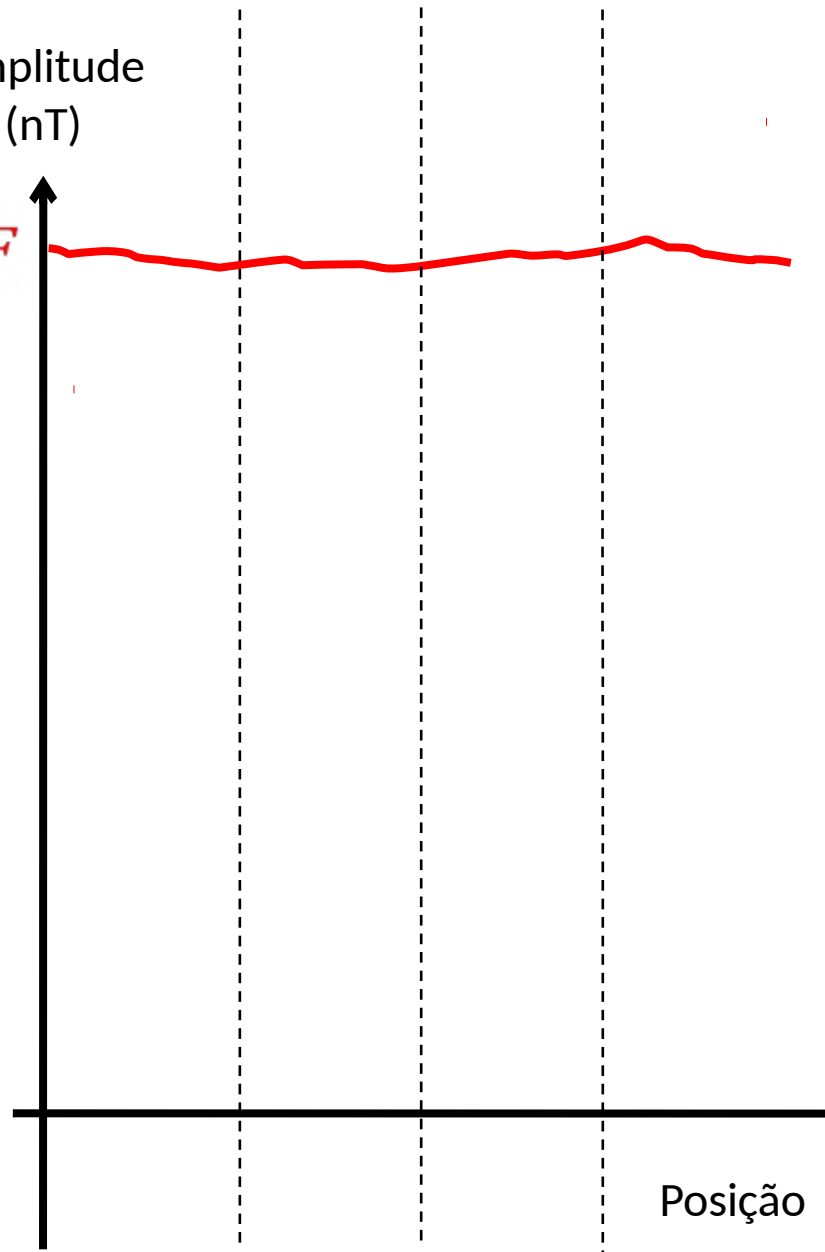
Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Campo crustal  
 $\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$

$$F_i \gg B_i$$

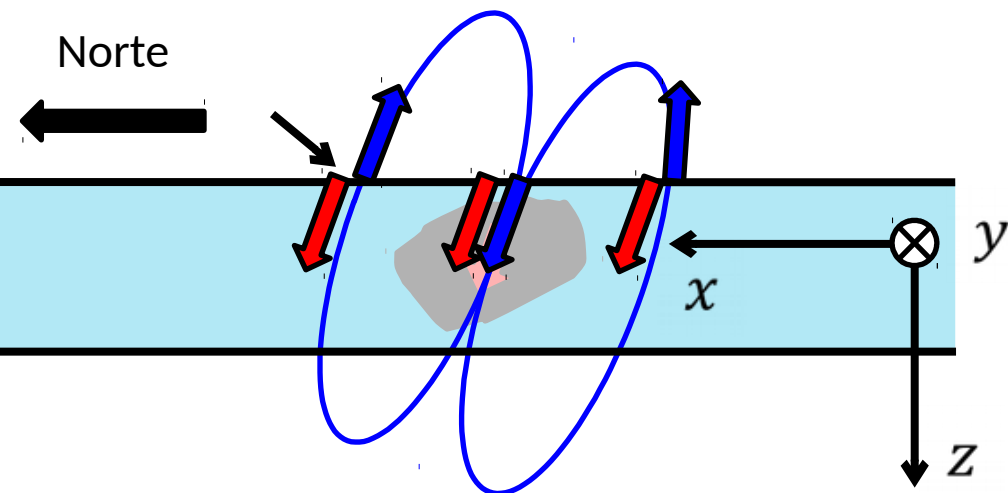
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

Norte



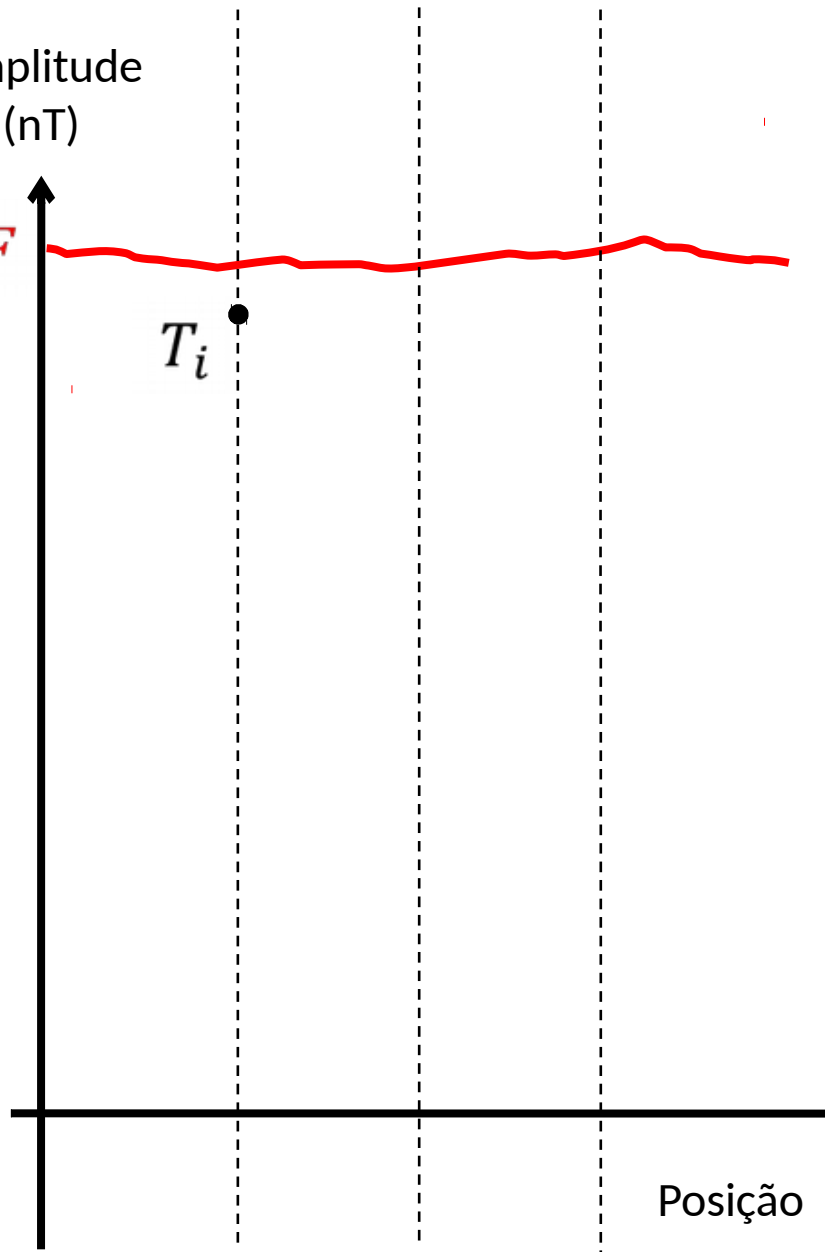
Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$

$T_i$

Posição



Campo crustal

$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

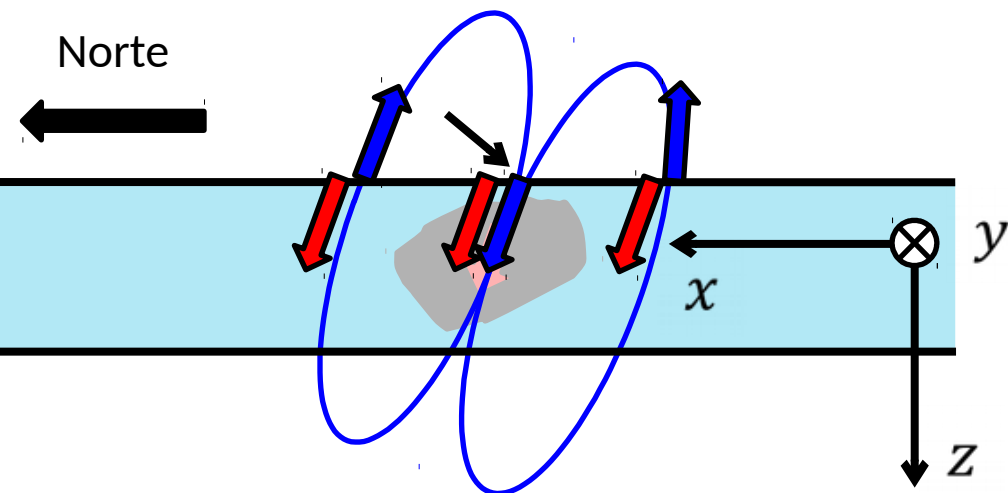
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

