



**MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL  
FORÇA AÉREA PORTUGUESA  
CENTRO DE FORMAÇÃO MILITAR E TÉCNICA**

Curso de Formação de Praças - RC

**COMPÊNDIO**

**FUNDAMENTOS DE  
ELECTRICIDADE II**

EPR: 1SAR Luis Alegrio

CCF 335-27

Julho 2008







**MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL  
FORÇA AÉREA PORTUGUESA  
CENTRO DE FORMAÇÃO MILITAR E TÉCNICA**

**CARTA DE PROMULGAÇÃO**

**JULHO 2008**

1. O Compêndio de "Fundamentos de Electricidade II" é uma Publicação "NÃO CLASSIFICADA".
2. Esta publicação entra em vigor logo que recebida.
3. É permitido copiar ou fazer extractos desta publicação sem autorização da entidade promulgadora.

**O COMANDANTE**

**Vítor Manuel Alves Francisco**

**COR/PILAV**



**REGISTO DE ALTERAÇÕES**

| IDENTIFICAÇÃO DA ALTERAÇÃO,<br>Nº DE REGISTO, DATA | DATA DE<br>INTRODUÇÃO | DATA DE ENTRADA<br>EM VIGOR | ASSINATURA, POSTO E<br>UNIDADE DE QUEM<br>INTRODUZIU A ALTERAÇÃO |
|----------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                                                    |                       |                             |                                                                  |



|                             |                                   |
|-----------------------------|-----------------------------------|
|                             |                                   |
| <b>Cursos:</b>              | Curso de Formação de Praças - RC  |
| <b>Nome do Compêndio:</b>   | Fundamentos de Electricidade II   |
| <b>Disciplina:</b>          | Fundamentos de Electricidade      |
| <b>Data de elaboração:</b>  | Julho 2008                        |
| <b>Elaborado Por:</b>       | 1SAR/ MELECT Luís Alegrio         |
| <b>Verificado Por:</b>      | Gabinete da Qualidade da Formação |
|                             |                                   |
| <b>Comando G. Formação:</b> | TCOR/ ENGAER José Saúde           |
| <b>Director de Área:</b>    | MAJ/ TMMEEL Abílio Carmo          |
| <b>Director de Curso:</b>   | TEN/ TMMEEL António Graveto       |
| <b>Formador:</b>            | 1SAR/ MELECT Luís Alegrio         |

**ATENÇÃO:**

Esta publicação destina-se a apoiar os formandos a frequentarem o Curso de Formação de Praças das Especialidades MELECA, MELECT, MELIAV e MMA na disciplina de (Fundamentos de Electricidade).

Não pretendendo ser uma publicação exaustiva do curso em questão, apresenta-se como uma ferramenta de consulta quer durante a duração do curso, quer após a sua conclusão.



# ÍNDICE

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>MAGNETISMO .....</b>                                         | <b>5</b>  |
| CONCEITO E DEFINIÇÃO .....                                      | 5         |
| ÍMANES NATURAIS E ARTIFICIAIS .....                             | 5         |
| VANTAGENS DOS ÍMANES ARTIFICIAIS.....                           | 5         |
| FORMATOS USUAIS .....                                           | 6         |
| REGIÕES ACTIVAS E ZONA NEUTRA.....                              | 7         |
| MOLÉCULA ÍMAN .....                                             | 7         |
| LEIS QUANTITATIVAS DAS ACÇÕES MAGNÉTICAS .....                  | 7         |
| MAGNETIZAÇÃO: CONCEITO E PROCESSOS .....                        | 8         |
| MAGNETIZAÇÃO TEMPORÁRIA E PERMANENTE .....                      | 9         |
| DESMAGNETIZAÇÃO: CONCEITO E PROCESSOS .....                     | 10        |
| CONSERVAÇÃO DOS ÍMANS .....                                     | 11        |
| CAMPO MAGNÉTICO E ACÇÃO À DISTÂNCIA.....                        | 11        |
| CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO.....                          | 11        |
| INTERACÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS .....                           | 13        |
| CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE .....                                 | 13        |
| PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....                                  | 14        |
| ORIGEM DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS .....                        | 17        |
| DEFINIÇÃO VECTORIAL DO CAMPO MAGNÉTICO .....                    | 17        |
| CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME .....                                  | 18        |
| GRANDEZAS MAGNÉTICAS.....                                       | 19        |
| <b>ELECTROMAGNETISMO.....</b>                                   | <b>23</b> |
| EXPERIÊNCIA DE OERSTED.....                                     | 23        |
| REGRA DE AMPÉRE .....                                           | 23        |
| CAMPOS MAGNÉTICOS ASSOCIADOS A CORRENTES ELÉCTRICAS .....       | 24        |
| FORÇA MAGNETOMOTRIZ .....                                       | 30        |
| PERMEABILIDADE RELATIVA E ABSOLUTA .....                        | 31        |
| CURVA DE 1ª MAGNETIZAÇÃO .....                                  | 31        |
| HISTERESE .....                                                 | 32        |
| SELECÇÃO DE CARACTERÍSTICAS NOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS ..... | 35        |
| <b>CIRCUITO MAGNÉTICO .....</b>                                 | <b>36</b> |
| CLASSIFICAÇÃO .....                                             | 36        |
| LEI DE HOPKINSON.....                                           | 37        |
| RELUTÂNCIA .....                                                | 37        |

|                                                                         |              |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------|
| CIRCUITOS MAGNÉTICOS E ELÉCTRICO .....                                  | 38           |
| DISPERSÃO MAGNÉTICA .....                                               | 39           |
| CÁLCULO DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS .....                                   | 40           |
| ELECTROÍMANES .....                                                     | 44           |
| <b>FORÇAS ELECTROMAGNÉTICAS .....</b>                                   | <b>47</b>    |
| ACÇÃO DE UM CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UMA CORRENTE (FORÇA DE LAPLACE) ..... | 47           |
| APLICAÇÕES DA FORÇA DE LAPLACE .....                                    | 49           |
| ACÇÕES ELECTRODINÂMICAS.....                                            | 50           |
| <b>INDUÇÃO ELECTROMAGNÉTICA.....</b>                                    | <b>53</b>    |
| CORRENTES INDUZIDAS CONDIÇÕES DO SEU ESTABELECIMENTO.....               | 53           |
| LEIS DE FARADAY .....                                                   | 54           |
| SENTIDO DA CORRENTE INDUZIDA: LEI DE LENZ.....                          | 55           |
| FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DAS LEIS DE FARADAY .....                         | 55           |
| CORRENTES DE FOUCAULT .....                                             | 56           |
| EFEITO PELICULAR .....                                                  | 58           |
| APLICAÇÕES DO FENÓMENO DE INDUÇÃO .....                                 | 58           |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                                               | <b>61</b>    |
| <b>LISTA DE PÁGINAS EM VIGOR.....</b>                                   | <b>LPV-1</b> |

# MAGNETISMO

## CONCEITO E DEFINIÇÃO

O magnetismo é uma singular manifestação da matéria, evidenciada apenas por algumas substâncias que têm a propriedade de atrair outras, no seu conjunto designadas por **ferromagnéticas** e que são fundamentalmente o **ferro**, o **níquel**, o **cobalto** e algumas ligas.

## ÍMANES NATURAIS E ARTIFICIAIS

O magnetismo aparece na natureza de forma espontânea, em alguns minerais, como a **magnetite** ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), a **hematite** ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), e a **cementite** ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), sendo resultado de um **processo natural**.

Mas, de todas as pedras referidas, é, sem dúvida, a magnetite aquela cujo nome nos é mais familiar, em parte por ter sido a primeira a ser descoberta com tais propriedades. Oriunda da **Magnésia**, cidade da antiga Grécia, a esse facto se a designação de **pedra da magnésia**, **pedra íman** ou **magnete**.

Hôje, porém, o vocábulo tem um sentido algo diferente e mais amplo do que outrora, designando-se por íman ou magnete:

todo e qualquer corpo que espontânea ou artificialmente seja possuidor de propriedades magnéticas.

São assim englobados não apenas os ímanes naturais mas também aqueles a que artificialmente foram conferidas idênticas propriedades.

Após magnetização por tratamento adequado, constituem ímanes artificiais determinadas substâncias ferromagnéticas de criação industrial, como alguns aços e outras variedades de ferro.

## VANTAGENS DOS ÍMANES ARTIFICIAIS

Sob todos os pontos de vista, são inegáveis as vantagens dos ímanes artificiais relativamente aos ímanes naturais. Podem resumir-se assim:

Facilidade em se poder dar uma **configuração mais conveniente** para uma dada utilização específica.

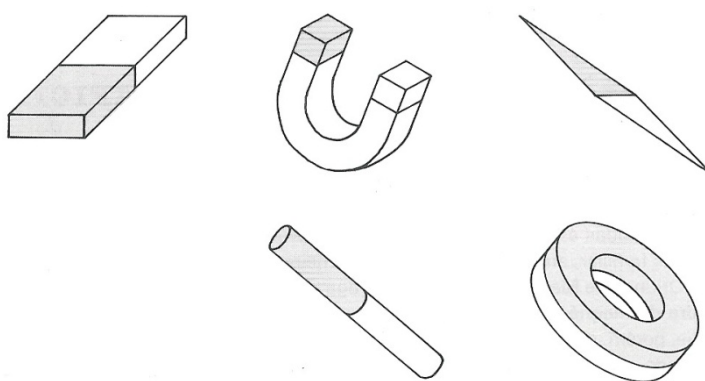
Uma amostra natural, condicionada pela sua forma, vê imitada a sua utilização.

Existir a possibilidade, dentro de certos limites para cada tipo de material ferromagnético, de **fixar a intensidade das suas propriedades**.

Não existir a **possibilidade de desagregação** a que qualquer amostra mineral está sempre sujeita em maior ou em menor proporção.

## FORMATOS USUAIS

À excepção dos formatos industriais mais diversos a que obedece o fabrico de peças e componentes dos circuitos magnéticos em muitas máquinas eléctricas, os ímanes artificiais aparecem-nos usual e caracteristicamente com as seguintes formas:



**Barras direitas** com secção rectangular, quadrada ou cilíndrica;

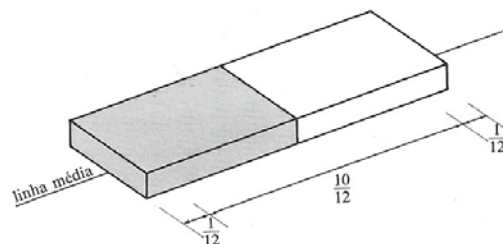
**Barras em U** ou em ferradura.

**Lâminas delgadas** em forma de losango, como é o caso da agulha magnética, elemento fundamental em qualquer bússola.

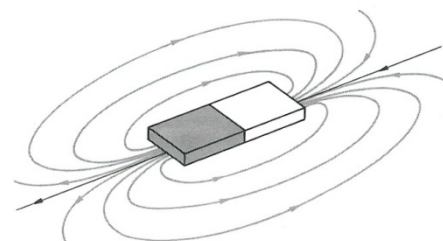
## REGIÕES ACTIVAS E ZONA NEUTRA

Independentemente do seu tamanho ou forma, podemos distinguir, em qualquer íman, **três regiões** distintas.

As extremidades concentram as propriedades magnéticas, são por esse facto designadas **regiões activas** ou **regiões polares**. Têm diferente comportamento magnético e constituem o **pólo norte** e o **pólo sul** magnéticos. Uma **terceira zona**, que não manifesta qualquer tipo de acções magnéticas, é por essa razão designada **zona neutra** ou **linha neutra**.



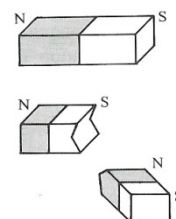
Em qualquer íman uma das regiões polares ocupa, aproximadamente, **2/12** do comprimento total, sendo os restantes **10/12** de zona neutra, como ilustra a figura anterior.



Chama-se eixo de um íman à zona média que une as extremidades polares.

## MOLÉCULA ÍMAN

Se fragmentarmos qualquer íman, cada uma das partes resultantes é um novo íman, podendo sempre distinguir-se as três regiões características. Torna-se impossível, portanto, isolar qualquer uma delas. Se, teórica e sucessivamente, levássemos por diante tal divisão, obteríamos, em última análise, o íman mais pequeno para essa substância, que coincidiria com a própria molécula.



## LEIS QUANTITATIVAS DAS ACÇÕES MAGNÉTICAS

Dois ímanes suficientemente próximos um do outro interagem, podendo o comportamento de ambos resumir-se qualitativamente nas duas seguintes leis:

Pólos magnéticos do mesmo nome repelem-se.

Pólos magnéticos de nomes contrários atraem-se.

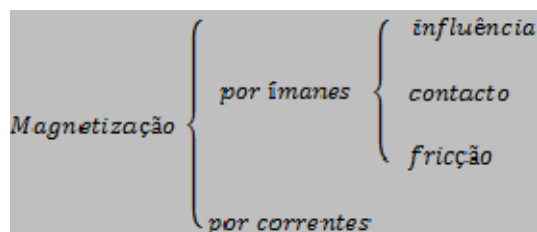
Assim, será previsível uma atracção entre um pólo sul e um pólo norte de dois ímanes diferentes, da mesma forma que a repulsão entre ambas as regiões norte ou sul.

## MAGNETIZAÇÃO: CONCEITO E PROCESSOS

A magnetização consiste em tornar magneticamente activas substâncias de qualidades ferromagnéticas.

Estão neste caso os aços e algumas ligas que só após tratamento adequado podem exhibir tais propriedades. Todas as outras as substâncias, não ferromagnéticas portanto, como, por exemplo, um grande número de metais e ligas não ferrosas, recusam-se a qualquer tentativa de magnetização.

Existem vários processos de magnetização, que podem ser assim sintetizados:



### MAGNETIZAÇÃO POR INFLUÊNCIA

A peça a magnetizar é colocada na vizinhança de um íman. O processo de magnetização prossegue inalterável se, em lugar do ar que separa naturalmente as partes influenciadora e influenciada, entre elas existir um outro meio não magnético.

### MAGNETIZAÇÃO POR CONTACTO

Neste caso a peça a magnetizar é mantida em contacto com um íman permanente durante um período mais ou menos longo, requerido pelo processo em cada caso.

### MAGNETIZAÇÃO POR FRICÇÃO

A peça a magnetizar é friccionada, sempre no mesmo sentido e repetidas vezes, com um dos pólos de um íman ou alternadamente, usando simultaneamente os pólos contrários de dois ímanes necessários para o efeito.

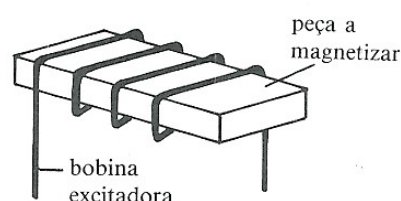
Este processo conhece ainda algumas variantes, contudo a filosofia de princípio é a mesma.

## MAGNETIZAÇÃO POR CORRENTES

Os processos anteriores são elementares. A produção industrial recorre fundamentalmente à acção da corrente eléctrica. Se nos determos nos seus pormenores, cujo pleno entendimento passa pela leitura do próximo capítulo, podemos apontar dois procedimentos usuais basicamente equivalentes.

