

## 6º Trabalho Prático: ESTUDO DO CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO EM CORPOS FERROMAGNÉTICOS<sup>1</sup>

### 1. Introdução

#### 1.1 O campo magnético terrestre

A crosta terrestre é constituída, na sua maior parte, por rochas que não se encontram acessíveis à inspeção direta por parte do geólogo. Por isso, o seu estudo apenas pode ser feito de forma indireta através das propriedades físicas que podem ser exploradas por diferentes métodos geofísicos. Uma dessas propriedades é a suscetibilidade magnética que é estudada a partir da observação e medição do campo magnético terrestre.

Uma aplicação óbvia do campo magnético terrestre na Geologia consiste na orientação de amostras e cortes no terreno com o auxílio de uma bússola. A agulha de uma bússola orienta-se na direção do norte magnético que não coincide com o norte geográfico. A diferença é designada por declinação e varia de local para local assim como ao longo do tempo. Atualmente, em Portugal continental, o norte magnético encontra-se desviado aproximadamente 7º para oeste do norte geográfico, como indicam as cartas 1:25 000 dos Serviços Cartográficos do Exército (ver figura 1).

Um campo magnético pode ser gerado devido à circulação de corrente elétrica. De facto, uma espira circular de raio  $R$ , na qual circula uma corrente elétrica de intensidade  $I$  (figura 2), produz um campo magnético,  $B$ , que no seu centro tem a direção do eixo de simetria, o sentido dado pela regra do saca-rolhas (ou da mão direita), e o seu módulo vale

$$B_o = \frac{\mu_o I}{4\pi R} \quad (1)$$

$B$  é também chamado vetor indução magnética e a sua unidade no SI é o *tesla* (T). É ainda usada frequentemente a unidade *gauss* (G) que pertence ao sistema CGS, com  $1G = 10^{-4}T$ , e nas aplicações ao magnetismo terrestre usa-se o *gama* ( $\gamma$ ) com  $1\gamma = 10^{-5}G = 10^{-9}T$ , isto é, equivale a um *nanotesla* (nT). A constante  $\mu_o$  é a permeabilidade magnética do vazio, e vale  $\mu_o = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H.m}^{-1}$

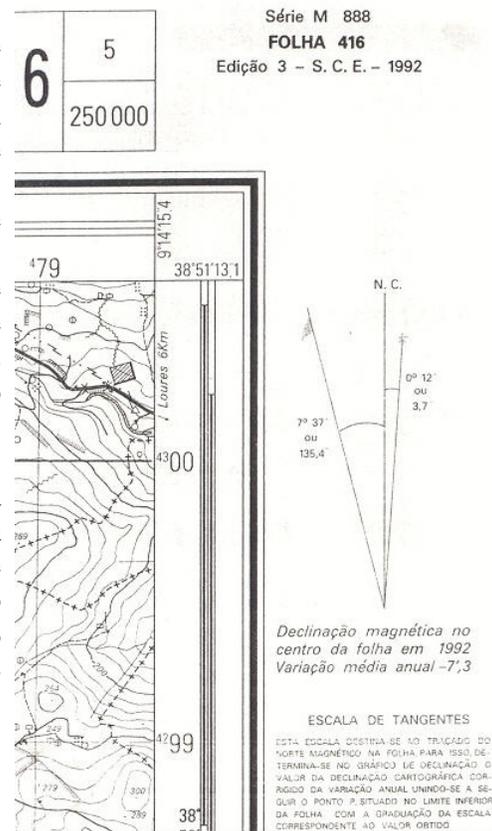


Figura 1

<sup>1</sup>Trabalho realizado em colaboração com o Professor Mário Moreira (ISEL)

Para grandes distâncias, isto é, quando a distância, ao longo do eixo de simetria, ao centro da espira,  $r$ , é muito maior que o raio desta,  $r \gg R$ , então o campo magnético gerado pela espira é idêntico ao de um dipolo magnético, de momento dipolar dado por  $m = I \pi R^2 = I S$  onde  $S$  é a área da espira. As unidades do momento dipolar expressam-se, no SI, em  $A \cdot m^2$ .