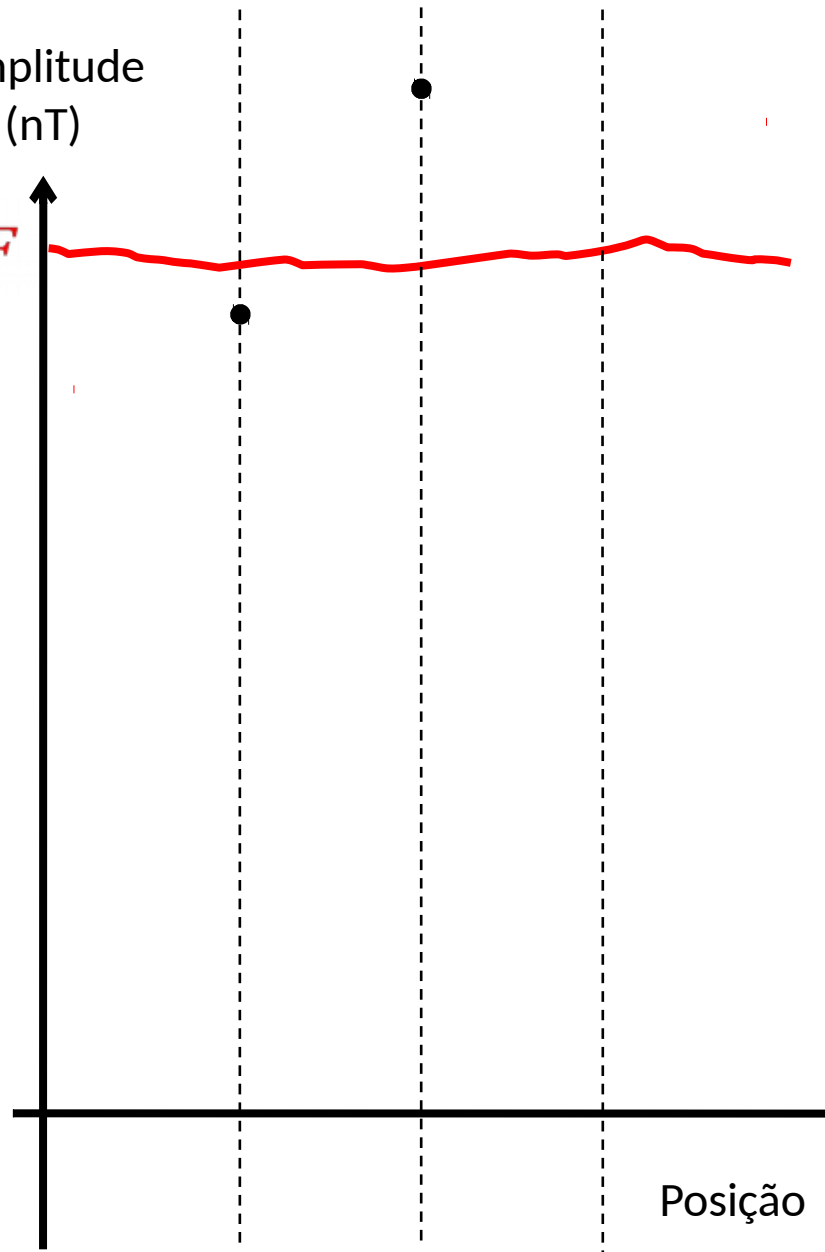
Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Campo crustal

$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

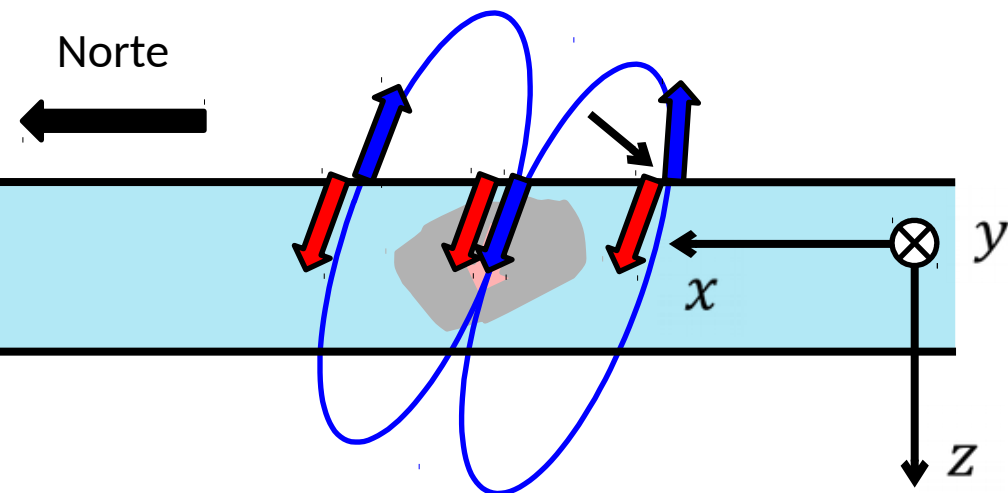
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

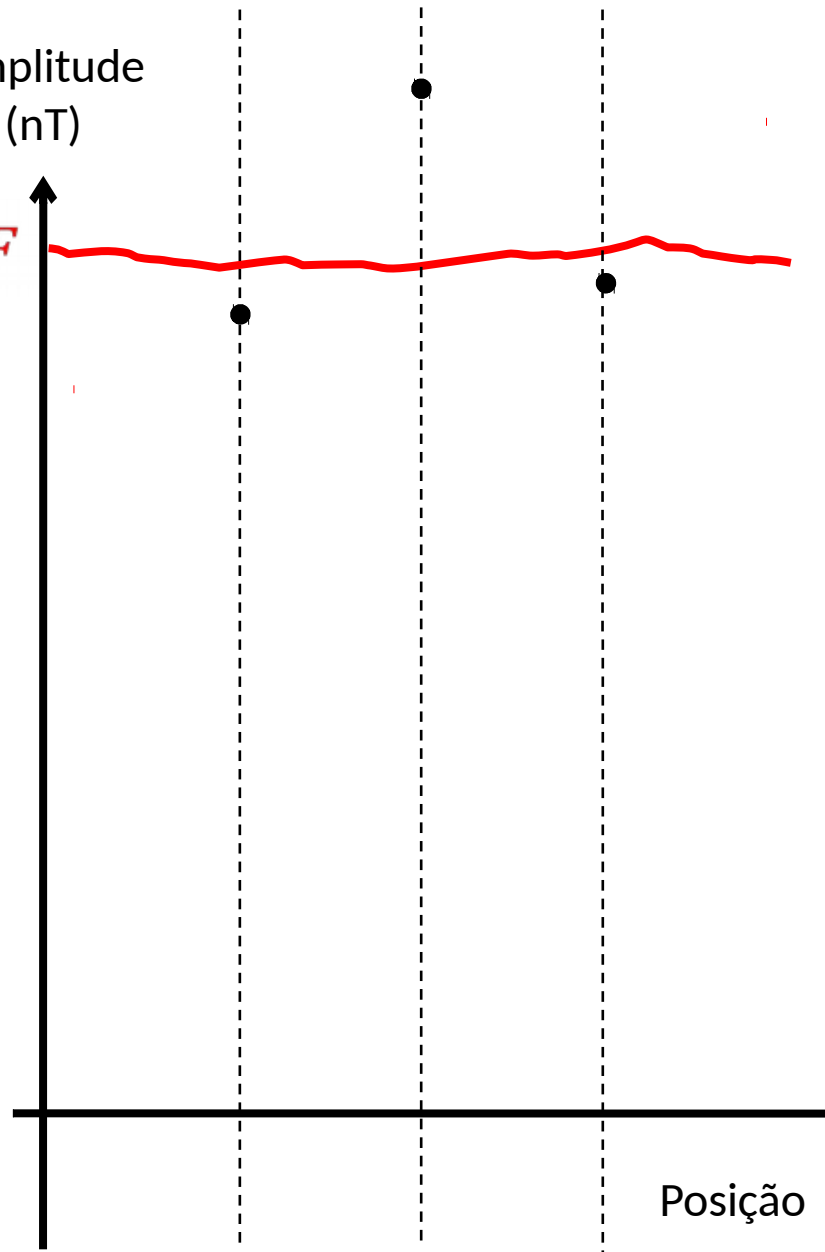
Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