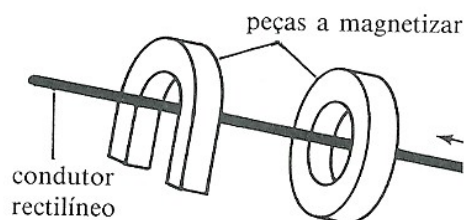
### 1º Processo

A peça a magnetizar é introduzida no interior de uma bobina na qual se faz passar uma corrente eléctrica. Esta peça constitui assim, temporariamente, o núcleo da referida bobina, no seu conjunto designada por electroímã.



### 2º Processo

Um condutor rectilíneo de grande secção é abraçado por um certo número de peças a magnetizar. A passagem de uma corrente eléctrica durante um certo tempo, conduz à magnetização dos referidos materiais. Em qualquer caso, a corrente deve ser de grande intensidade de forma à acção magnetizante ser apreciável. Além disso, e para fazer estabilizar as propriedades magnéticas no material, o processo de magnetização deve ser regularmente interrompido para se proceder ao recozimento da peça em água fervente.



Com igual objectivo e constituindo um processo alternativo, ou mesmo complementar do anterior, a peça, previamente aquecida e sob campo magnético intenso, é submetida a forte compressão em prensa hidráulica.

## MAGNETIZAÇÃO TEMPORÁRIA E PERMANENTE

Uma vez magnetizados os materiais ferromagnéticos, distinguem-se uns dos outros por várias e importantes características. Uma delas é a que respeita à permanência ou não das suas propriedades, logo que cessa a acção magnetizante. O ferro puro, por exemplo, não conserva quaisquer propriedades magnéticas, que apenas duram o tempo em que se faz sentir a excitação do campo. É um ímã temporário. Outros materiais como o ferro fundido e o aço duro, pelo contrário, conservam o seu estado magnético já depois de haver terminado a referida excitação.

Mesmo assim há diferenças entre eles. Se é facto que o ferro fundido é facilmente magnetizável, em contrapartida perde rapidamente as suas propriedades magnéticas. Este e outros materiais em idênticas circunstâncias são designados por ímanes temporários. O aço duro e muitas ligas ferromagnéticas, pese o facto de serem de magnetização mais difícil, conservam as propriedades. Constituem ímanes permanentes e

o seu magnetismo designa-se por magnetismo residual ou remanescente.

## DESMAGNETIZAÇÃO: CONCEITO E PROCESSOS

O processo de desmagnetização pode igualmente ser resultado de um processo natural ou artificial.

Todos os materiais magnetizados sofrem uma depreciação das suas propriedades com o decorrer do tempo, embora esse fenómeno seja lento, particularmente nos chamados ímanes permanentes. É um processo natural que não é alheio, entre outros, ao efeito do campo magnético terrestre. Tomam-se cuidados especiais nesse sentido, a que nos referimos no ponto seguinte.

Vejamos os factores que podem levar à desmagnetização.

### **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA**

A variação da temperatura, dentro dos valores de ambiente, pouco afecta as propriedades magnéticas. Contudo, à medida que a temperatura se eleva para além daquele intervalo, a intensidade dessas propriedades aumenta ligeiramente. Porém atinge-se uma determinada temperatura, designada por temperatura de Curie ou ponto de Curie, para o qual o material perde todas as qualidades ferromagnéticas. Para o ferro essa temperatura é de 700 °C, para o níquel 380 °C e para o cobalto 1110 °C.

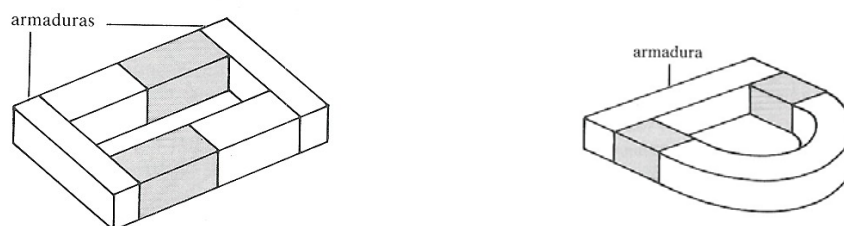
### **INFLUÊNCIA DAS ACÇÕES MECÂNICAS**

Vibrações ou choques mecânicos têm efeito determinante na desmagnetização dos materiais. O facto deve-se à destruição, por choque, do ordenamento das moléculas na microestrutura do material.

### **INFLUÊNCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS EXTERIORES**

A existência de correntes eléctricas magnetizantes alternadas ou a proximidade de campos magnéticos podem igualmente fazer desaparecer, total ou parcialmente, as propriedades magnéticas.

## CONSERVAÇÃO DOS ÍMANS



Nos ímanes, é prática corrente unir os respectivos pólos por uma barra de ferro macio, como se vê nas figuras, designada por armadura. Dando continuidade ao circuito magnético, a armadura ou armaduras existentes evitam a acção desmagnetizante do campo magnético terrestre.

É igualmente prática corrente adicionar, na altura de fabrico dos ímanes, alguns elementos, como o carbono, o crómio, o níquel, o alumínio, o tungsténio e muitos outros, que, entre outras vantagens, permitem garantir a estabilização das propriedades magnéticas, retardando o processo natural de envelhecimento.

## CAMPO MAGNÉTICO E ACÇÃO À DISTÂNCIA

A noção de campo é fundamental em toda a física e relaciona conceitos aparentemente distintos, como são os campos magnético, eléctrico ou gravítico.

No magnetismo, em particular, pode entender-se campo como:

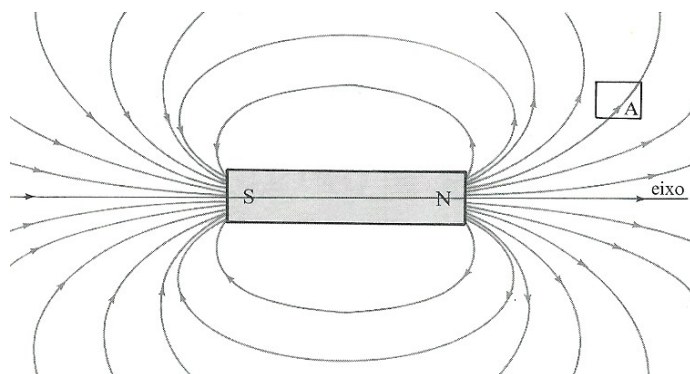
Toda a região do espaço onde se fazem sentir as acções magnéticas.

Analogamente ao campo eléctrico e ao campo gravítico, e muito embora as acções magnéticas tenham diferente natureza, elas caracterizam-se por não necessitarem de qualquer suporte físico ou meio material para o seu estabelecimento. Esta particularidade é chamada acção à distância e justifica a existência e propagação de campos magnéticos no vazio.

## CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

As linhas de força

O vector intensidade de campo.

**LINHAS DE FORÇA**

O conjunto de linhas de força configuram e identificam a existência de qualquer campo magnético numa certa região do espaço e constituem respectivo **espectro magnético**. Para além dos **ímanes**, são origem de campos magnéticos, como veremos, as **correntes eléctricas** e as **massas gravíticas**.

Em todo o caso, as linhas de força **não têm existência real**, correspondem simplesmente à necessidade de **materialização do campo**. **Convencionou-se** que no exterior de um íman elas se **afastam do pólo norte em direcção ao pólo sul**, fechando-se seguidamente pelo seu interior. Assim podemos dizer que as linhas de força:

Representam o sentido do deslocamento que tomaria qualquer massa magnética norte quando abandonada à acção de um campo magnético.

Na figura anterior podemos apreciar as linhas de força do campo criado por um íman recto. Para as obtermos tivemos de proceder como se descreve seguidamente:

Sobre um íman coloquemos uma placa de vidro ou mesmo uma folha de papel e sobre ela espalhemos, cuidadosamente, limalha de ferro. Abandonadas à acção do campo magnético, cada uma das pequeníssimas partículas de ferro sofre magnetização temporária, criando em cada uma delas um pólo norte que aponta para o pólo sul do íman e um pólo sul na extremidade contrária. Estas partículas dispõem-se segundo as linhas de força do campo, permitindo adicionalmente concluir que:

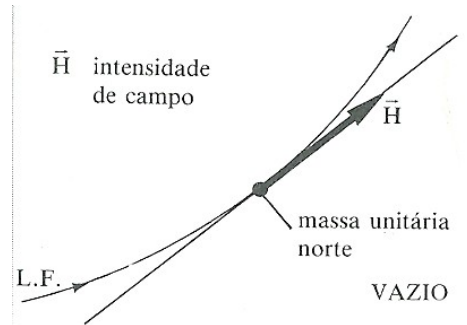
Nas zonas de maior concentração é maior a intensidade do campo magnético; consequentemente, onde são mais espaçadas o campo é menos intenso.

Constatamos o maior valor de intensidade de campo magnético junto às regiões polares e o decrescimento do mesmo em regiões gradualmente mais afastadas.

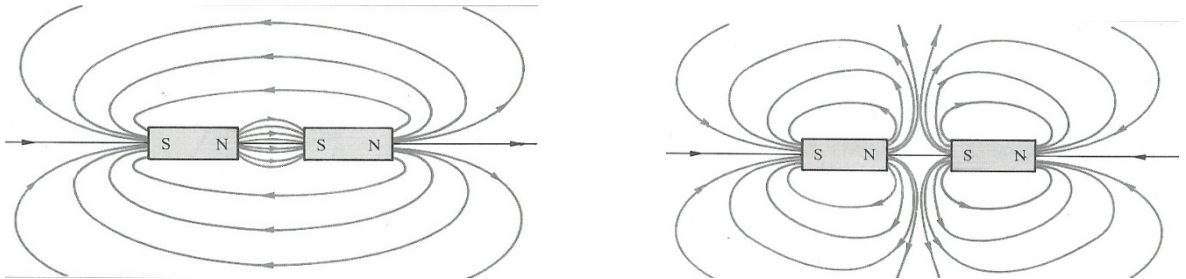
## INTENSIDADE DE CAMPO

A intensidade de campo num ponto é a força que se exerce no vazio sobre uma massa magnética norte considerada unitária.

Sendo uma força, representa-se por um vector, daí tratar-se de uma **grandeza vectorial**, e, como é lógico supor, num determinado ponto do campo o seu sentido é coincidente com o que tomaria o pólo norte de uma agulha magnética a ele abandonada. Podemos ainda ver que o **vector intensidade de campo num dado ponto é sempre tangente à linha de força que passa por esse ponto.**



## INTERACÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS

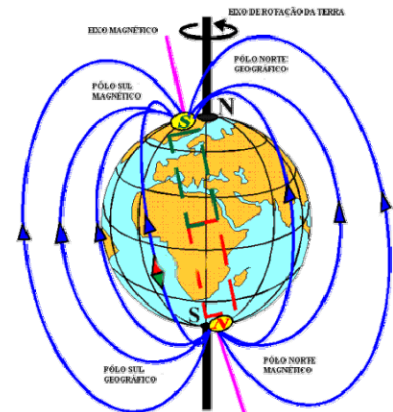


A suficiente proximidade de dois campos magnéticos altera as suas configurações iniciais. Nas figuras seguintes representam-se os campos magnéticos resultantes de dois ímanes em duas situações distintas: atracção e repulsão mútuas, respectivamente.

## CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

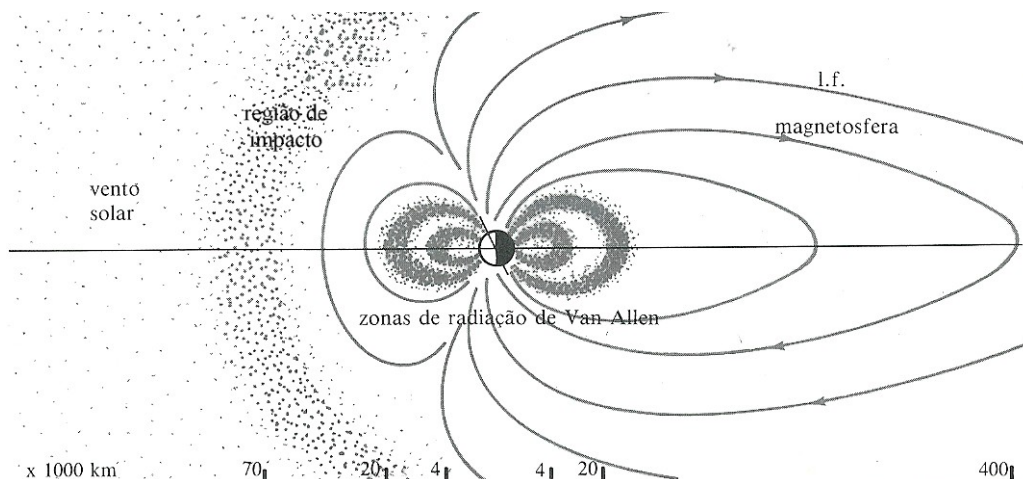
Numa considerável extensão do espaço em redor da Terra, constata-se a existência de um forte campo magnético, facto aliás que não é exclusivo do nosso planeta, pelo contrário, é comum a todas as grandes massas que povoam o espaço.

**A Terra comporta-se como se no seu interior possuísse um gigantesco íman** cujo eixo faz um ângulo de, aproximadamente, 17° com o seu próprio eixo de rotação.



Uma das consequências desse campo é o efeito sobre as radiações cósmicas, concentrando partículas

carregadas em determinadas regiões conhecidas por **zonas de radiação de van Allen**.



O rastreio magnético em regiões da crosta terrestre é um método importante de **prospecção geológica**, permitindo avaliar as potencialidades do subsolo no que respeita à localização e importância de jazidas minerais.

Nas proximidades da Terra o campo magnético é aproximadamente simétrico. Em regiões mais afastadas, porém, o **vento solar**<sup>1</sup> é responsável por uma assimetria do campo magnético terrestre. Este estende-se por cerca de 50000km para o lado do Sol e no sentido oposto por mais de 400000km.

O **arco de choque** que vemos delimitar o campo magnético terrestre corresponde a toda a **região de impacto** de radiação. As partículas que logram ultrapassar essa barreira magnética são aprisionadas em duas cinturas que são as já referidas zonas de radiação de Van Allen situadas a 4000 e 20000km acima da superfície da Terra.

## PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

### CONCEITO

A permeabilidade ou condutibilidade magnética de uma substância traduz a maior ou menor facilidade com que essa substância se deixa atravessar pelas linhas de força.

Será de esperar, por exemplo, que duas massas polares do mesmo nome, mergulhadas no vazio, sofram uma força mútua de repulsão diferente daquela que será de observar se o meio onde elas se encontram for outro qualquer. A permeabilidade caracteriza numericamente cada substância, definindo as condições de

<sup>1</sup> Designação dada ao plasma de partículas eletrizadas desferidas pelo sol: prótons, elétrons e hélios, que viajam à velocidade de 400km/s

estabelecimento do campo magnético no seu próprio seio. Representa-se pela letra grega  $\mu$ .

## CLASSIFICAÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS

Segundo os valores de permeabilidade magnética, podemos classificar as diferentes substâncias em quatro classes distintas:

- Ferromagnéticas;
- Paramagnéticas;
- Diamagnéticas.
- Amagnéticas

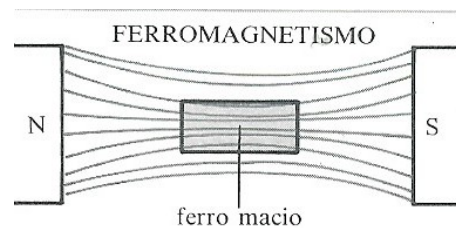
Estas duas últimas são consideradas não magnéticas pela irrelevância das suas propriedades. A distinção é feita com base na permeabilidade magnética do vazio, considerada unitária, em relação à qual todas as substâncias referem o seu comportamento magnético.

### Materiais ferromagnéticos $\mu \gg 1$

#### Características fundamentais:

Valores elevados de permeabilidade magnética, muito superiores à unidade.

Conduzem com facilidade as linhas de força. Deformam, consequentemente, o campo magnético circundante, desviando através de si um significativo número de linhas de força. São fortemente atraídos pelos ímanes



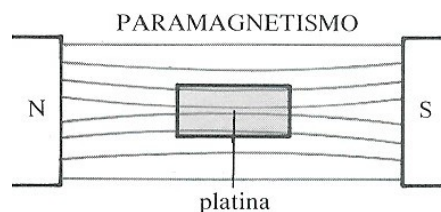
**Exemplos:** ferro, níquel, cobalto.

### Materiais paramagnéticos $\mu \geq 1$

#### Características fundamentais:

Valores de permeabilidade magnética, ligeiramente superior à unidade.

Não exercem acção significativa sobre o campo envolvente, apenas desviando através de si ou simplesmente deflectindo as linhas de força mais próximas



São atraídos pelos ímanes, mas menos intensamente que no caso anterior.

**Exemplos:** alguns metais: platina, alumínio, sódio e potássio;

ligas metálicas: contendo vanádio e manganés;

alguns gases: oxigénio e ozono.

### **Materiais diamagnéticos $\mu \leq 1$**

#### **Características fundamentais:**

Valores de permeabilidade magnética, ligeiramente inferior à unidade.

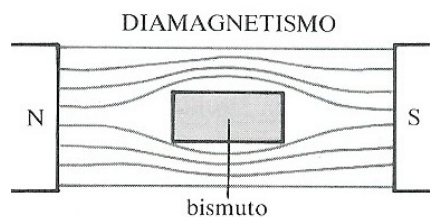
Não produzem alterações significativas do campo em seu redor e tendem a afastar, ainda que ligeiramente, as linhas de força mais próximas.

São ligeiramente repelidas pelos ímanes.

**Exemplo:** alguns metais: bismuto, ouro, prata, cobre;

gases raros: xénon cripton, árgon;

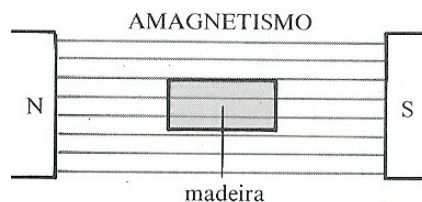
alguns compostos: vidro, água;



### **Materiais amagnéticos**

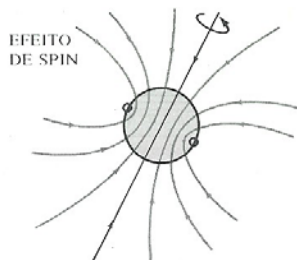
#### **Características fundamentais:**

Embora a muito fraca permeabilidade magnética dos materiais pertencentes às duas últimas famílias permita considerá-los não magnéticos, podemos referir alguns materiais, como o bronze, determinado tipo de madeiras e plásticos de fabrico especial praticamente destituídos de propriedades magnéticas. Têm um comportamento análogo ao do vazio e designam-se por amagnéticos. São muito importantes em electrotecnia, servindo para o fabrico de peças que não devam alterar os campos magnéticos nas suas fronteiras ou não ser por eles influenciadas.



**Exemplo:** suportes de núcleos de transformadores.

## ORIGEM DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS



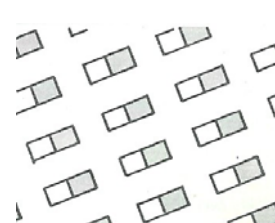
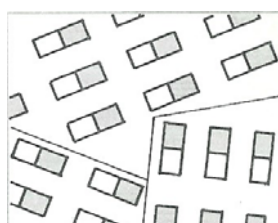
Os fenómenos eléctricos e magnéticos não são verdadeiramente dissociáveis. Eles coexistem, e entre ambos pode até estabelecer-se uma relação de causa efeito. De facto,

Toda a carga eléctrica em movimento origina um campo magnético em seu redor.

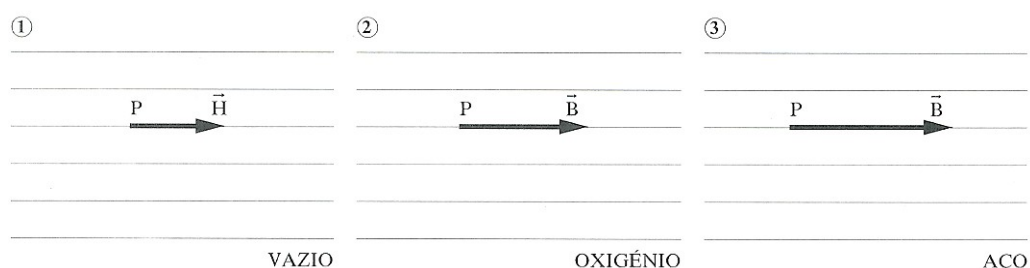
Podemos então concluir que sendo o átomo constituído por electrões animados, por um lado de movimento de rotação em torno do núcleo, por outro do efeito de spin em torno do seu próprio eixo, aparecerá como resultado um campo magnético. Seria contudo precipitado pensar que todas as substâncias seriam magnéticas, o que não acontece.

A razão é simples. Nas substâncias não magnéticas as cargas elementares neutralizam os seus efeitos magnéticos a nível atómico, iónico ou molecular.

Nas substâncias magnéticas, pelo contrário, sobressai macroscopicamente uma descompensação desses efeitos. As moléculas, átomos ou iões orientam-se agora, predominantemente, num dado sentido, reforçando a sua acção magnética.



## DEFINIÇÃO VECTORIAL DO CAMPO MAGNÉTICO



Consideremos as linhas de força de um campo magnético no **vazio** como o representado na situação 1 da

figura anterior. Se no ponto **P** imaginarmos colocada uma **massa magnética norte unitária**, então  $\vec{H}$

representará a **intensidade de campo** nesse ponto, também chamada excitação magnética por estar na origem desse campo.

Consideremos a **mesma excitação  $\vec{H}$** , mas agora num meio diferente do vazio, por exemplo o **oxigénio** (situação 2). A força que se exerce no ponto **P** sobre a mesma massa unitária será agora maior que no caso anterior, dado o meio ser **paramagnético**. É representado pelo vector  $\vec{B}$ , a que chamamos **indução magnética**.

Numa substância **ferromagnética**, como o **aço**, a indução é ainda maior (situação 3).  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  têm, portanto, um significado diferente:  $\vec{H}$  é causa e  $\vec{B}$  o seu efeito.  $\vec{H}$  está associado à excitação ou à origem do campo magnético, tomando como referência o vazio e  $\vec{B}$  à indução magnética criada em cada meio pela excitação  $\vec{H}$  e é função da sua permeabilidade magnética.

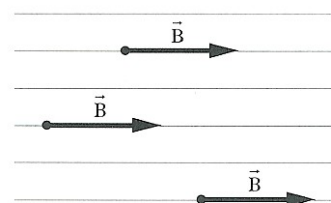
Os vectores  $\vec{H}$  e  $\vec{B}$  referenciam o campo e as suas grandezas estão assim relacionadas:

|                         |       |           |                          |                            |
|-------------------------|-------|-----------|--------------------------|----------------------------|
| $\vec{B} = \mu \vec{H}$ | Onde: | $\vec{B}$ | Indução                  | Tesla (T)                  |
|                         |       | $\mu$     | permeabilidade magnética | Henry/metro (H/m)          |
|                         |       | $\vec{H}$ | Intensidade de campo     | Ampère esptro/metro (Ae/m) |

## CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

Um campo magnético diz-se uniforme quando em qualquer um dos seus pontos é constante o vector indução magnética. As linhas de força são paralelas entre si e igualmente espaçadas.

O campo magnético entra as extremidades de um íman em U é aproximadamente um campo magnético uniforme (figura ao lado).



## GRANDEZAS MAGNÉTICAS

### FLUXO MAGNÉTICO

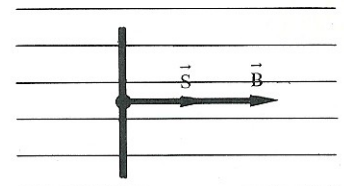
| GRANDEZA        |         | UNIDADE SI | ABREVIATURA |
|-----------------|---------|------------|-------------|
| DESIGNAÇÃO      | SÍMBOLO |            |             |
| Fluxo magnético | $\Phi$  | Weber      | Wb          |

O conjunto das linhas de força que saem do pólo norte em direcção ao pólo sul representam um fluxo magnético cuja maior ou menor intensidade é denunciada pela maior ou menor concentração das linhas de força.

A unidade SI de fluxo magnético é o **weber (Wb)**.

Formulação matemática

Consideremos um **campo magnético uniforme**, como o representado na figura do lado, e nele uma **superfície perpendicular às linhas de força** desse campo. Num ponto desta superfície consideramos dois vectores:



Um, representativo do campo, isto é, o vector  $\vec{B}$  **indução magnética**.

Outro, representativo da **superfície  $\vec{S}$** , normal a ela e cuja grandeza é, a uma determinada escala, a medida da sua área.

**O fluxo magnético é uma grandeza escalar** dada pelo produto das grandezas de ambos os vectores, ou seja:

$$\phi = B \times S$$

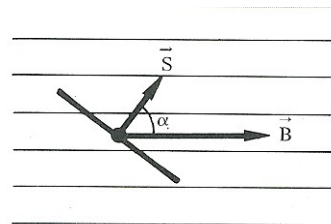
### Generalização da expressão

Consideremos a mesma superfície mas agora com uma inclinação qualquer relativamente às linhas de força, como se representa na figura seguinte.

Designemos por  $\alpha$  o ângulo formado pelos vectores  $\vec{B}$  e  $\vec{S}$ . O fluxo através

da mesma superfície é menor que no caso anterior, o que é denunciado

pelo menor número de linhas de força que a atravessam. A expressão para o fluxo é agora a seguinte:



$$\Phi = B \times S \times \cos\alpha$$

ela contém como no caso particular a anterior expressão em que tendo os vectores  $\vec{B}$  e  $\vec{S}$  a mesma linha de

acção, então:  $\alpha = 0$ ;  $\cos\alpha = 1$  e, portanto,  $\Phi = B \times S$  c.q.d.

### INDUÇÃO MAGNÉTICA

| GRANDEZA          |         | UNIDADE SI | ABREVIATURA |
|-------------------|---------|------------|-------------|
| DESIGNAÇÃO        | SÍMBOLO |            |             |
| Indução magnética | B       | tesla      | T           |

Vimos já o significado vectorial desta grandeza e a sua importância na definição de uma campo magnético.

Considerando o caso particular das linhas de força interceptarem na perpendicular a superfície, resulta de

$\Phi = B \times S$  que:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

**INTENSIDADE DE CAMPO**

| GRANDEZA             |         |              |             |
|----------------------|---------|--------------|-------------|
| DESIGNAÇÃO           | SÍMBOLO | UNIDADE SI   | ABREVIATURA |
| Intensidade de campo | H       | Ampére/metro | A/m         |

A **intensidade de campo magnético ou excitação magnética** e, como sabemos, uma **grandeza vectorial**. O seu vector  $\vec{H}$  foi já anteriormente definido. Embora a unidade em que se exprima no SI só no próximo capítulo possa ser justificada, ela é o **ampére/metro**.

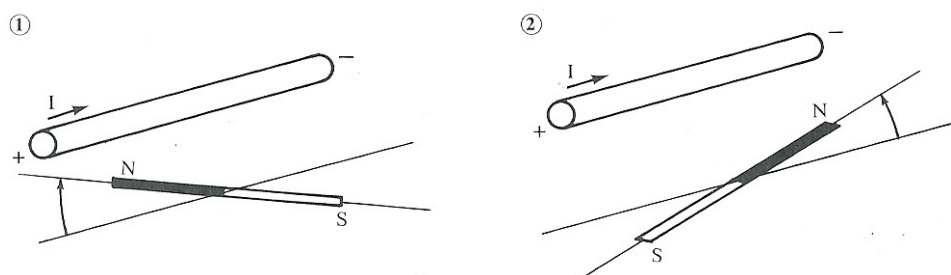


## ELECTROMAGNETISMO

Os fenómenos eléctricos e magnéticos não são independentes. Vimos já que a toda a carga eléctrica em movimento está associado um campo magnético. Também é um facto que, sob determinadas condições, um campo magnético pode ser causa do aparecimento de uma corrente eléctrica num circuito.

O campo eléctrico e o campo magnético são, assim, casos particulares de um único – **O CAMPO ELECTROMAGNÉTICO**.

### EXPERIÊNCIA DE OERSTED



Esta experiência põe em evidência o efeito magnético de uma corrente eléctrica. Para isso faz-se passar uma corrente eléctrica num condutor colocado paralelamente a uma agulha magnética nas suas proximidades.

Estando o circuito eléctrico interrompido, a agulha mantém-se na sua posição de equilíbrio.

Com o circuito fechado, a agulha sofrerá um desvio angular, actuada pelo campo magnético produzido pela corrente.

### REGRA DE AMPÉRE

O comportamento da agulha magnética pode resumir-se do seguinte modo, que constitui a chamada **Regra de Ampere**.

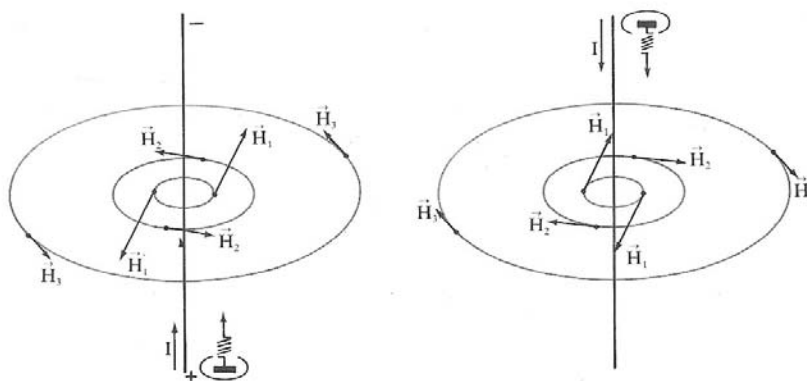
O sentido do desvio numa agulha magnética disposta paralelamente a um condutor, e por efeito da passagem numa corrente eléctrica, é tal que o seu pólo norte deslocar-se á para o lado esquerdo do sentido da corrente no condutor.