$F$



Campo crustal

$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

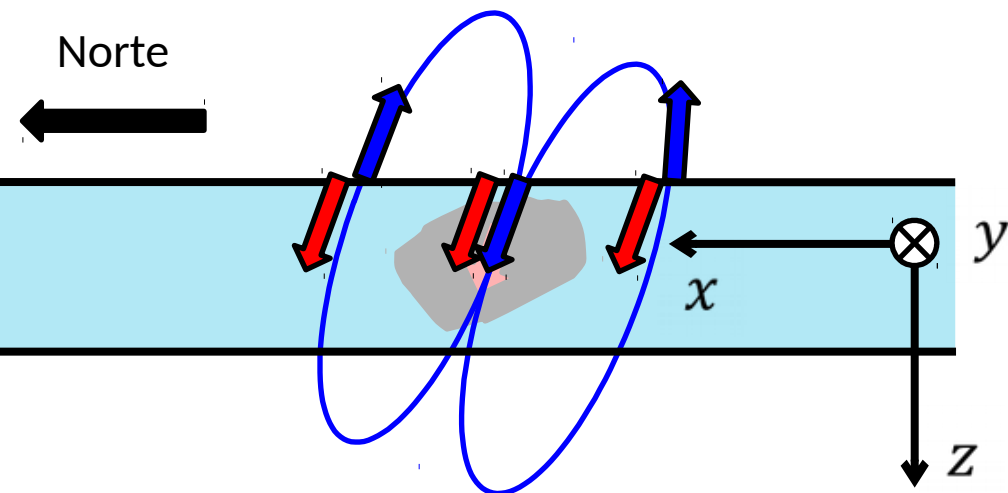
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

Norte



Considere que o  
corpo esteja  
magnetizado na  
mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}$

Amplitude  
(nT)

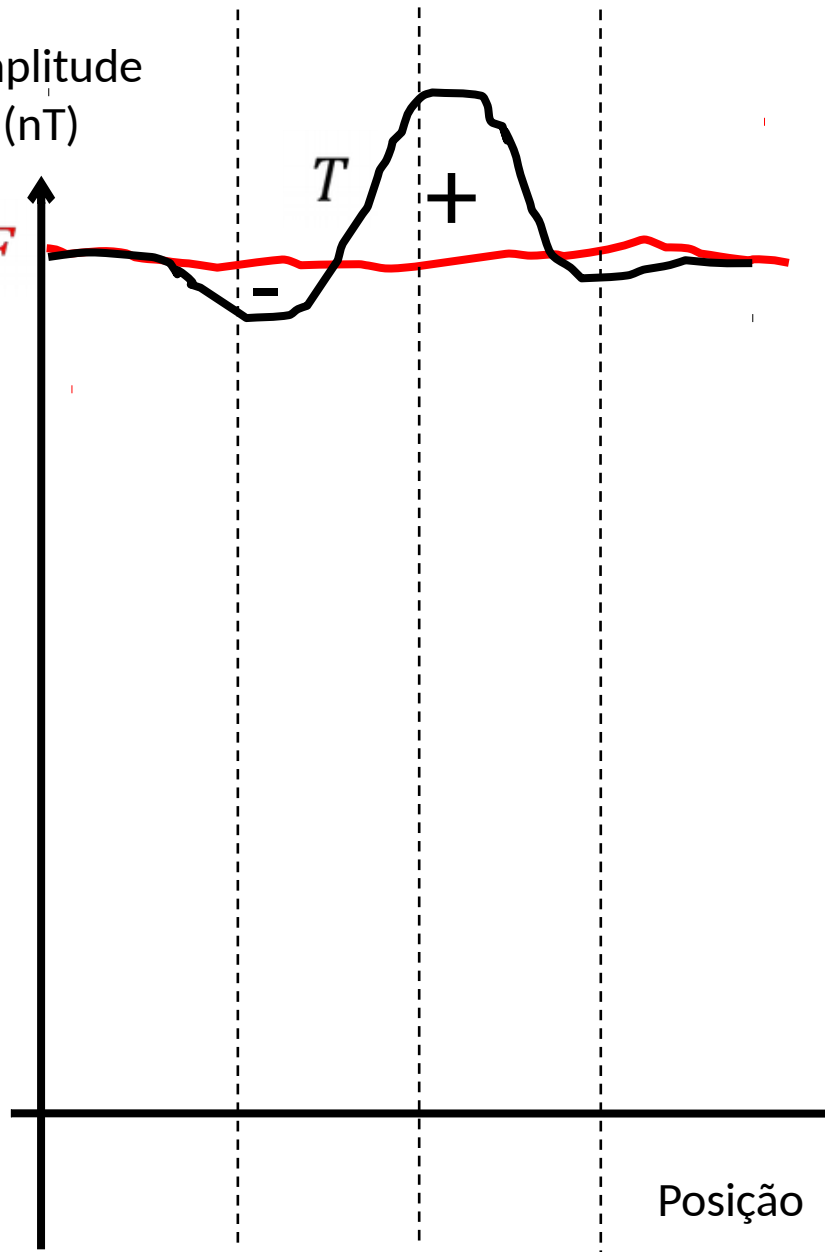
*F*

*T*

+

-

Posição



Campo crustal

$$\mathbf{B}_i = B_i \hat{\mathbf{B}}_i$$

$$F_i \gg B_i$$

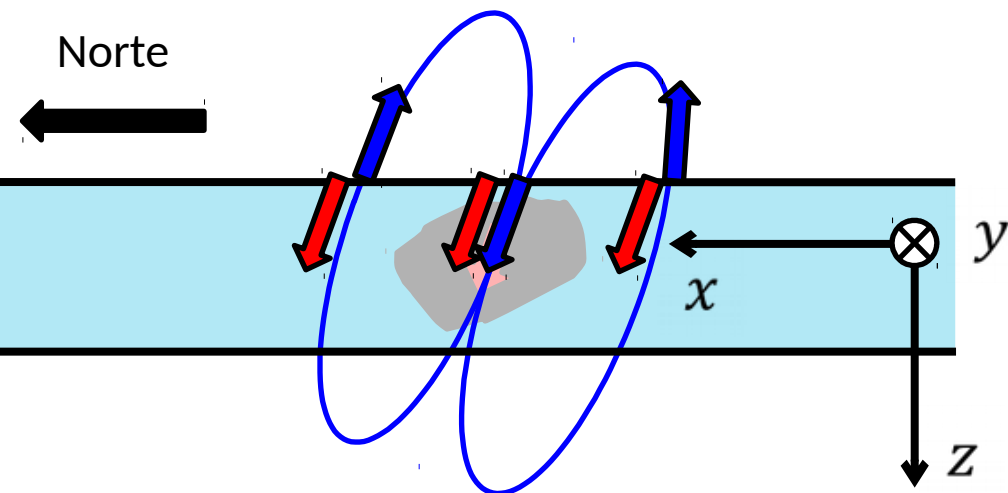
Campo principal

$$\mathbf{F}_i = F_i \hat{\mathbf{F}}_i$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

Norte



$$\Delta T_i = T_i - F_i$$

Anomalia de campo total

Diferença entre a  
amplitude do campo  
total e a amplitude  
do campo principal  
no mesmo ponto

Amplitude  
(nT)