Além disso, a amplitude do desvio é directamente proporcional à intensidade da corrente eléctrica.

## CAMPOS MAGNÉTICOS ASSOCIADOS A CORRENTES ELÉCTRICAS

### CORRENTE RECTILÍNEA

#### ➤ Configuração do campo



Consideremos uma corrente eléctrica de intensidade  $I$  atravessando um condutor rectilíneo de comprimento infinito (figura anterior).

As linhas de força do campo magnético criado por uma corrente rectilínea são circunferência normais e concêntricas ao condutor.

O campo eléctrico é mais intenso junto ao condutor, o que é evidenciado pela maior concentração das linhas de força nessa zona, diminuindo progressivamente com o afastamento.

#### ➤ Sentido

Na figura anterior desenhou-se o vector intensidade de campo  $\vec{H}$  em pontos diametralmente opostos situados na mesma linha de força. Reparar que **o vector intensidade de campo é tangente, em cada ponto, à respectiva linha de força.**

Existem várias regras que nos dão o sentido do campo, sendo uma delas a **regra do saca-rolhas de Maxwell:**

O sentido do campo é o da rotação de um saca-rolhas que progride no condutor no sentido da corrente.

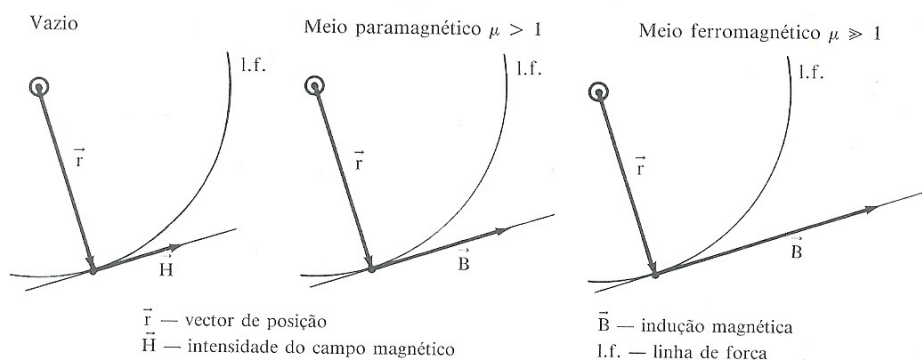
## ➤ Intensidade

**Lei de Biot-Savart**

Esta lei exprime o valor da intensidade do campo magnético  $\vec{H}$  em qualquer ponto à distância  $r$  de um condutor rectilíneo, quando atravessado por uma corrente  $I$ .

|                        |       |     |                                   |                    |
|------------------------|-------|-----|-----------------------------------|--------------------|
| $H = \frac{I}{2\pi r}$ | Onde: | $H$ | Intensidade de campo              | Ampère/metro (A/m) |
|                        |       | $r$ | raio da circunferência            | metro (m)          |
|                        |       | $I$ | Intensidade da corrente eléctrica | Ampère (A)         |

A intensidade de campo magnético é directamente proporcional à intensidade da corrente e inversamente proporcional à distância. O seu valor resulta do quociente entre uma intensidade de corrente e uma medida de comprimento, o que justifica a **unidade SI de excitação magnética de ampère/metro (A/m)**.



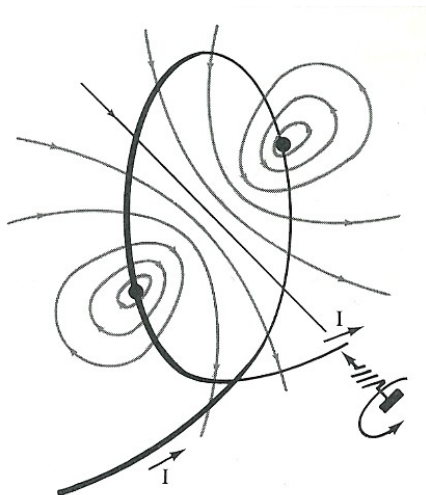
## CORRENTE CIRCULAR

Uma corrente circular é conseguida, na prática, por uma espira circular.

### ➤ Configuração do campo

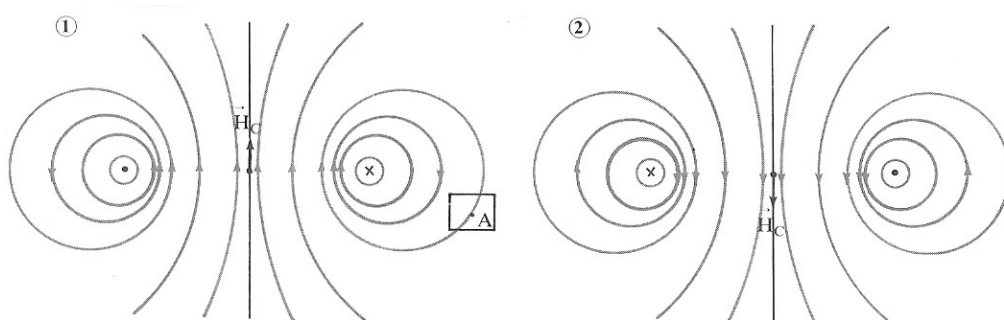
As linhas de força são concêntricas e normais em cada ponto do condutor. No seu conjunto e apreciadas em qualquer plano que contenha o eixo da espira, têm sentido concordante no seu interior e sentido oposto fora dela.

Podemos ainda ver que o campo é mais intenso junto a cada um dos condutores, onde verificamos maior concentração das linhas de força (figura do lado). Não são exactamente circunferências centradas em cada um dos condutores, dada à interacção das linhas de força.



### ➤ Sentido

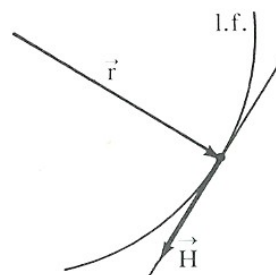
Regra do saca-rolhas



O sentido das linhas de força é o da progressão de um saca-rolhas colocado segundo o eixo da espira e girendo no sentido da corrente

### ➤ Intensidade

O valor da intensidade de campo  $H$  no centro da espira é calculado pela seguinte expressão:



|                    |       |     |                                   |                    |
|--------------------|-------|-----|-----------------------------------|--------------------|
| $H = \frac{I}{2r}$ | Onde: | $H$ | Intensidade de campo              | Ampère/metro (A/m) |
|                    |       | $r$ | raio da circunferência            | metro (m)          |
|                    |       | $I$ | Intensidade da corrente eléctrica | Ampère (A)         |

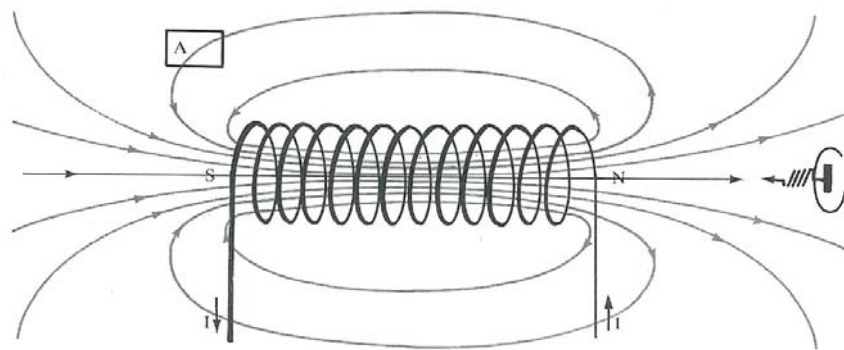
Donde se pode concluir que

O campo magnético é, para a mesma corrente, mais intenso do que o campo resultante de uma corrente rectilínea.

### SOLENÓIDE

Um solenóide ou bobina é um enrolamento formado por um conjunto de espiras paralelas, com o mesmo diâmetro e secção.

#### ➤ Configuração do campo



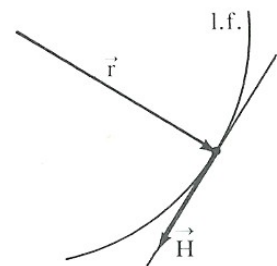
É análogo ao de um íman recto, correspondendo as suas extremidades às respectivas regiões polares (ver figura anterior). Nela se representam as linhas de força segundo um plano axial, podendo assim concluir-se que:

No interior do solenóide o campo é uniforme, posto em evidência pelo paralelismo das linhas de força.

No seu interior também é mais intenso o campo magnético, como se pode concluir pela maior concentração das linhas de força.

#### ➤ Sentido

### Regra do saca-rolhas de Maxwell



Um saca-rolhas disposto segundo o eixo do solenóide, rodando no sentido da corrente, progride segundo estas.

### ➤ Intensidade

Num solenóide cujo comprimento é significativamente maior que o seu diâmetro, a intensidade do campo no seu interior é calculada pela seguinte expressão:

|                    |       |     |                                   |            |
|--------------------|-------|-----|-----------------------------------|------------|
| $H = \frac{NI}{l}$ | Onde: | $N$ | Número de espiras                 |            |
|                    |       | $l$ | comprimento do solenóide          | metro (m)  |
|                    |       | $I$ | Intensidade da corrente eléctrica | Ampère (A) |

Dela se conclui que o campo magnético é directamente proporcional à intensidade da corrente e a número de espiras, e inversamente proporcional ao seu comprimento.

Dando uma outra forma à expressão anterior, temos que:

$$H \times l = N \times I$$

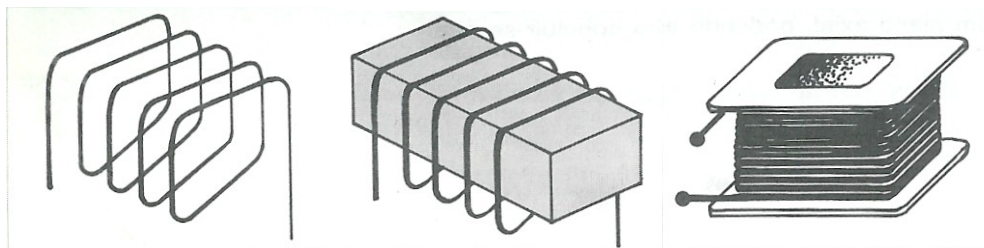
Podemos então enunciar o seguinte teorema, conhecido como **teorema de Ampère**:

A circulação do vector  $H$  ao longo de uma linha de força é numericamente igual ao produto do número de espiras por ela abraçadas pela intensidade da corrente.

Para a mesma corrente, o campo no interior do solenóide é mais intenso do que em qualquer das situações anteriormente estudadas, dada a acção manetizante da corrente vir agora reforçada pelo maior número de espiras existentes.

Sendo o número de espira uma grandeza sem dimensões, em nada alterará exprimirmos a unidade de intensidade de campo magnético em **ampère × espira por metro**, o que tem a vantagem de a identificar com o campo criado por um solenóide.

## Formatos de Bobinas



Constituem ainda bobinas outros enrolamentos não necessariamente helicoidais, podendo ter secção quadrada, rectangular, etc (figura anterior). Podem ser unicamente constituídas pelo enrolamento, ou então ser construídas sobre matéria isolante, como cartão, madeira ou plástico, e possuírem ou não núcleo ferromagnético. Este último destina-se a intensificar as acções magnéticas do campo.

O fio condutor é, normalmente, em cobre esmaltado isolado por verniz especial ou, quando as tensões de serviço são elevadas, as camadas de espiras são isoladas umas das outras por tela, mica ou outros materiais com idênticas características dieléctricas.

## TORÓIDE

Um toróide ou solenóide toroidal é um enrolamento feito sobre um núcleo em forma de anel.

### ➤ Configuração do campo

As linhas de força do campo magnético no interior de um solenóide toroidal são circulares e fecham-se através do núcleo, não originando acções magnéticas no exterior.

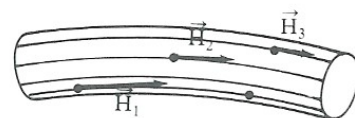
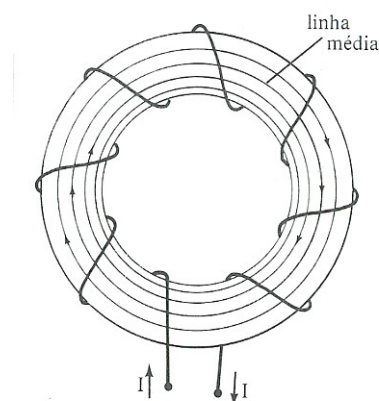
### ➤ Sentido

Regra do saca-rolhas de Maxwell

O sentido das linhas de força é dado pela rotação de um saca-rolhas que rode no sentido da corrente.

### ➤ Intensidade

A intensidade de campo é, como no caso do solenóide, dada pela expressão:

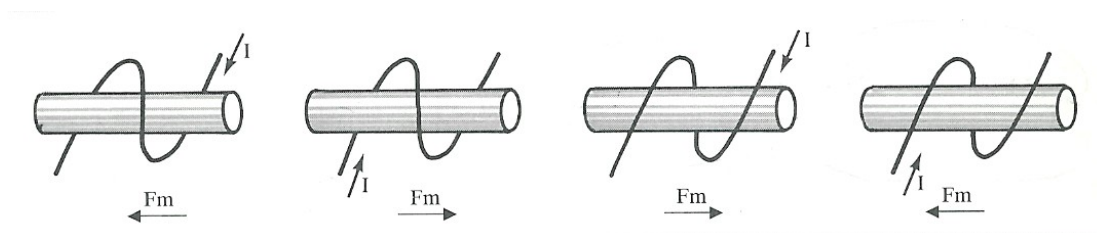


$$H = \frac{NI}{l}$$

Tendo porém em atenção que  $l$  é o comprimento da linha média do toro.

## FORÇA MAGNETOMOTRIZ

| GRANDEZA                     |              |               |             |
|------------------------------|--------------|---------------|-------------|
| DESIGNAÇÃO                   | SÍMBOLO      | UNIDADE SI    | ABREVIATURA |
| Força magnetomotriz (f.m.m.) | $F_m$ ou $F$ | Ampere espira | A.e         |



O efeito magnetizante da corrente será tanto maior quanto maior for o número de espiras da bobina. Chama-se força magnetomotriz ao produto do número de espiras pela intensidade da corrente. Nota-se pela

letra  $\mathcal{F}$  e a sua unidade no sistema internacional é o ampére-espira. A equação de definição é:

$$\mathcal{F} = N \times I$$

Nos quatro casos exemplificados na figura anterior mostra-se o sentido desta força criado por uma bobina e definido em cada um deles pelos sentidos da corrente e do enrolamento.

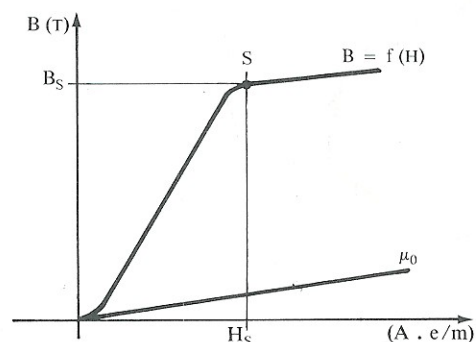
## PERMEABILIDADE RELATIVA E ABSOLUTA

A permeabilidade magnética  $\mu$  duma substância pode considerar-se como o produto de dois factores, como mostra a expressão:

|                            |       |         |                                                                                                                                                                                       |             |
|----------------------------|-------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| $\mu = \mu_r \times \mu_0$ | Onde: | $\mu$   | Permeabilidade da substância                                                                                                                                                          |             |
|                            |       | $\mu_0$ | permeabilidade absoluta do vazio                                                                                                                                                      | henry/metro |
|                            |       | $\mu_r$ | Permeabilidade relativa do meio em questão. Representa o número de vezes que a permeabilidade desse meio é maior que a permeabilidade magnética do vazio. É uma grandeza adimensional |             |

## CURVA DE 1ª MAGNETIZAÇÃO

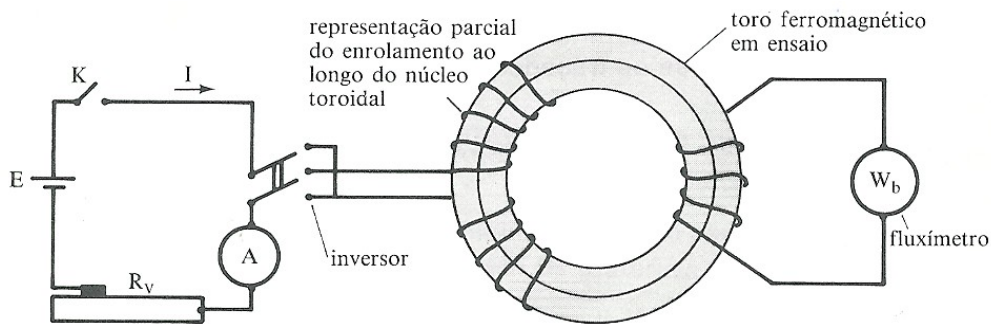
Nos meios ferromagnéticos a permeabilidade magnética não é um valor constante. Depende não apenas da intensidade do campo, como do passado magnético do material, isto é, se sofreu ou não magnetizações anteriores. Como  $\mu$  não é constante, a função  $B = \mu H$  não é linear. Graficamente é uma curva, designada **curva de 1ª magnetização ou de magnetização inicial** (figura do lado).



Nos materiais não magnéticos, pelo contrário, a permeabilidade é constante e o seu gráfico é evidentemente uma recta cuja inclinação mede o seu valor.

Na figura do lado desenhou-se ainda a recta que caracteriza a magnetização do vazio, meio não magnético, como sabemos.

Para o seu traçado utilizamos uma montagem como mostra a figura seguinte. O núcleo da bobina toroidal constitui o material de ensaio, sendo requisito nunca ter sido magnetizado.



Numa curva de 1ª magnetização podemos distinguir **4 regiões**:

Inicialmente, uma ligeira concavidade onde a permeabilidade sofre um ligeiro aumento.

Seguidamente, **uma parte rectilínea onde a permeabilidade é constante**. Nesta zona qualquer aumento da excitação é acompanhada por um aumento proporcional da indução.

Na terceira parte da curva, a permeabilidade magnética diminui rapidamente até à saturação magnética do material (**ponto S da curva**).

A partir do ponto S, aumentos progressivos da excitação pouco modificam o valor da indução. A curva aproxima-se assintoticamente da recta, cuja inclinação é igual à da característica do vazio. Nesta situação o material está já destituído de propriedades magnéticas.

## HISTERESE

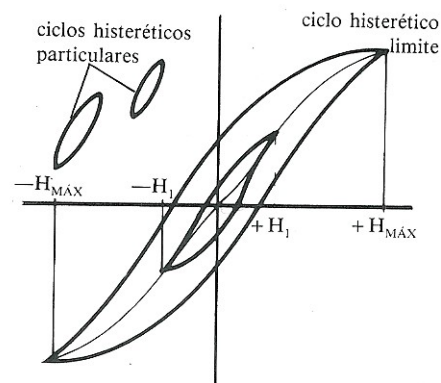
Partindo duma situação inicial que nos leva ao traçado da curva de 1ª magnetização, limitemos a excitação do campo a um dado valor que não ultrapasse o correspondente à saturação magnética do material. Se seguidamente diminuirmos a sua intensidade, verificaremos que os valores da indução correspondentes a cada valor do campo são superiores aos iniciais.

Designa-se por histerese o atraso verificado entre os valores da indução e os da excitação do campo em todo o seu intervalo de variação.

## CICLO HISTERÉTICO

Se fizermos variar constantemente o campo entre valores simétricos de  $H$  inferiores à saturação, por exemplo no intervalo

$[-H_1, +H_1]$ , a curva  $B = f(H)$  descreve um ciclo fechado simétrico em relação à origem, como se mostra na figura do lado, designado or ciclo histerético. Nele podemos ver como em qualquer dos quadrantes a indução não acompanha o andamento do campo.



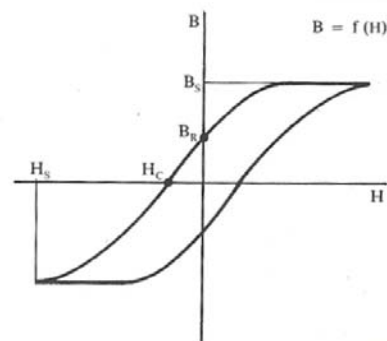
Os valores negativos da excitação conseguem-se por inversão do sentido da corrente magnetizante.

Podemos obter tantos ciclos histeréticos quantos os limites fixados para a variação do campo, isto é, em número infinito. Mesmo assim não podemos exceder um determinado valor de  $H$  correspondente à saturação. Para tal valor corresponde um ciclo de área máxima, designado por ciclo histerético limite.

## VALORES CARATERÍSTICOS DA HISTERÉSE

Alguns valores assumidos pelas grandzas  $B$  e  $H$  são particularmente importantes, constituindo características que distinguem os materiais ferromagnéticos e definem o campo da sua utilização.

Na figura seguinte encontram-se assinaladas essas características sobre ciclo histerético limite.



### Excitação de saturação $H_S$

Valor a partir do qual qualquer variação da excitação magnética pouco influenciará o valor da indução. Corresponde ao máximo valor de  $H$  no ciclo histerético limite.

### Indução de saturação $B_S$

Valor de indução correspondente à excitação de saturação

### Campo remanente $B_R$

Quando a excitação do campo é levada a zero, situação em que a corrente magnetizante é nula, no material subsiste ainda um determinado valor de indução. Isto significa que o material ainda se conserva magnetizado.

O valor da indução, neste caso, chama-se indução remanescente, campo remanente ou remanência.

### Força coerciva $H_C$

Chama-se força coerciva ao valor  $H_C$  a que é necessário levar a excitação de forma a que se anule a indução. Ao levar novamente a corrente a zero e com ela a excitação, o material recuperará parte da sua magnetização, pelo que, para que este fique completamente desmagnetizado, será necessário obrigá-lo a percorrer ciclos gradualmente mais pequenos.

### PERDAS POR HISTERÉSE

Todo o material sujeito a magnetizações alternadas acaba por aquecer, perdendo energia.

Estas perdas são devidas à histerése e são proporcionais à:

Área do ciclo histerético por unidade de volume;  
Frequência da corrente.

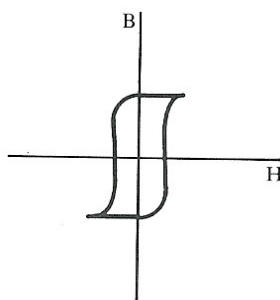
Esta relação é posta em evidência pela **fórmula de Steinmetz**:

|                               |       |       |                                                                              |         |
|-------------------------------|-------|-------|------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $P_h = K \cdot f \cdot B_M^2$ | Onde: | $B_M$ | Máximo valor do campo magnético,<br>proporcional à área do ciclo histerético | $T$     |
|                               |       | $f$   | Frequência da corrente magnetizante                                          | $H_e$   |
|                               |       | $K$   | Constante própria que caracteriza o tipo de ferro                            |         |
|                               |       | $P_h$ | Perdas por histerese                                                         | $W/k_g$ |

## SELECÇÃO DE CARACTERÍSTICAS NOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

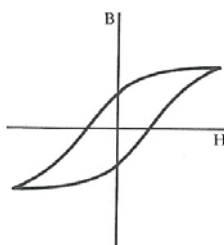
Consoante a utilização em vista, assim serão seleccionadas as características.

Em aplicações condicionadas por campos magnéticos de pequena intensidade, como acontece no domínio das telecomunicações, recorre-se a materiais de elevada permeabilidade inicial, de forma a conseguirem-se valores significativos de indução.

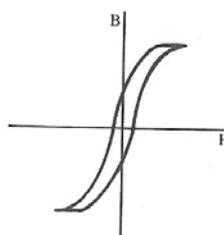


No fabrico de electroímãs e memórias para computadores, como veremos mais tarde, em que interessa uma magnetização que dure somente o tempo de passagem da corrente, são necessários materiais de fraca remanência e pequena força coerciva.

Nos ímanes permanentes, pelo contrário, interessa uma grande remanência e força coerciva.

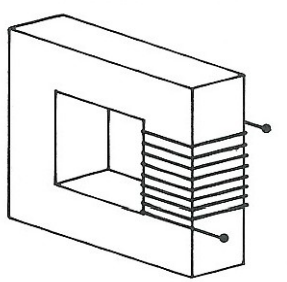


Um grande número de máquinas eléctricas, como motores, alternadores, transformadores, etc, cujos componentes estão sujeitos a variações alternadas de campo, devem possuir ciclo histerético estreito para minimizar as perdas por histerese.

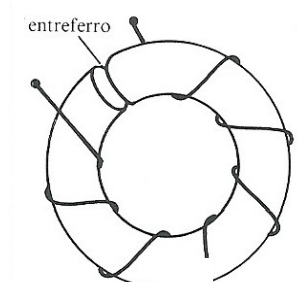


## CIRCUITO MAGNÉTICO

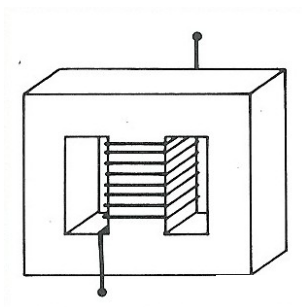
Designa-se por circuito magnético todo o percurso das linhas de força incluindo o próprio meio ou meios onde elas se estabelecem.



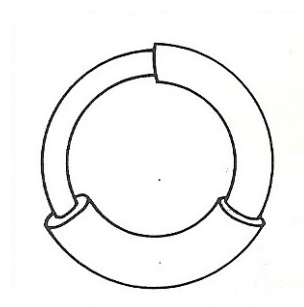
A



C



B



D

Nas figuras anteriores representam-se alguns circuitos típicos e de uso frequente em electrotecnia.

## CLASSIFICAÇÃO

Podemos classificar os diferentes circuitos magnéticos encontrando o seu enquadramento em cada um dos seguintes grupos:

**A**
**Homogéneo  
Heterogéneo**
**B**
**Com Entreferro  
Sem Entreferro**
**C**
**Série  
Derivação**

Diz-se homogéneo um circuito constituído por um só material e uma só secção em toda a sua extensão. A indução, consequentemente, será constante em qualquer dos seus pontos, (Ex.:figs A e B).

A existência de uma pequena zona de ar que, em muitos casos, interrompe a continuidade do núcleo e que se destina a fazer o aproveitamento do campo, designa-se por entreferro.

Dos circuitos apresentados apenas o da figura C possui entreferro.

O circuito da figura B é um circuito em derivação. Os restantes são circuitos em série.

## LEI DE HOPKINSON

A lei de Hopkinson estabelece matematicamente uma relação entre a f.m.m. no circuito e o fluxo magnético por ela originado:

|                                          |       |               |                      |                            |
|------------------------------------------|-------|---------------|----------------------|----------------------------|
| $\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\phi}$ | Onde: | $\mathcal{R}$ | Relutância magnética | Ampere.espira/weber(Ae/Wb) |
|                                          |       | $\mathcal{F}$ | Força magnetomotriz  | Ae                         |
|                                          |       | $\phi$        | Fluxo magnético      | Wb                         |

$\mathcal{R}$  designa-se por relutância magnética. Esta expressão é idêntica à que traduz a lei de Ohm nos circuitos eléctricos.

É importante salientar que esta expressão não pode ser utilizada no cálculo da maioria dos circuitos magnéticos, em virtude da relutância não ser constante, mas função da intensidade do campo.

O seu domínio de aplicação está limitado aos meios não ferromagnéticos ou então aos meios ferromagnéticos cujo funcionamento se situa na região linear da curva de 1ª magnetização, onde a permeabilidade magnética é constante, como sabemos.

## RELUTÂNCIA

A relutância de um circuito magnético é uma medida da sua resistência magnética, ou seja, a dificuldade que ele próprio oferece ao estabelecimento das linhas de força do campo.

| GRANDEZA             |                        |                     |             |
|----------------------|------------------------|---------------------|-------------|
| DESIGNAÇÃO           | SÍMBOLO                | UNIDADE SI          | ABREVIATURA |
| Relutância magnética | $R_m$ ou $\mathcal{R}$ | Ampere.espira/weber | A.e/Wb      |

É, de alguma forma, comparável à resistência eléctrica de um circuito eléctrico.

## Demonstração da lei de Hopkinson

Sabemos que  $B = \frac{\phi}{S}$  e  $H = \frac{NI}{l}$

Como  $B = \mu H$ , podemos escrever  $\frac{\phi}{S} = \mu \frac{NI}{l}$

Como  $\mathcal{F} = NI$ , então  $\phi = \mu \frac{S}{l} \mathcal{F}$

Se fizermos  $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$ , temos finalmente:  $\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\phi}$  c.q.d.

## CÍRCUITOS MAGNÉTICOS E ELÉCTRICO

## ANALOGIAS

Da semelhança entre a lei de Hopkinson  $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$  e a lei de Ohm  $R = \frac{l}{\sigma S}$ , podemos comparar as grandezas existentes num e noutro caso:

A f.m.m. do circuito magnético equivale à f.e.m. do circuito eléctrico;

O fluxo de indução magnética à intensidade da corrente eléctrica;

A relutância à resistência eléctrica

A relutividade magnética de um material à resistência específica.