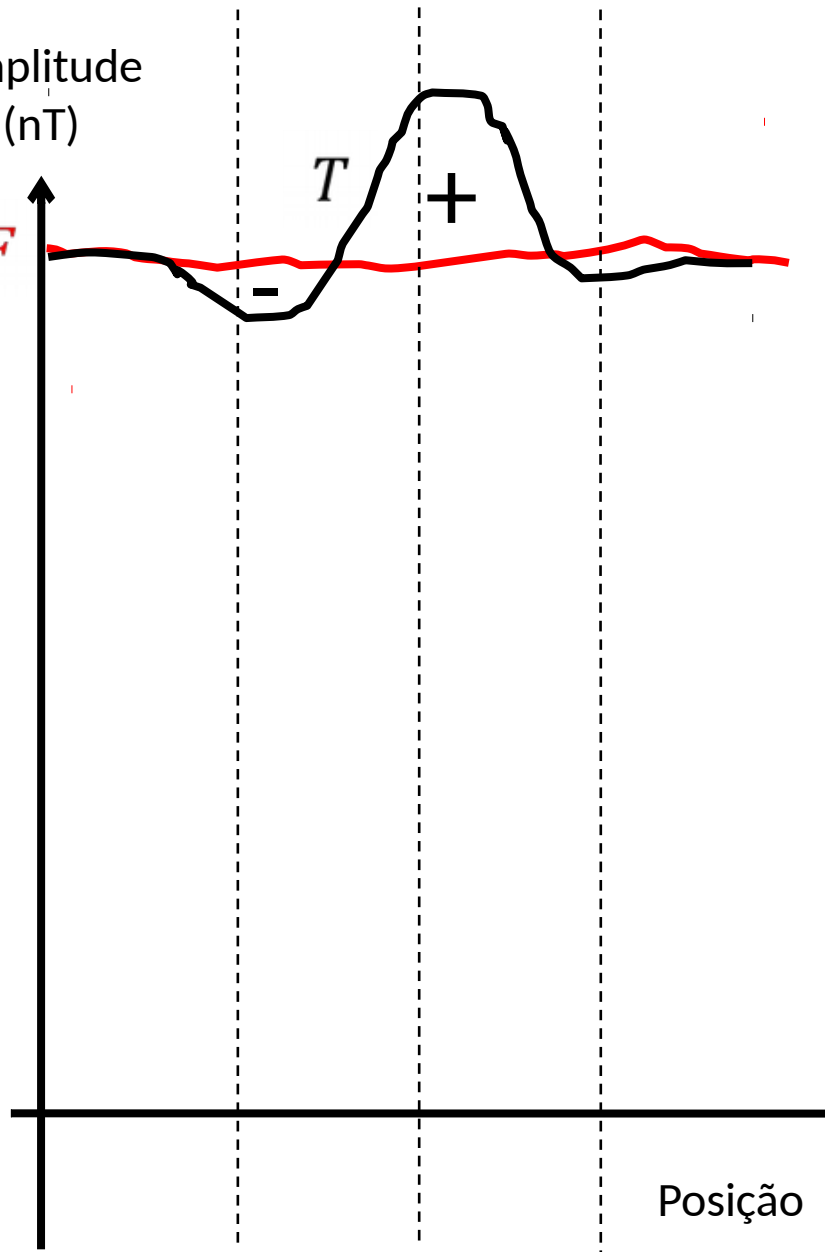
*F*

*T*

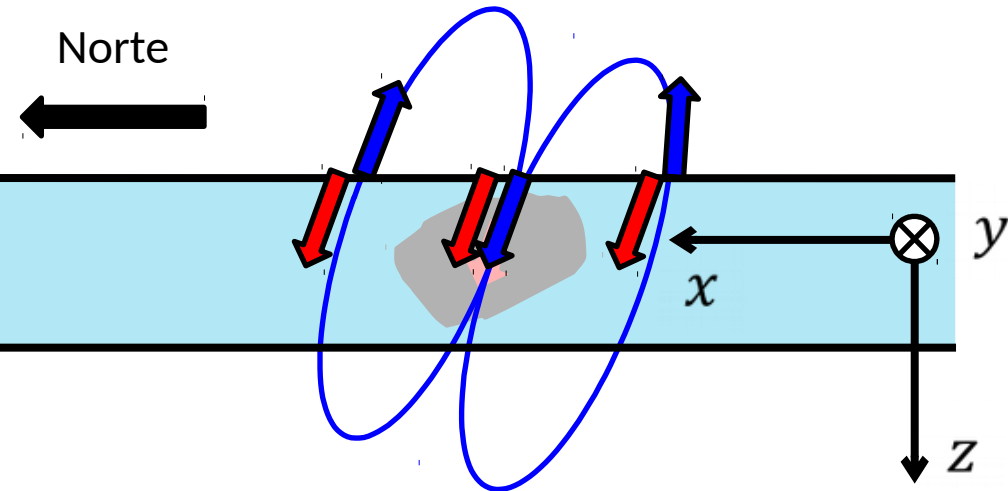
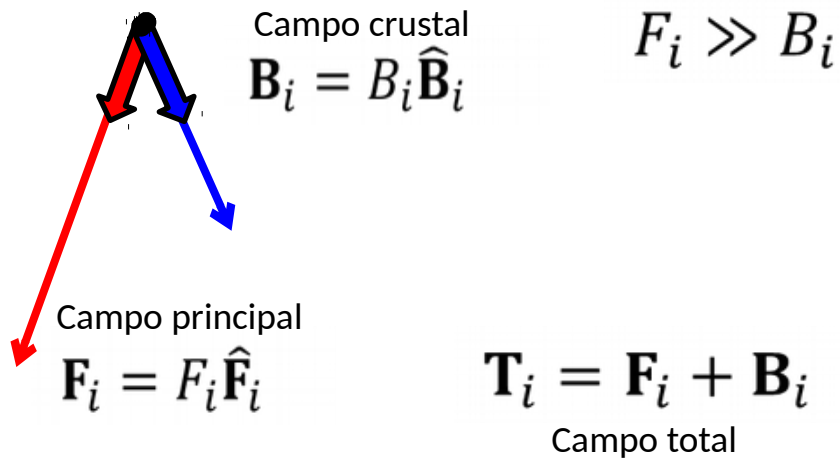
+

-

Posição



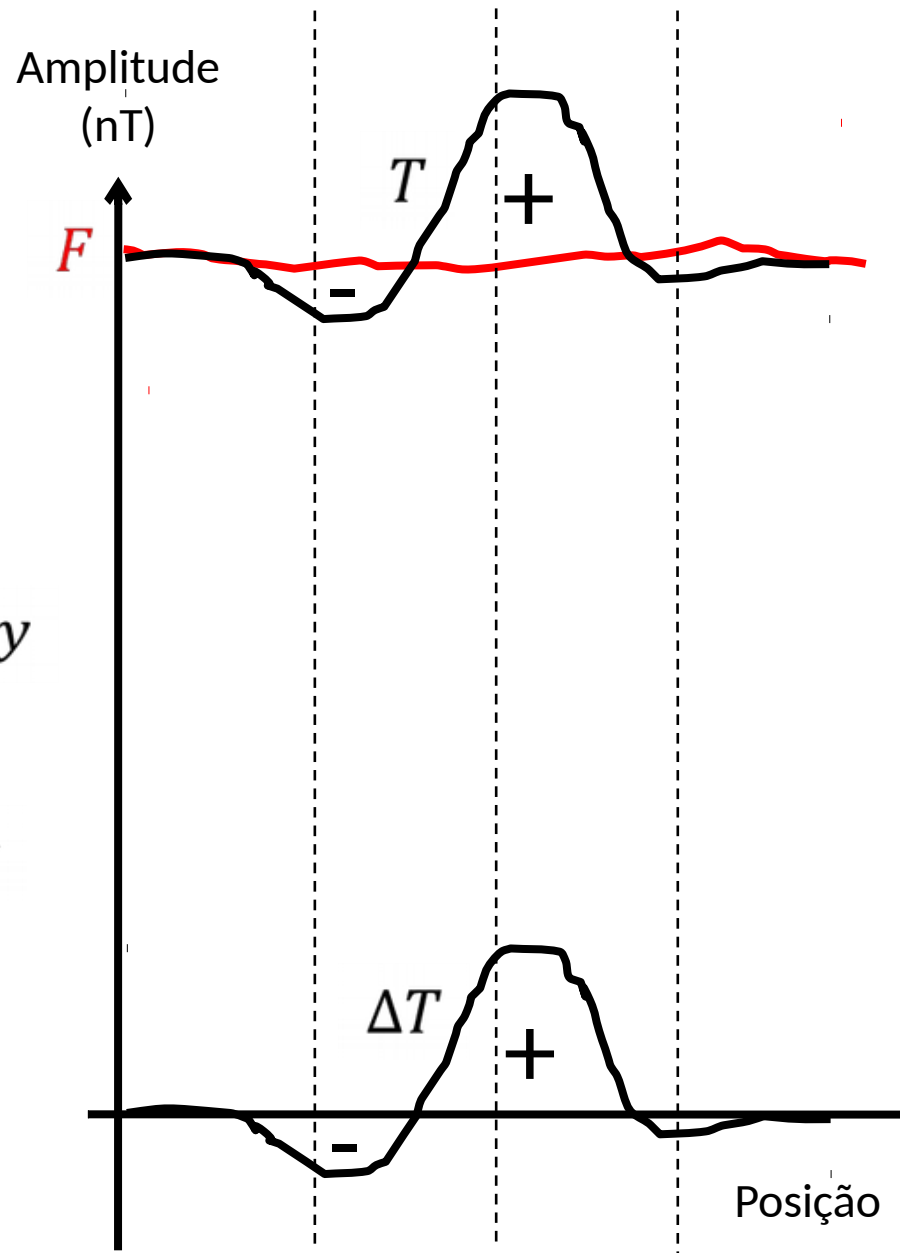


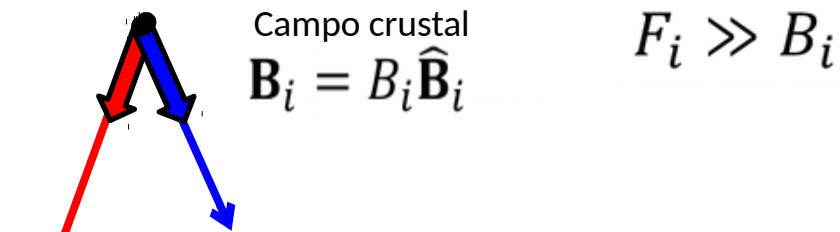


$$\Delta T_i = T_i - F_i$$

Anomalia de campo total

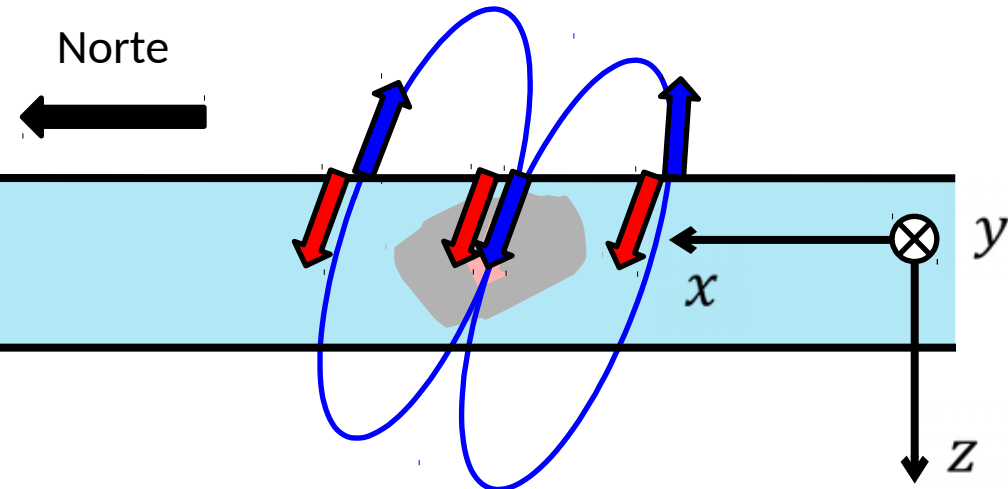
Diferença entre a  
 amplitude do campo  
 total e a amplitude  
 do campo principal  
 no mesmo ponto





$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

Campo total

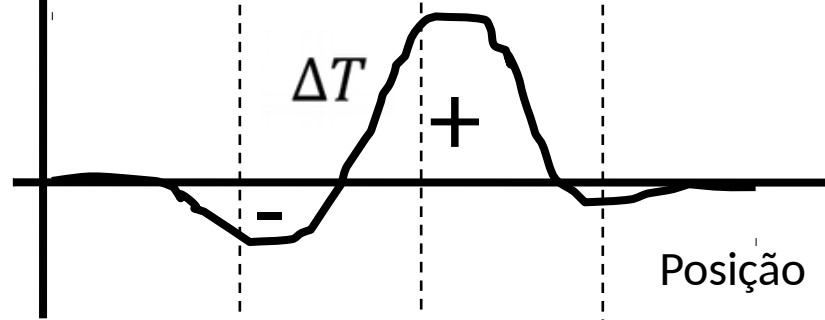
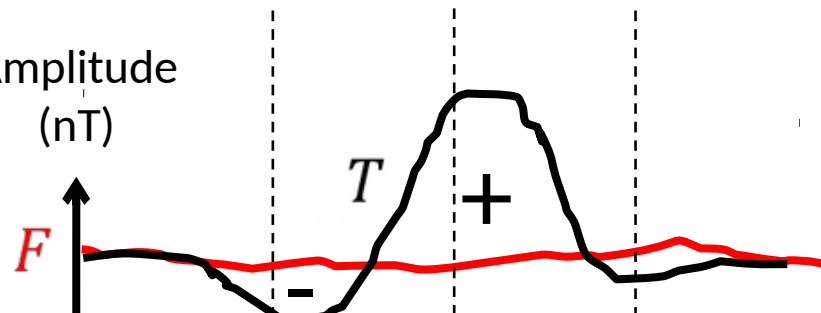


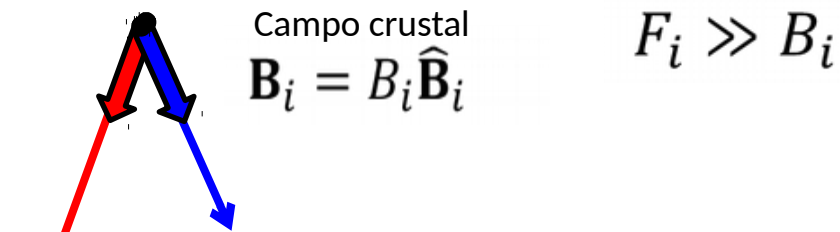
$$\Delta T_i = T_i - F_i$$

Anomalia de campo total

Observe que esta  
 representação  
 esquemática foi feita  
 considerando que o  
 corpo está magnetizado  
 na mesma direção de  $\hat{\mathbf{F}}_i$

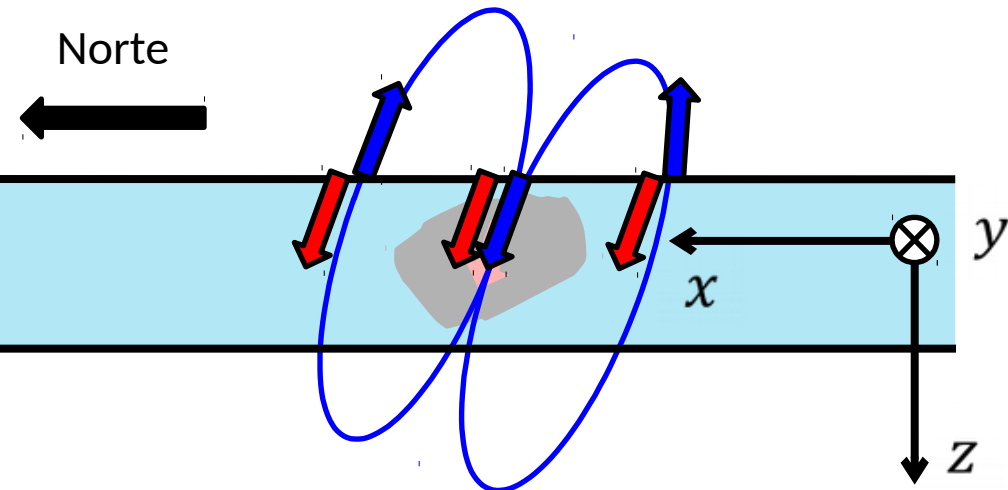
Amplitude  
 (nT)