Pelo que analogamente se pode escrever:

Nos circuitos magnéticos  $\mathcal{R} = \gamma \frac{l}{S}$  nos circuitos eléctricos  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

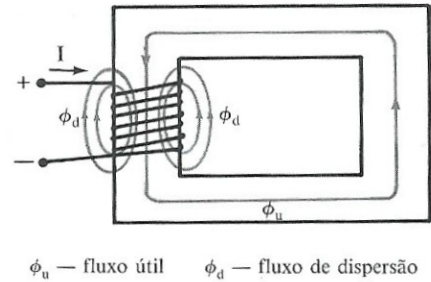
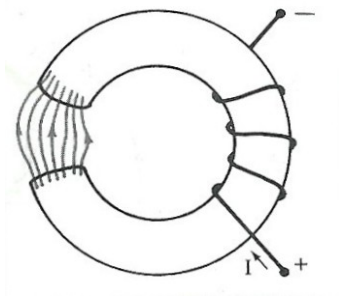
## DIFERENÇAS

No circuito eléctrico a intensidade da corrente correspondente a um real movimento de electrões, enquanto

que o fluxo magnético não tem carácter dinâmico.

A resistência eléctrica é constante, o mesmo não acontece com a relutância.

## DISPERSÃO MAGNÉTICA



Embora o trajecto das linhas de força seja definido pela configuração do circuito magnético do núcleo, estabelecendo-se no seu interior, existem contudo regiões onde algumas dessas linhas sofrem deflexão, fechando-se parcialmente pelo ar (figuras anteriores). O fenómeno ocorre em todas as regiões da fronteira, sendo particularmente importante nos entreferros. Ocorre igualmente na região envolvente duma bobina de excitação.

Do **fluxo total**  $\Phi_t$ , podemos então distinguir um **fluxo útil**  $\Phi_u$ , que se fecha através do núcleo, e um **fluxo de dispersão**  $\Phi_d$ , que é de fugas, em que:

$$\Phi_t = \Phi_u + \Phi_d$$

### FACTOR DE DISPERSÃO

O fluxo de dispersão é relativamente pequeno quando comparado com o fluxo total. O quociente entre ambos define-se como o **factor de dispersão**  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{\Phi_d}{\Phi_t}$$

É praticamente inexistente num circuito homogéneo, como é o caso de um solenoide toroidal.

## CÁLCULO DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS

É essencial no projecto de equipamentos electromagnéticos, como, por exemplo, electroímans, núcleos de transformadores, etc.

Em todo esse cálculo desprezamos o fluxo de dispersão, o que nos permite considerar que

O fluxo mantém-se constante em todo o circuito magnético não derivado.

Na impossibilidade, na maioria dos casos, de aplicar a lei de Hopkinson, uma vez que a permeabilidade é uma função do campo, utilizamos uma expressão já nossa conhecida, que corresponde à generalização do teorema de Ampère, em que:

$$Hl = NI$$

Como nos circuitos heterogéneos existem troços com valores distintos de  $H$ , aplicamos a referida expressão em cada um deles e então:

$$\sum Hl = \sum NI$$

### PROCESSO DE CÁLCULO

Conhecido o valor da indução  $B$ , determina-se o correspondente valor de  $H$  a partir da curva de 1ª

magnetização. O produto de  $H$  pelo comprimento  $l$  do troço respectivo dá-nos o valor da f.m.m.  $\mathcal{F} = N \cdot I$ .

Geralmente é conhecido  $N$  ou  $I$ , pelo que um simples quociente dá-nos o valor da outra grandeza.

Indicações gerais

Todas as peças são cotadas em milímetros

Cada um dos troços dos circuitos apresentados foi referenciado com uma letra, para fácil identificação.

**CIRCUITO HOMOGÉNEO (SÉRIE)**

O circuito da figura ao lado representa o núcleo de uma bobina de 150 espiras, construído em chapa de ferrossilício. Determinar a intensidade da corrente necessária para criar uma indução de **1,5T**.

**Resolução:**

$H_{fe}$  Excitação no ferro

Da curva de 1ª magnetização do **FeSi**

$$B_{fe} = 1,5T \rightarrow H_{fe} = 1800 \text{ Ae/m}$$

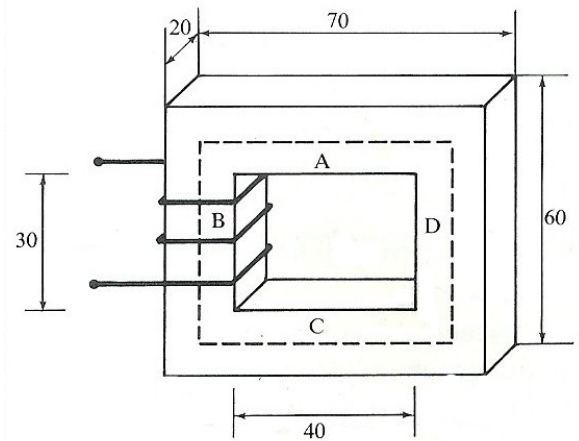
$l_{fe}$  Comprimento da Linha média do núcleo

$$l_{fe} = l_A + l_B + l_C + l_D = 55 + 45 + 55 + 45 = 200\text{m}$$

$$l_{fe} = 0,2\text{m}$$

Aplicando o teorema de Ampère  **$HI = NI$**

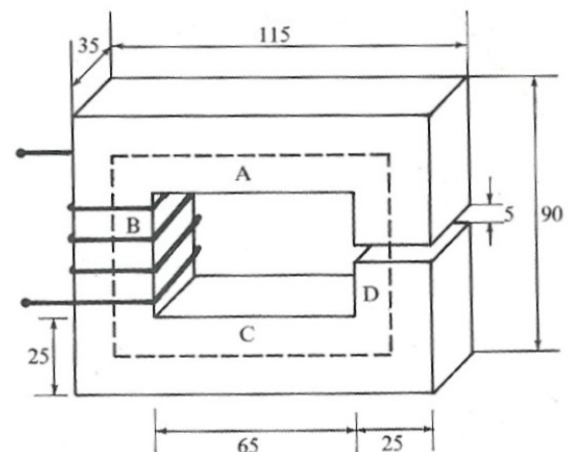
$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{1800 \times 0,2}{150} = 2,4 \text{ A}$$

**CIRCUITO HETEROGÉNEO COM SECÇÃO CONSTANTE**

Pretende-se calcular o número de espiras que deve abraçar o troço do núcleo de um electroímã em chapa de ferrossilício, como se representa na figura ao lado, para que no entreferro se obtenha uma indução de **1,6T** com uma corrente de **15A**.

Resolução:

As secções do núcleo e do entreferro são iguais, pelo que as



induções também, isto é,  $B_{fe} = B_{ar} = 1,6T$ .

Existem contudo dois meios distintos, com diferentes valores de permeabilidade, portanto com diferentes valores de  $H$ .

$$B_{ar} = \mu_0 H_{ar}$$

$$H_{ar} = \frac{1,6}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 12,7 \times 10^3 A \cdot e/m$$

$$l_{ar} = 0,005m = 5 \times 10^{-2}m$$

Recorrendo à curva de 1ª magnetização

$$B_{fe} = 1,6T \rightarrow H_{fe} = 3000 A \cdot e/m$$

$$l_{fe} = l_A + l_B + l_C + l_D = 90 + 65 + 90 + 60 = 305mm = 0,305m$$

$$\sum Hl = H_{fe}l_{fe} + H_{ar}l_{ar} = 3000 \times 0,305 + 12,7 \times 10^3 \times 5 \times 10^{-2} = 7265 A \cdot e$$

$$\sum Hl = \sum NI \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow N = \frac{Hl}{I} = \frac{7265}{15} = 484 \text{ espiras}$$

**CIRCUITO HETEROGÉNEO COM SECÇÕES E NATUREZAS DIFERENTES**

Calcular a intensidade da corrente necessária para criar uma indução de 1,3T no entreferro dum núcleo d aço vazado, como se representa na figura do lado. Considere N=1000 espiras.

Resolução:

$$B = \mu_0 H$$

$$H_{ar} = \frac{1,3}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 10,35 \times 10^5 \text{ A.e/m}$$

$$l_{ar} = 0,008\text{m} = 8 \times 10^{-3}\text{m}$$

$H_B$  e  $H_D$  Recorrendo à curva de 1ª magnetização

$$B_B = B_D = 1,3T \rightarrow H_B = H_D = 1700 \text{ A.e/m}$$

$$l_B = 0,085\text{m}$$

$$l_D = 0,077\text{m}$$

$H_A$  e  $H_C$  Determinemos o fluxo constante no circuito

$$\Phi = B_{ar} S_{ar}$$

$$S_{ar} = 0,03^2 = 0,0009\text{m}^2 = 9 \times 10^{-4}\text{m}^2$$

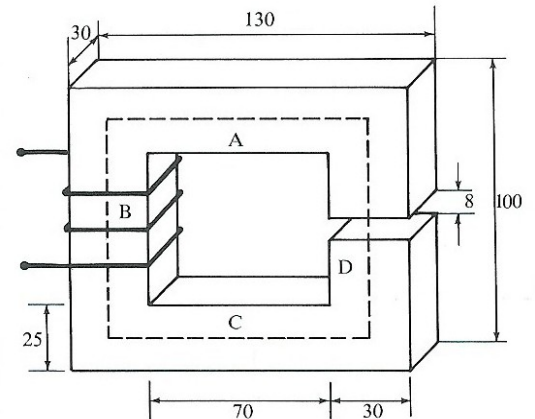
$$\Phi = 1,3 \times 9 \times 10^{-4} = 11,7 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

Determinemos a indução nos troços A e C

$$B_A = B_C = \frac{\Phi}{S}$$

$$S = S_A = S_C = 0,025 \times 0,03 = 7,5 \times 10^{-4}\text{m}^2$$

$$B_A = B_C = \frac{11,7 \times 10^{-4}}{7,5 \times 10^{-4}} = 1,56T$$



Da curva de 1ª magnetização:

$$B = 1,56T \rightarrow H_A = H_C = 3800 \text{ A.e/m}$$

$$l_A = l_C = 0,1m$$

$$\sum Hl = 2 \times H_A l_A + H_B \times (l_B + l_D) + H_{ar} l_{ar} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sum Hl = 2 \times 3800 \times 0,1 + 1700 \times (0,075 + 0,067) + 10,35 \times 10^3 \times 8 \times 10^{-2} \Leftrightarrow \sum Hl = 9281 \text{ A.e}$$

$$I = \frac{\sum Hl}{N} = \frac{9281}{1000} = 9,2A$$

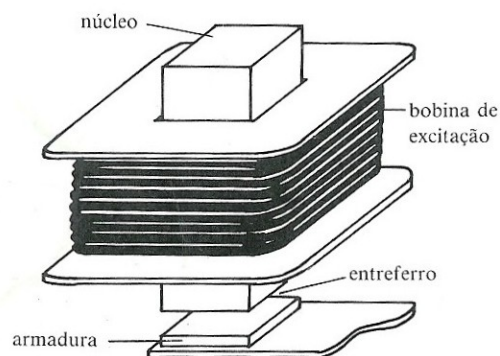
## ELECTROÍMANES

### CONSTITUIÇÃO

O electroíman é, fundamentalmente,

Um enrolamento feito sobre um núcleo ferromagnético, interrompido por uma pequena região de ar, designada por entreferro

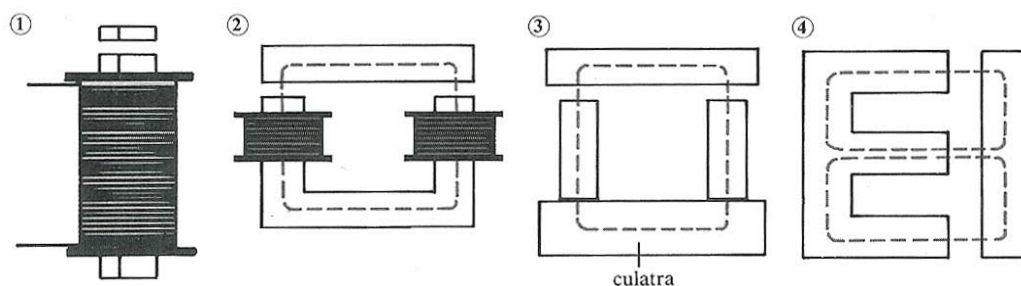
Existe ainda uma peça que, sob a acção da corrente na bobina de excitação, sofre uma atracção e que se designa por armadura.



## FORMAS USUAIS E APLICAÇÕES

É grande o número de tipos e modelos de electroímanes que respondem às múltiplas solicitações. Podem assim sistematizar-se:

### Electroímanes de núcleo fixo



Pelo seu emprego generalizado, referimos:

Electroíman recto – fig.1

Electroíman em U – fig.2

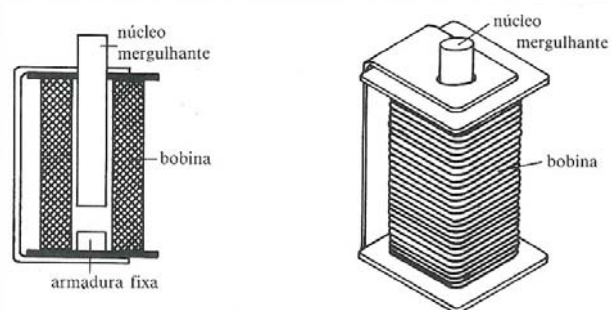
Electroíman de três peças – fig.3

Electroíman EI – fig.4

Deve salientar-se que, no caso do núcleo do electroíman possuir o enrolamento de excitação repartido pelos seus ramos, o respectivo sentido deve ser contrário em cada um deles, para que não se anulem os seus efeitos.

### Electroímanes de núcleo móvel

O modelo mais característico é o electroíman de núcleo mergulhante, que satisfaz as aplicações que requerem um apreciável movimento da armadura. Ex.: automático de escada, disjuntores, etc.



### Electroímanes polarizados

Aproveitando a magnetização própria de um íman em U, o electroíman polarizado reforça a sua acção magnetizante, sobrepondo a cada um dos braços do núcleo um enrolamento com sentido apropriado.

**FORÇA ATRACTIVA**

**Define-se força atractiva de um electroímã como a força necessária para soltar a respectiva armadura quando atraída.**

É calculada pela seguinte expressão:

|                            |       |     |                                              |           |
|----------------------------|-------|-----|----------------------------------------------|-----------|
| $F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$ | Onde: | $B$ | Indução                                      | Tesla (T) |
|                            |       | $S$ | Superfície total de contacto núcleo armadura | $m^2$     |
|                            |       | $F$ | Força atractiva                              | N         |

Se se trata de um ímã recto,  $S$  é a superfície do pólo. Para um ímã em U,  $S$  representa a área somada de ambos os pólos. Naturalmente, um ímã em U do mesmo material e da mesma secção que um ímã recto desenvolverá uma força atractiva dupla.

## FORÇAS ELECTROMAGNÉTICAS

Designam-se por forças electromagnéticas as forças resultantes da interacção dos campos magnéticos e eléctricos.

Sendo facto que toda a corrente eléctrica origina um campo magnético, será de esperar a sua composição com outro campo que lhe esteja próximo, seja este devido a um íman ou ainda a uma nova corrente. Dessa interacção resultarão acções mecânicas que actuarão sobre o condutor ou condutores mergulhados nesse campo.