$$\mathbf{T}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{B}_i$$

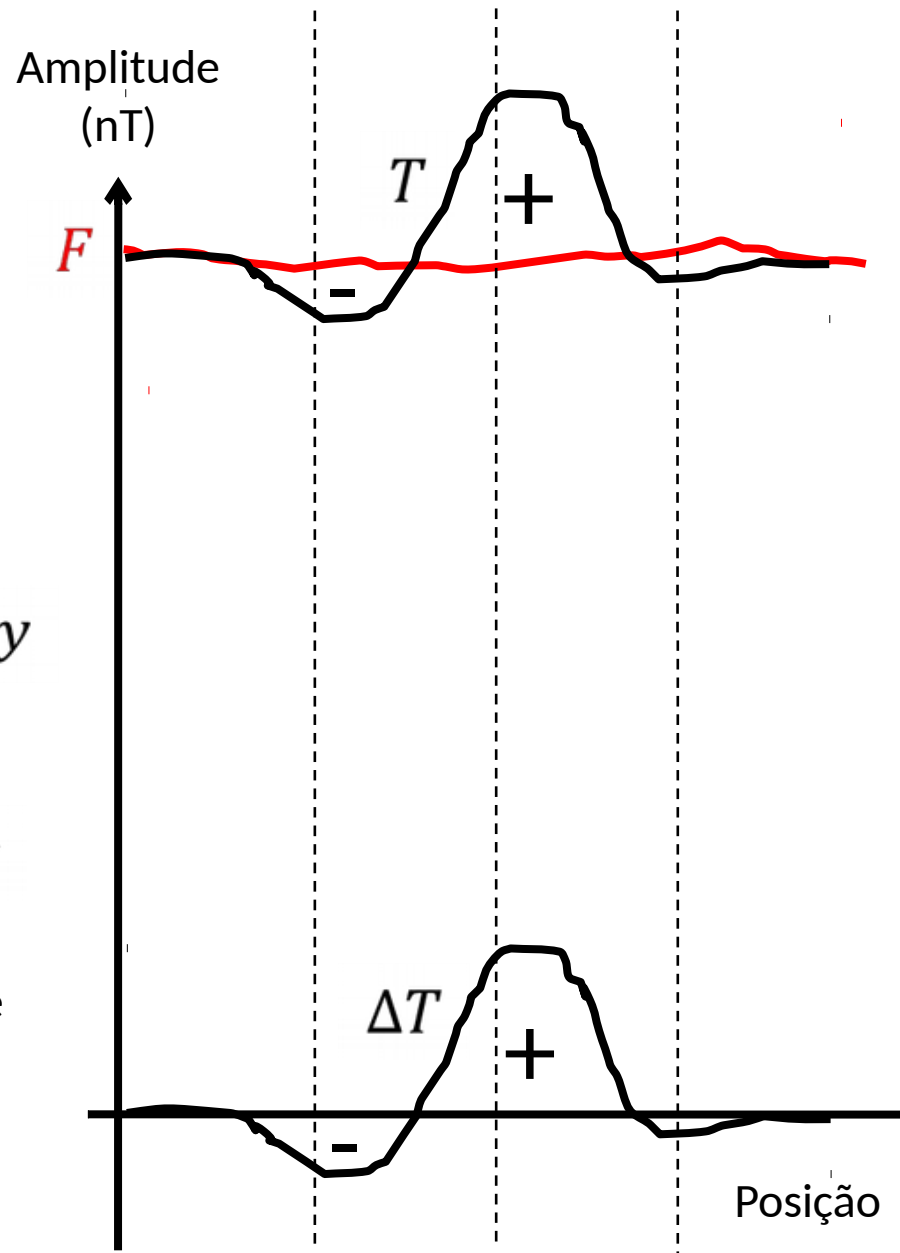
Campo total

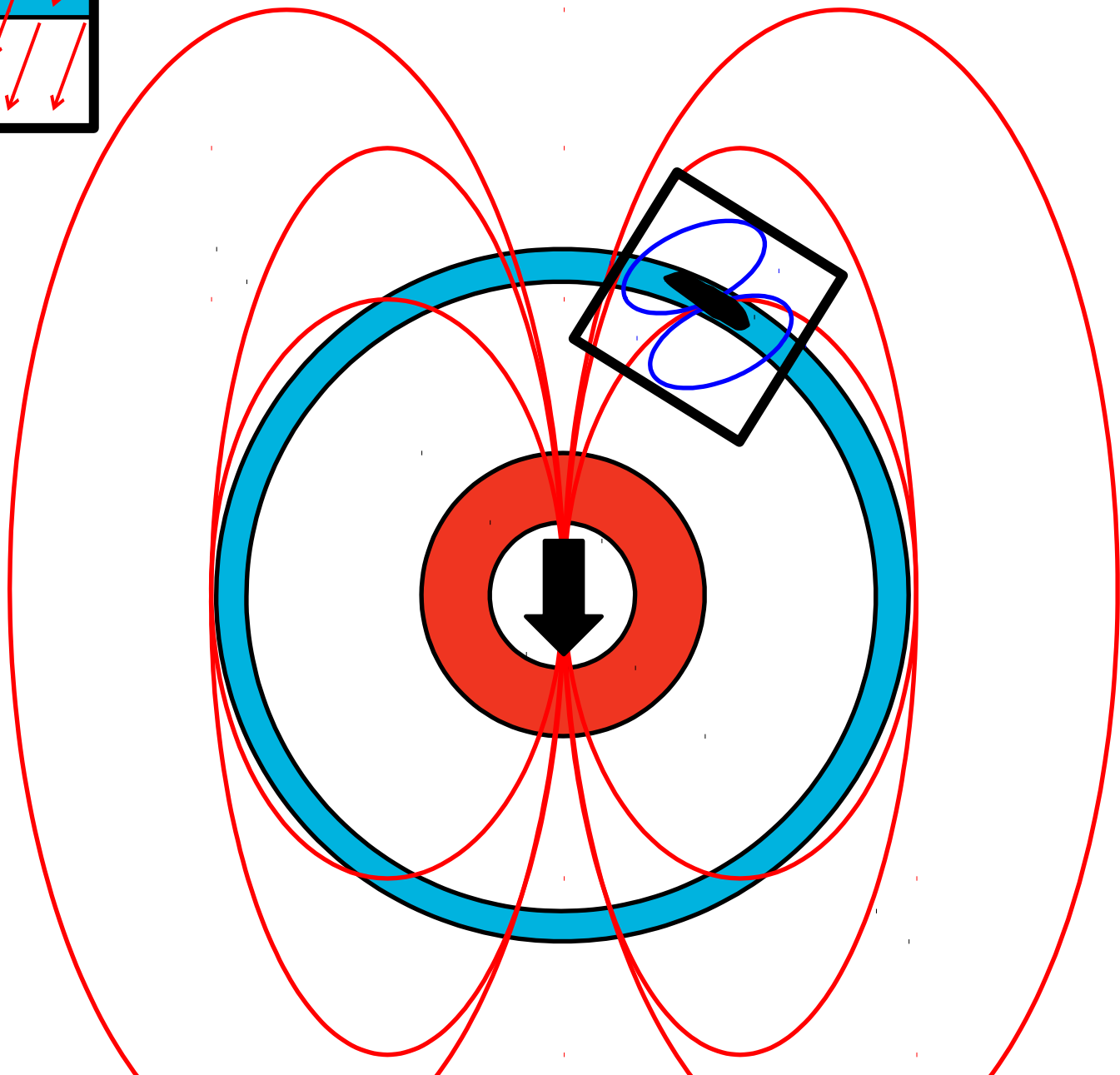
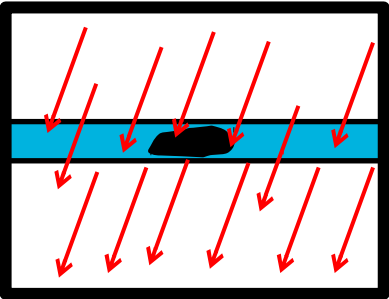


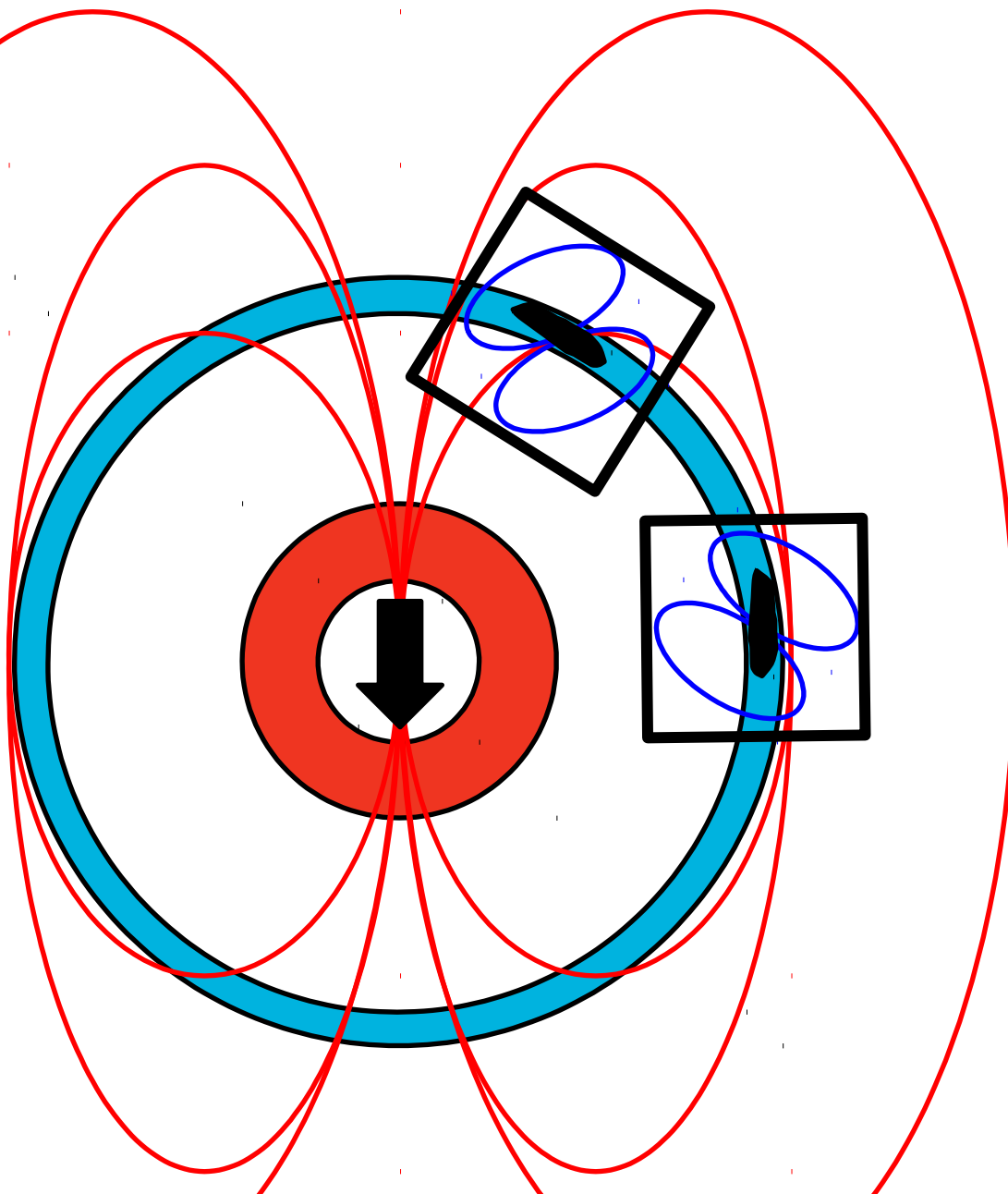
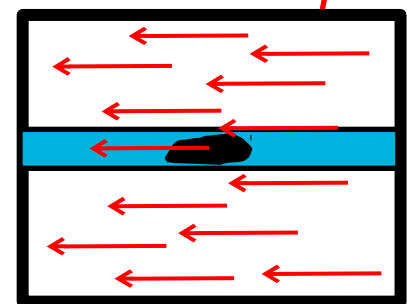
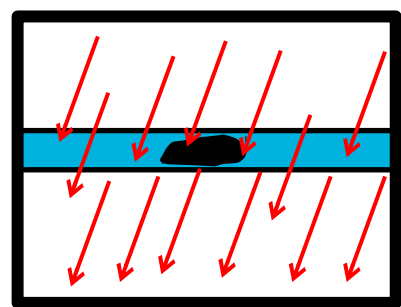
$$\Delta T_i = T_i - F_i$$