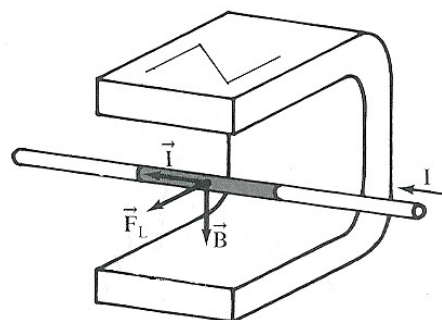
### ACÇÃO DE UM CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UMA CORRENTE (FORÇA DE LAPLACE)

Consideremos um condutor eléctrico disposto perpendicularmente às linhas de força de um campo magnético uniforme (figura do lado).

Ao ser percorrido por uma corrente, o condutor vai ser actuado por uma força designada por **força de Laplace**.

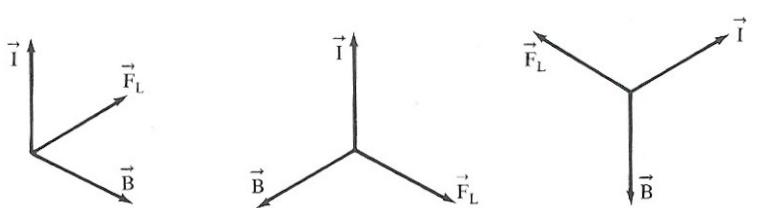
Num ponto P o condutor e nas condições da figura, representam-se os vectores  $\vec{B}$ , indução magnética,  $\vec{I}$ ,

intensidade da corrente eléctrica e  $\vec{F}_L$ , **força de Laplace**.



#### Sentido

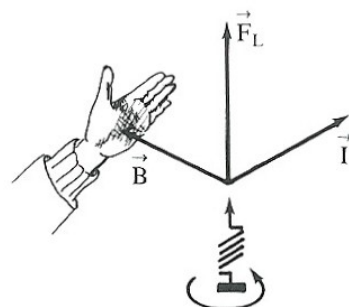
A **força de Laplace** é normal ao plano que contem os vectores  $\vec{I}$  e  $\vec{B}$ . O sentido desta força é o da progressão de um saca-rolhas que rode de  $\vec{I}$  para  $\vec{B}$  (figura seguinte).



Alternativamente, podemos aplicar a seguinte regra:

Regra da mão esquerda de Fleming (figura ao lado)

Colocando a mão esquerda estendida no sentido da corrente, de tal forma que as linhas de força entrem pela palma da mão, o polegar apontará o sentido da força



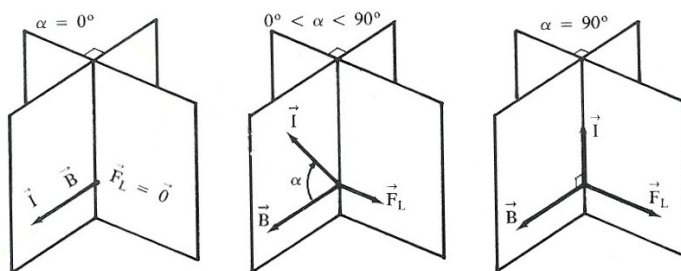
### Grandeza

A força de Laplace é directamente proporcional à indução magnética, à intensidade da corrente e ao comprimento activo do condutor, isto é, à porção deste submetido à acção do campo, o que matematicamente se resume na seguinte **expressão, válida apenas quando a corrente atravessa perpendicularmente o campo.**

|           |       |     |                                |            |
|-----------|-------|-----|--------------------------------|------------|
| $F = BIl$ | Onde: | $F$ | Força de Laplace               | Newton (N) |
|           |       | $B$ | Indução magnética              | Tesla (T)  |
|           |       | $I$ | Intensidade da corrente        | Ampère (A) |
|           |       | $l$ | Comprimento activo do condutor | metros (m) |

Generalização da expressão

Para uma amplitude qualquer do ângulo  $\alpha$  entre a corrente e o campo, isto é, entre os vectores  $\vec{I}$  e  $\vec{B}$ , a força continuará a ser normal ao plano formado por ambos e a sua grandeza assim calculada:

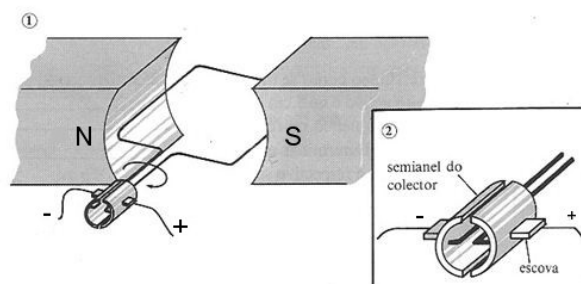


$$F = BIl \sin \alpha$$

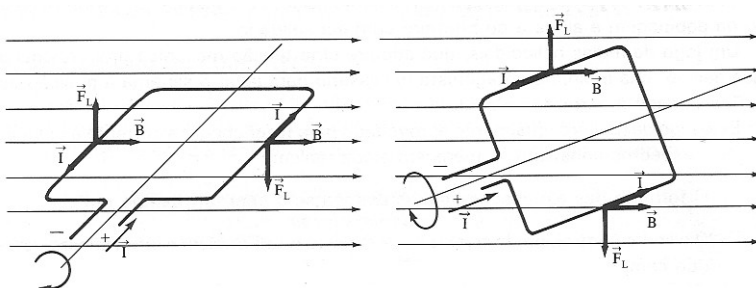
## APLICAÇÕES DA FORÇA DE LAPLACE

### Motores eléctricos

A figura seguinte mostra o princípio de funcionamento de um motor em corrente contínua. Um sistema colector-escovas alimentado a corrente contínua, permite fazer chegar à espira uma corrente sempre no mesmo sentido. Esta é livre de rodar no interior de um campo magnético uniforme criado por um íman.

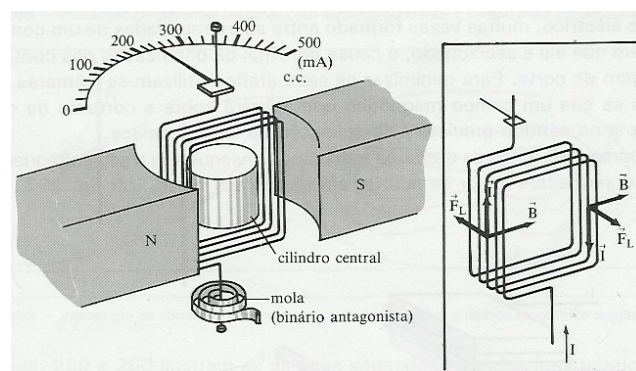


Nas condições da figura, (em baixo), é fácil concluir o sentido da força de Laplace em cada um dos seus lados. Nas regiões de topo é nula e nas regiões transversais têm sentidos opostos e são iguais em grandeza. Cria-se assim um binário motor que fará rodar a espira no sentido indicado.



### Aparelhos de medida

Na figura ao lado ilustra-se a constituição e o princípio de funcionamento de um amperímetro de quadro móvel para trabalhar em corrente contínua. É fundamentalmente constituído por uma bobina móvel que, sob a acção conjunta da corrente e do campo magnético onde está inserida, vai rodar actuada pela força de Laplace. O deslocamento da bobina, assim como o do cilindro central, que constitui o respectivo núcleo, é proporcional ao valor da intensidade da corrente e é a todo o momento referenciado pelo desvio de um ponteiro que completa a equipagem móvel do aparelho.



O deslocamento da bobina, assim como o do cilindro central, que constitui o respectivo núcleo, é proporcional ao valor da intensidade da corrente e é a todo o momento referenciado pelo desvio de um ponteiro que completa a equipagem móvel do aparelho.

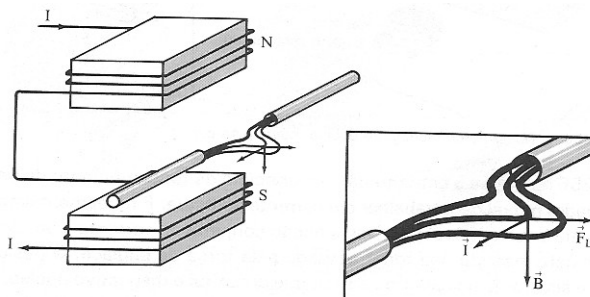
Cessando a corrente, cessa igualmente a força electromagnética que produz o desvio da equipagem e ainda a do ponteiro com ela solidário.

Um jogo de molas helicoidais, que adquire uma tensão mecânica proporcional a esse desvio, cria o binário antagonista necessário para levar o sistema à posição de partida quando a corrente se anula.

Este jogo de molas é igualmente aproveitado para fazer chegar a corrente à bobina.

### Electroímãs de sopro magnético

O arco eléctrico, muitas vezes formado entre as extremidades de um condutor no instante em que ele é seccionado, é causa principal da danificação dos contactos da aparelhagem de corte. Para minimizar os seus efeitos utilizam-se câmaras de corte nas quais se cria um campo magnético que actuará sobre a corrente de descarga alongando-a no sentido previsto pela lei de Laplace.



O percurso mais longo da descarga tem como consequência o seu enfraquecimento, cujo efeito será ainda maior se ocorrer em atmosfera inerte.

## ACÇÕES ELECTRODINÂMICAS

### Interacção entre correntes

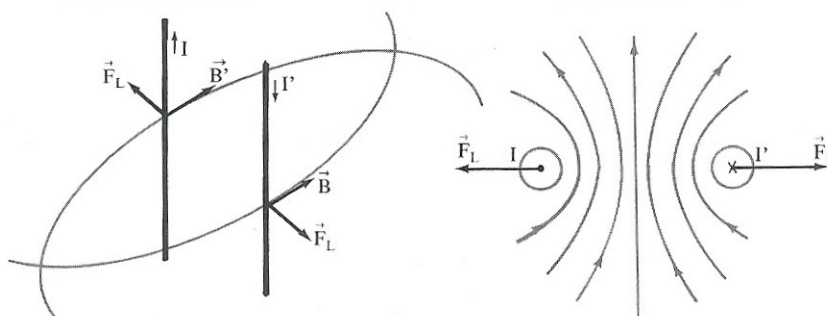
Duas correntes suficientemente próximas vão ser actuadas por forças electromagnéticas que resultam da acção mútua dos campos electromagnéticos por elas criados.

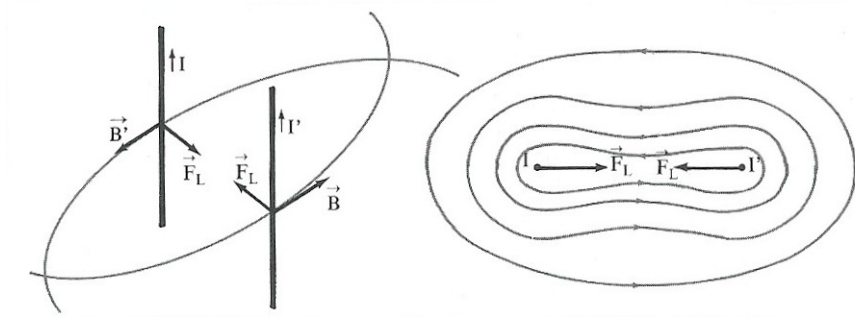
As acções electrodinâmicas mútuas entre correntes podem assim resumir-se:

Duas correntes rectilíneas paralelas

Do mesmo sentido atraem-se;

De sentidos opostos repelem-se.





Nas figuras anteriores ilustram-se as duas situações referidas, mostrando-se também como a aplicação da lei de Laplace nos permite interpretar os resultados. Notar que para cada par de condutores as forças que se desenvolvem em cada um são iguais em grandeza e têm sentidos opostos, ainda que as correntes tenham diferente grandeza.

A força de Laplace de atracção ou repulsão entre duas correntes paralelas é dada pela expressão:

|                                            |       |           |                            |            |
|--------------------------------------------|-------|-----------|----------------------------|------------|
| $F = 2 \times 10^{-7} I_1 I_2 \frac{l}{d}$ | Onde: | F         | Força electrodinâmica      | Newton (N) |
|                                            |       | d         | distância entre condutores | metros (m) |
|                                            |       | $I_1 I_2$ | Intensidade da corrente    | Ampère (A) |
|                                            |       | l         | Comprimento dos condutores | metros (m) |



## INDUÇÃO ELECTROMAGNÉTICA

O fenómeno de indução electromagnética corresponde ao aparecimento de uma corrente eléctrica, ou pelo menos de uma força electromotriz, num circuito quando este é varrido por um fluxo magnético variável.

Sendo origem de tais correntes alheia ao próprio circuito, são, por esse motivo, designadas **correntes induzidas**. O campo magnético por elas responsável é designado de **campo indutor**.

### CORRENTES INDUZIDAS CONDIÇÕES DO SEU ESTABELECIMENTO

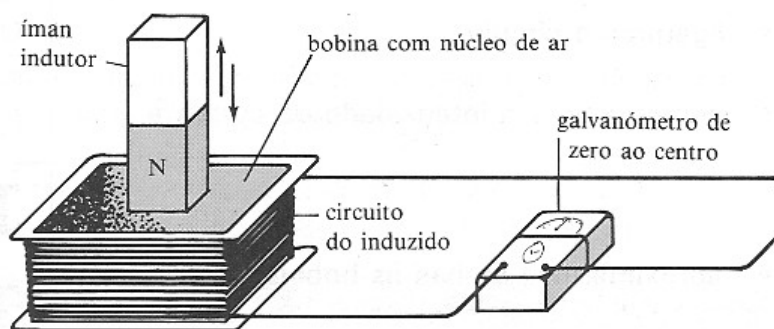
As duas experiências seguintes mostram como obter correntes induzidas num circuito sujeito a uma variação de fluxo e correspondem às duas situações distintas de criar um campo magnético:

#### Devido a ímanes

#### Devido a correntes

Em ambos os casos dispomos de uma bobina com núcleo de ar cujo circuito se fecha através de um galvanómetro de zero ao centro. O circuito assim constituído é um circuito passivo, isto é, não inclui qualquer gerador de corrente.

Variação do campo indutor devido a um íman



Se fizermos variar as posições relativas do íman e da bobina, o que se consegue, por exemplo, com a bobina fixa e o íman a deslocar-se (figura anterior), verificamos que:

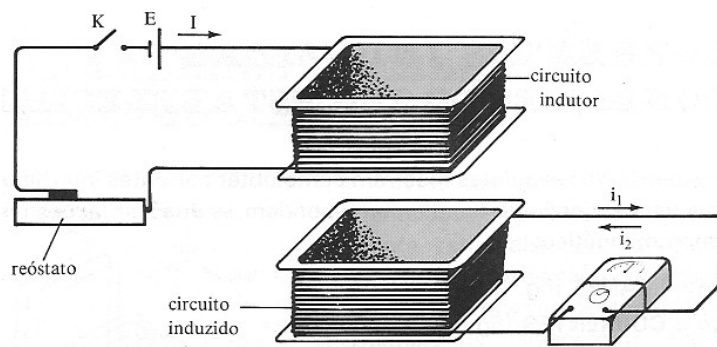
Enquanto durar o movimento de aproximação, o galvanómetro indicará um desvio brusco para um dos lados, acusando a passagem de uma corrente induzida.