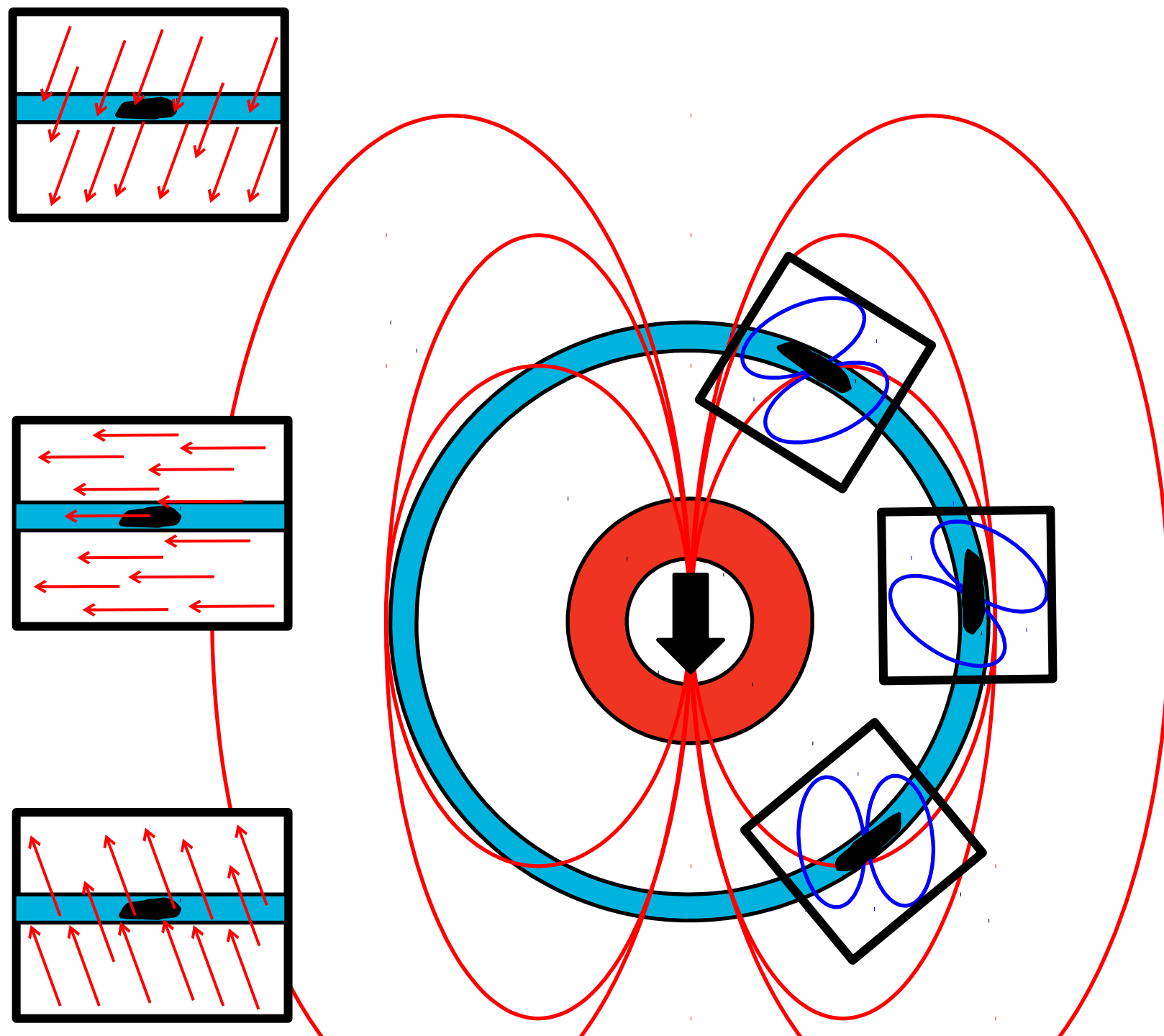
Anomalia de campo total

Além disso, é importante lembrar que este exemplo representa um corpo localizado no hemisfério norte

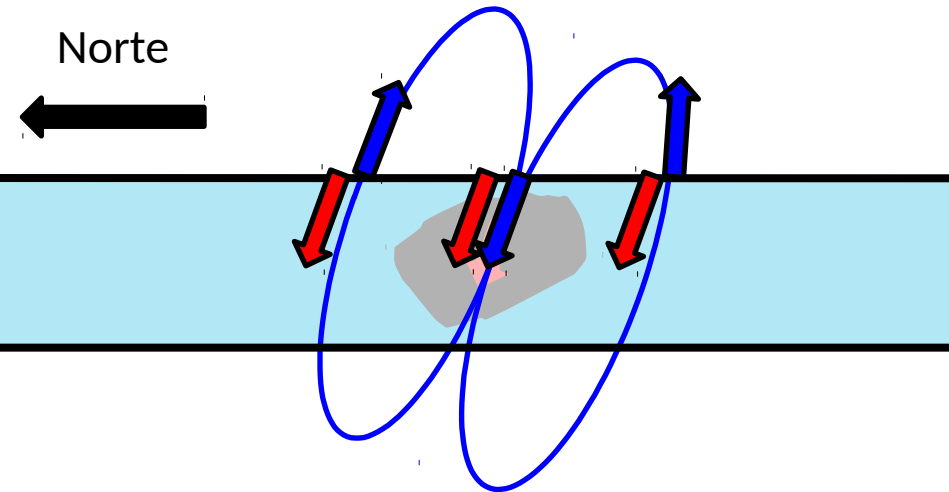
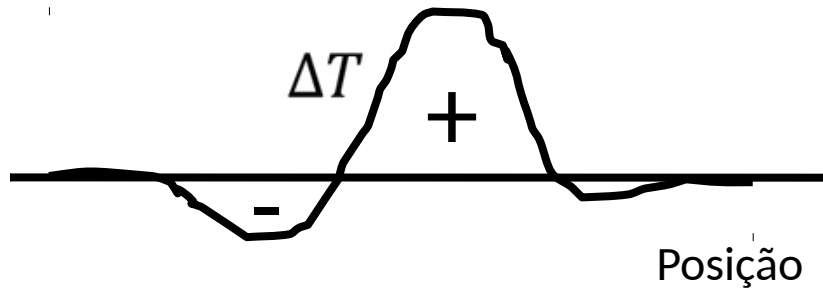




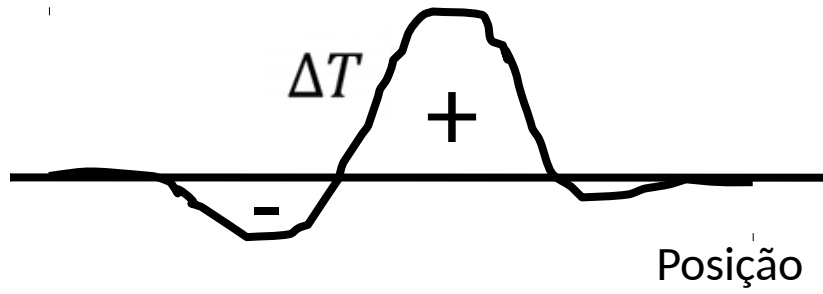




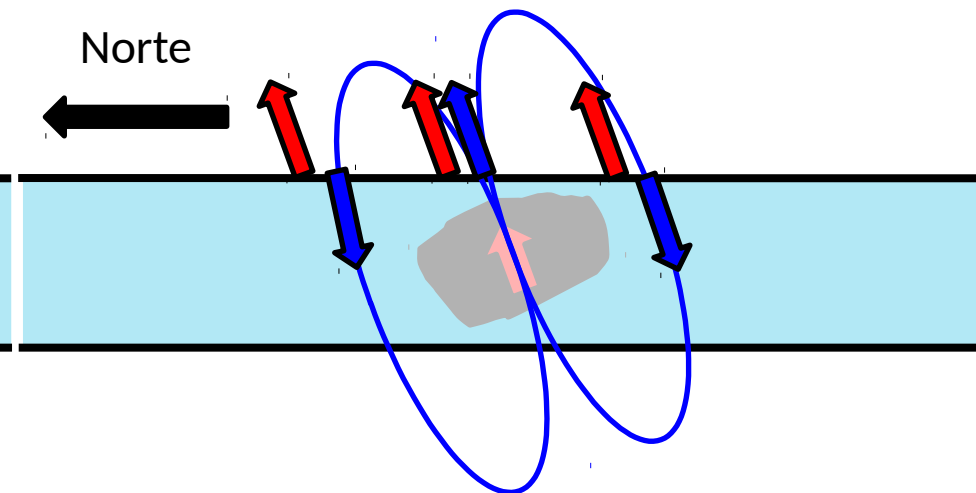
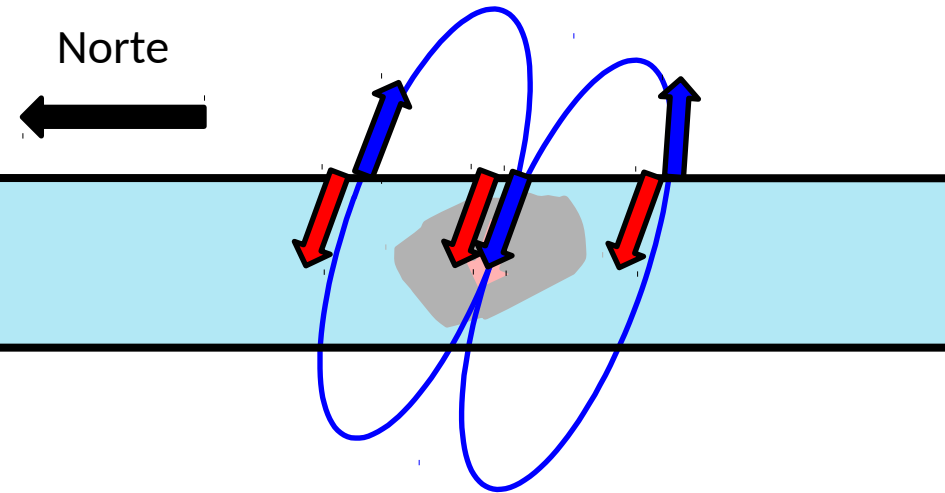
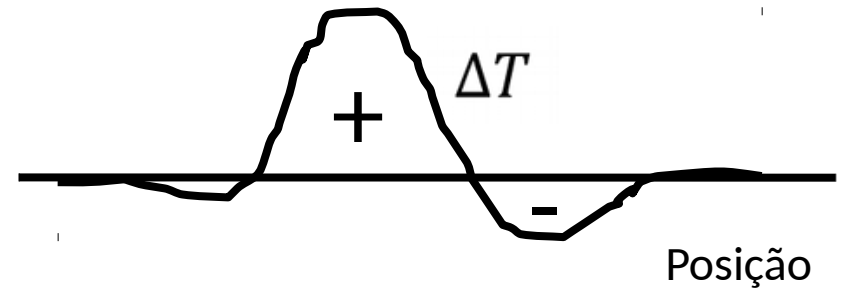
Hemisfério norte



Hemisfério norte

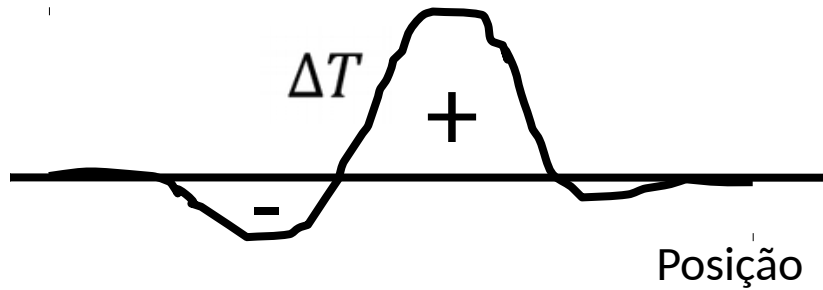


Hemisfério sul

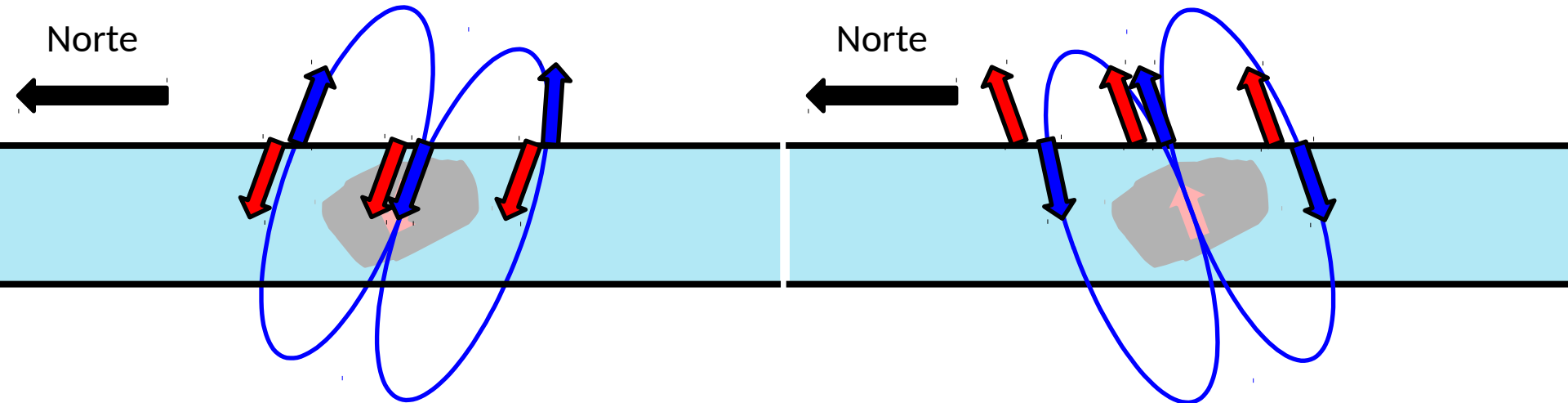
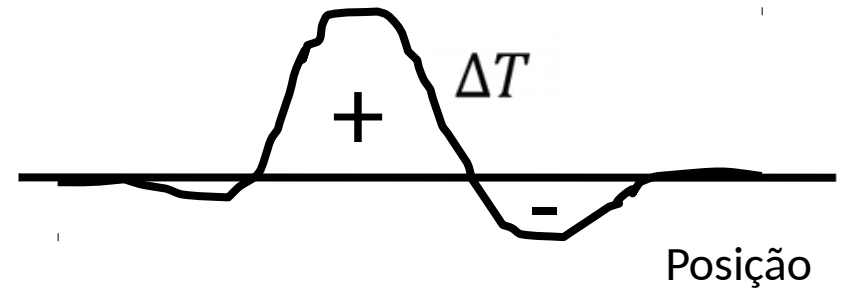




Hemisfério norte

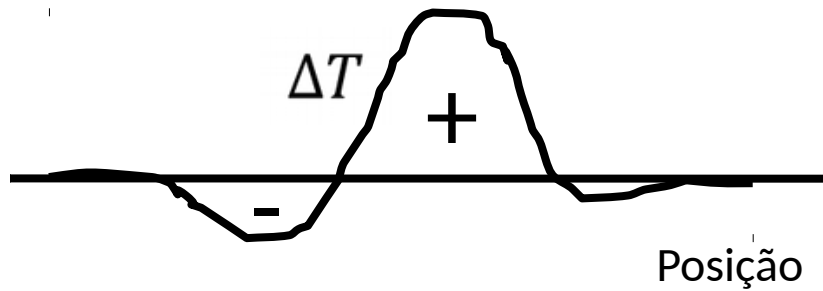


Hemisfério sul

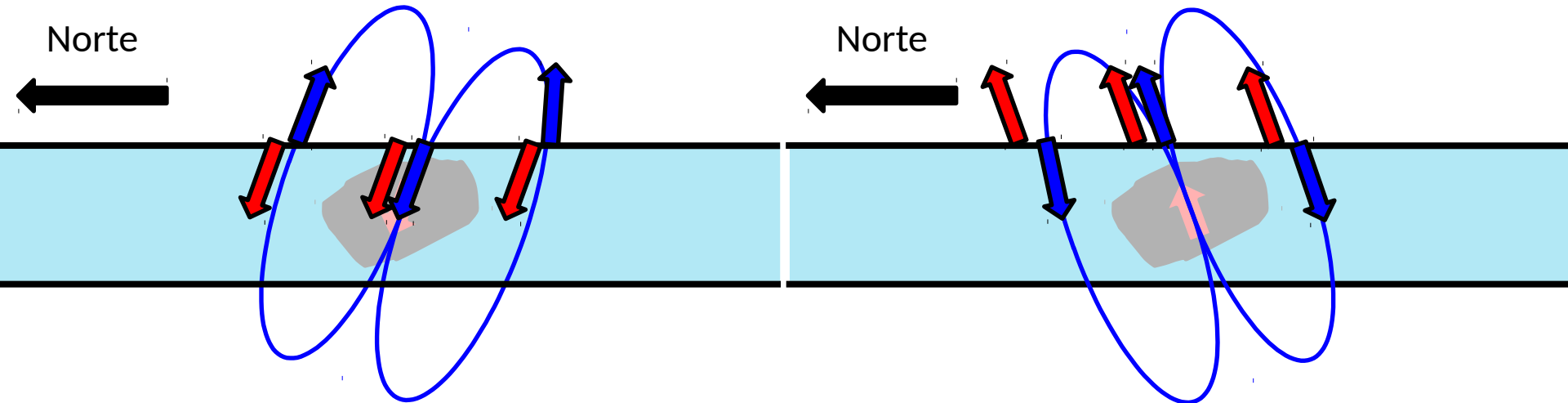
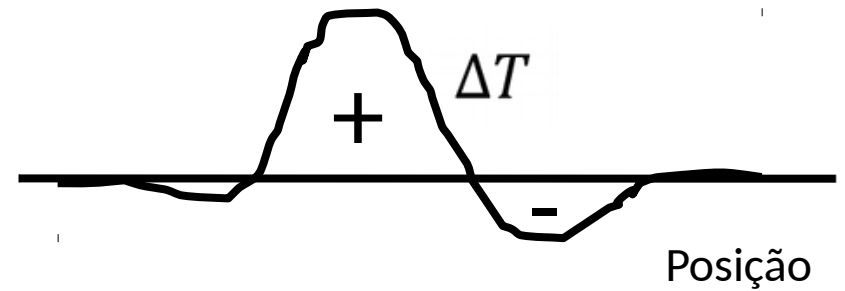


Este padrão é válido apenas para anomalias de campo total produzidas por corpos com magnetização na mesma direção do campo principal

Hemisfério norte



Hemisfério sul



Como seria a anomalia de campo total produzida por um corpo localizado no polo norte e com magnetização na mesma direção do campo principal?  
E se o corpo estivesse no polo sul?

# Referências

- Blakely, R. J., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications: Cambridge University Press.
- Hulot, G., Sabaka, T., Olsen, N., e Fournier, A., 2015, 5.02 - the present and future geomagnetic field, *in* Treatise on Geophysics, second edition ed.: Elsevier, 33-78. doi: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00096-8.
- Langel, R. A., e Hinze, W. J., 1998, The magnetic field of the earth's lithosphere: The satellite perspective: Cambridge University Press.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., e Ruder, M. E., 2005, The historical development of the magnetic method in exploration: GEOPHYSICS, 70, 33ND-61ND.