No instante em que se dá a inversão do sentido do movimento do íman não há variação de fluxo, não havendo, consequentemente, corrente induzida. O galvanómetro nada acusará.

Durante o movimento de afastamento, o galvanómetro acusará novamente um desvio, mas agora em sentido contrário, indicando a passagem de uma corrente com sentido oposto da situação anterior.

Concluimos, portanto, que só há corrente induzida enquanto houver variação do fluxo indutor.

Variação do campo indutor devido a uma corrente



Aproximemos agora da bobina anterior uma outra cujo circuito independente inclui um resóstato e uma fonte de alimentação em corrente contínua (figura anterior).

Verificaremos que o galvanómetro indicará um determinado desvio quando:

- Ligarmos o circuito;
- Aumentarmos a intensidade da corrente;
- Aproximarmos ambas as bobinas.

O sentido do desvio do galvanómetro é o oposto quando:

- Desligarmos o circuito;
- Diminuirmos a intensidade da corrente
- Afastarmos ambas as bobinas

## LEIS DE FARADAY

As leis de Faraday resumem as conclusões das experiências precedentes e têm o seguinte enunciado:

Qualquer variação de fluxo magnético através de um circuito origina nele uma força electromotriz induzida.

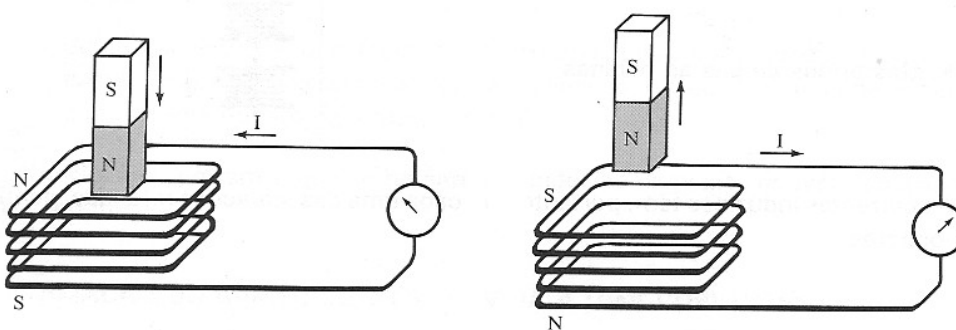
Se esse circuito for fechado, originar-se-á igualmente uma corrente induzida.

A duração da corrente induzida é igual à duração da variação do fluxo indutor

## SENTIDO DA CORRENTE INDUZIDA: LEI DE LENZ

A determinação do sentido duma corrente induzida faz-se por aplicação da lei de Lenz, cujo enunciado é complementar das leis de Faraday:

O sentido da corrente induzida é tal que pela sua acção electromagnética se opõe à variação do fluxo indutor.



## FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DAS LEIS DE FARADAY

As leis de Faraday relacionam a força electromotriz induzida com a variação no tempo do fluxo indutor. Se a variação do fluxo for uniforme, podemos escrever:

|                                                |       |               |                                         |              |
|------------------------------------------------|-------|---------------|-----------------------------------------|--------------|
| $\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ | Onde: | $\mathcal{E}$ | Força electromotriz induzida            | Volt (V)     |
|                                                |       | $\Delta\phi$  | Variação do fluxo indutor               | Weber (Wb)   |
|                                                |       | $\Delta t$    | Intervalo de tempo da variação do fluxo | Segundos (s) |
|                                                |       | $N$           | número de espiras                       | metros (m)   |

O sinal negativo na expressão precedente mostra que a f.e.m. induzida se opõe à variação do fluxo indutor.

Podemos então concluir:

Quanto mais rápida for a variação de fluxo indutor tanto maior será a f.e.m. induzida. Quando maior for a

variação de fluxo indutor maior será a intensidade de corrente induzida.

## CORRENTES DE FOUCAULT

### CONCEITO

Designam-se por **correntes de Foucault** as correntes induzidas em massas metálicas sempre que estas estão submetidas a uma variação de fluxo magnético.

As peças que compõem as máquinas eléctricas, como transformadores, motores, alternadores, etc., são particularmente vulneráveis a este efeito, uma vez que estão sujeitas a uma taxa de variação de fluxo que é o da própria corrente indutora, no nosso caso os 50Hz.

### PÊNDULO DE FOUCAULT

É uma experiência típica que mostra bem a origem e efeito dessas correntes.

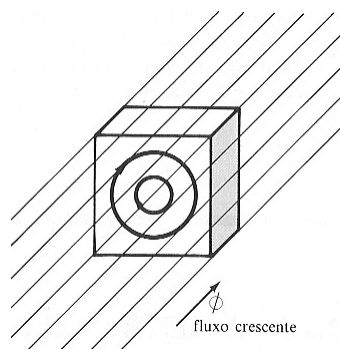
Como se mostra na figura ao lado, existe um pêndulo suspenso por uma haste, em cuja extremidade livre existe um disco metálico, em cobre ou alumínio, por exemplo. É livre de oscilar entre os pólos de um electroímã. Na ausência de excitação, o seu movimento de vaivém não será perturbado. Quando a bobina do electroímã é excitada, o disco metálico, que agora atravessa um campo magnético variável devido ao seu próprio movimento, vai ser sede de correntes induzidas. De acordo com a lei de Lenz, estas correntes opor-se-ão à causa que lhes deu origem, isto é, o movimento do disco, pelo que este acabará por parar.

### CARACTERÍSTICAS

As correntes de Foucault têm características especiais:

**São muito intensas** – toda a massa metálica, para tais correntes, equivale a um circuito eléctrico fechado, de grande secção e, consequentemente de baixa resistência.

**São correntes em remoinho** – estabelecem-se em planos perpendiculares à direcção do fluxo que está na sua origem e fecham-se sobre si próprias. Nas condições da figura ao lado, têm o sentido indicado, que decorre da aplicação da lei de Lenz.



### INCONVENIENTES: PERDAS MAGNÉTICAS

Nas peças onde se instalam, as correntes de Foucault originam perdas de energia apreciáveis por efeito de Joule. Tal como as perdas por histerese, as correntes de Foucault são por unidade de volume, proporcionais

à frequência e ao valor máximo do campo e designam-se conjuntamente por perdas no ferro.

Esta designação diferencia-as das chamadas **perdas no cobre**, que, como sabemos, se devem ao efeito de Joule provocado pela circulação da corrente eléctrica nos condutores de alimentação.

**As perdas no ferro e no cobre são as perdas magnéticas** que temos sempre de considerar no desenho e concepção de máquinas eléctricas.

### TRATAMENTO DAS CORRENTES DE FOUCAULT

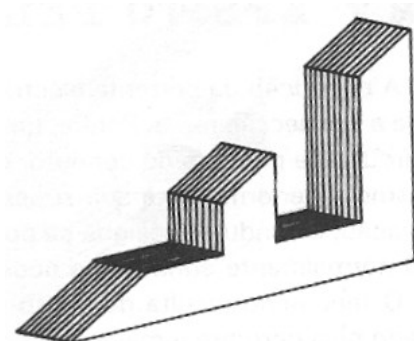
Pelo exposto se conclui da necessidade de eliminar ou, na impossibilidade, de atenuar essas correntes, minimizando os seus efeitos.

Os seguintes procedimentos têm esse objectivo:

**Utilização de ligas ferromagnéticas de grande resistividade**, o que leva a incorporar nos ferros uma certa percentagem de silício (3 a 5%). A adição de silício tem um inconveniente, para além do seu **elevado custo**, que é o de tornar a peça mais **sujeita a fractura**, razão que delimita o seu doseamento no fabrico de peças para máquinas rotativas como motores, alternadores, etc.

Utilização de lâminas delgadas ou condutores multifilares em vez de peças metálicas compactas. É corrente a laminação dos núcleos ferromagnéticos como se mostra na figura ao lado. A disposição destas lâminas deve cortar perpendicularmente o plano em que se estabelecem as correntes.

No sentido de aumentar ainda mais a resistividade, as lâminas estão separadas umas das outras por **papel** ou impregnadas por um **verniz isolante**.



**A laminação deverá ser tanto mais fina quanto maior for a frequência de trabalho**, conseguindo-se assim limitar o aumento das correntes induzidas pelo aumento proporcional da resistividade.

### APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

As correntes de Foucault, no entanto, podem ser aproveitadas de diversas formas como por exemplo no amortecimento em aparelhos de medida, travagem em camiões, embraiagem de automóveis, motores assíncronos, fornos de indução, fornos para fabrico de monocristais, velocímetros, etc.

## EFEITO PELICULAR

A condução de corrente eléctrica num condutor faz-se, normalmente, através de toda a sua secção recta. Porém, quando a frequência é muito elevada, a corrente passa a circular na periferia do condutor e em casos de muito alta frequência a corrente flui mesmo exteriormente à sua superfície, que apenas lhe serve de guia. Nesta última situação, o condutor designa-se por guia de onda. Por esta razão, as guias de onda são normalmente condutores ocos.

O fenómeno resulta do efeito de indução. Como sabemos, o campo magnético criado pela corrente é maior no centro e diminui radialmente com a distância ao condutor. Quando a frequência da corrente é elevada induzem-se correntes igualmente elevadas e cujo valor é maior também no centro do condutor, pela sua acção electromagnética, de acordo com a lei de Lenz, opõem-se à circulação, nessa região, da corrente principal, afastando-a para a periferia.

## APLICAÇÕES DO FENÓMENO DE INDUÇÃO

### Geradores

Dínamos (cc) e alternadores (ca) constituem dois importantes exemplos do aproveitamento do fenómeno da indução na produção industrial de correntes.

Nos dínamos e na parte estática da máquina cria-se um campo magnético por meio de umas bobinas cujos núcleos formam as expansões polares.

Nesse campo, e accionado por uma máquina primária, como, por exemplo, uma turbina, encontra-se o rotor, que é a parte rotativa da máquina. Nela se encontram os enrolamentos do induzido que, ao serem varridos por um fluxo magnético variável durante o seu deslocamento, vão ser sede de correntes induzidas.

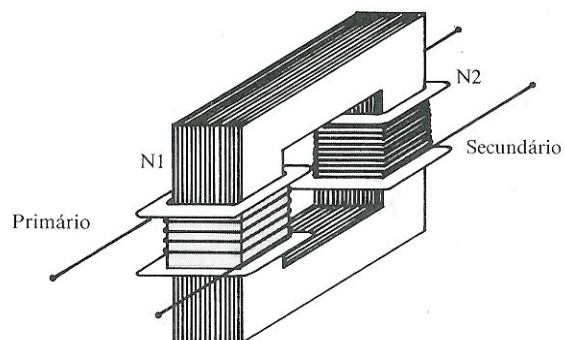
Nos alternadores são normalmente as bobinas do indutor que se deslocam (indutor móvel) e as bobinas do induzido estão fixas no estator.

### Motores eléctricos

Se alimentarmos o induzido da máquina por meio de uma corrente, poderemos em virtude da força de Laplace, obter o movimento do rotor. Temos assim realizado um motor de indução.

## Transformadores

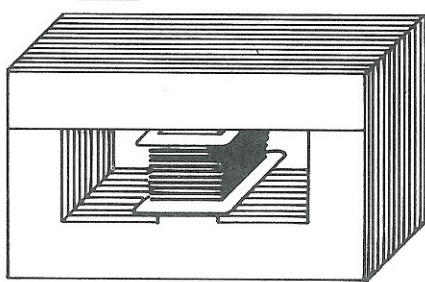
Constituem outro importante exemplo do efeito da indução. Um transformador é uma máquina estática constituída fundamentalmente por um núcleo e duas bobinas, a indutora e a do induzido, respectivamente designadas por primário e secundário do transformador. A razão entre o número de espiras, numa e noutra, é chamada razão de transformação, e define o nível da tensão no secundário em função da tensão aplicada no primário. A relação é a seguinte:



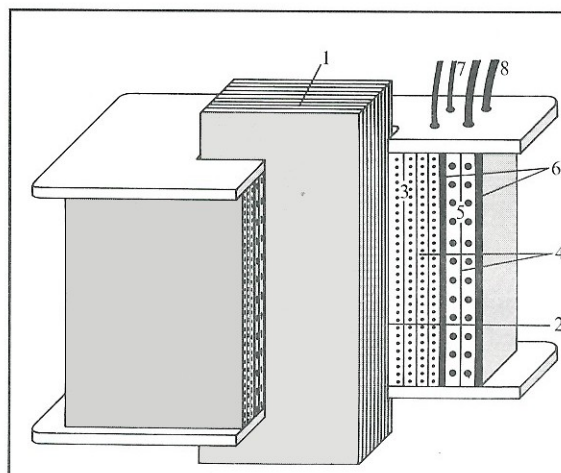
|                                 |       |    |                                 |
|---------------------------------|-------|----|---------------------------------|
| $\frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2}$ | Onde: | N1 | Número de espiras no primário   |
|                                 |       | N2 | Número de espiras no secundário |
|                                 |       | V1 | Tensão no primário              |
|                                 |       | V2 | Tensão no secundário            |

Se  $V2 < V1$  temos um transformador abaixador de tensão.

Se  $V2 > V1$  temos um transformador elevador de tensão.



- 1 — núcleo central
- 2 — suporte do enrolamento
- 3 — camadas do enrolamento primário
- 4 — isolamento entre camadas a papel parafinado
- 5 — camadas do enrolamento secundário
- 6 — isolamento entre os enrolamentos primário e secundário com tela envernizada
- 7 — terminais do primário
- 8 — terminais do secundário



Assim, um transformador elevador de tensão terá maior número de espiras no secundário que no primário.

Pelo contrário, se o transformador é abaixador de tensão, será agora o enrolamento primário que tem maior número de espiras.

É importante ainda observar que, para uma dada potência em transformação, quanto maior for a tensão, menor será a intensidade da corrente, o que justifica o facto dos **condutores do lado da alta terem secção mais reduzida do que os condutores do lado de baixa**, onde a tensão é mais reduzida.

## **BIBLIOGRAFIA**

Apontamentos pessoais



**LISTA DE PÁGINAS EM VIGOR**

| <b>PÁGINAS</b>                          | <b>EM VIGOR</b> |
|-----------------------------------------|-----------------|
| CAPA (Verso em branco)                  | ORIGINAL        |
| CARTA DE PROMULGAÇÃO (Verso em branco)  | ORIGINAL        |
| REGISTO DE ALTERAÇÕES (Verso em branco) | ORIGINAL        |
| 1 (Verso em branco)                     | ORIGINAL        |
| 3 a 20                                  | ORIGINAL        |
| 21 (Verso em branco)                    | ORIGINAL        |
| 23 a 34                                 | ORIGINAL        |
| 35 (Verso em branco)                    | ORIGINAL        |
| 37 a 46                                 | ORIGINAL        |
| 47 (Verso em branco)                    | ORIGINAL        |
| 49 a 52                                 | ORIGINAL        |
| 53 (Verso em branco)                    | ORIGINAL        |
| 55 a 62                                 | ORIGINAL        |
| 63 (Verso em branco)                    | ORIGINAL        |
| LPV-1 (Verso em branco)                 | ORIGINAL        |