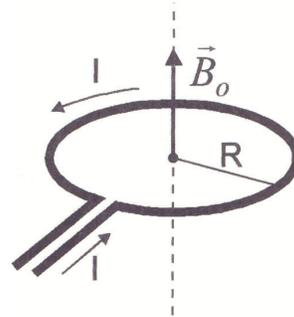


Figura 2

Para representar as componentes do campo magnético de um dipolo, é mais conveniente usar as coordenadas esféricas  $(r, \theta, \varphi)$  onde  $\theta = 90^\circ - \lambda$  é a colatitude (ver figura 3). Atendendo à simetria do dipolo a componente do campo segundo o paralelo de lugar é nula, sobrando as componentes radial e meridional cuja expressão vem dada por

$$\begin{aligned} B_r &= -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m \cos \theta}{r^3} \\ B_\theta &= -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \sin \theta}{r^3} \end{aligned} \quad (2)$$

O campo magnético que se observa à superfície do Globo é o resultado de duas contribuições: a componente interna e a componente externa.

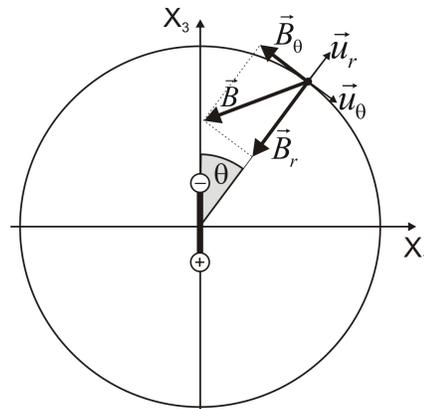


Figura 3

O campo magnético interno tem a sua origem em correntes elétricas desenvolvidas no interior do núcleo terrestre, composto provavelmente por Ferro que é um bom condutor. Este campo é fundamentalmente um dipolo (figura 4), e a sua variação é lenta (secular). O momento dipolar da Terra vale  $m = 8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$  e o seu eixo intersesta a superfície do Globo no hemisfério norte num ponto de coordenadas  $(79^\circ N, 290^\circ E)$ . Para a latitude de Lisboa, a intensidade do campo magnético terrestre tem um valor aproximado de 44 000 nT.

A descrição mais completa do campo magnético terrestre é feita por modelos calculados por agências internacionais que entram em conta com as observações feitas à superfície da terra e com a sua variação no tempo. O modelo que é usado habitualmente nas aplicações é o IGRF (The International Geomagnetic Reference Field). A este propósito pode consultar, por exemplo, o portal <http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf.html> Com o modelo IGRF mais recente é possível calcular o valor do campo “normal” de origem interna que deve ser observado em qualquer ponto do Globo, em qualquer altitude e dia do ano.

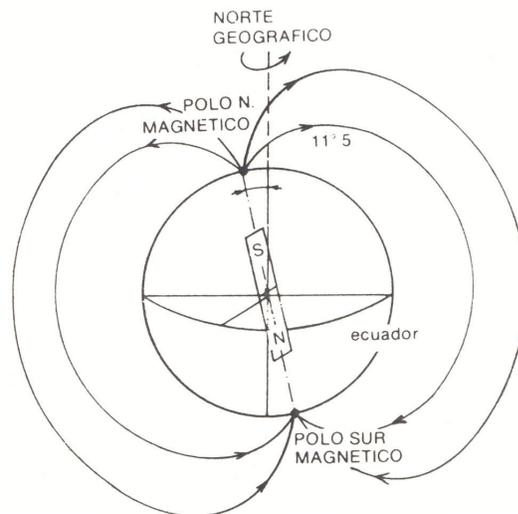


Figura 4

Apesar de não estar orientado segundo o eixo de rotação da Terra, o dipolo magnético tem um movimento de precessão o que faz com que a média do campo magnético terrestre ao longo de vários milhares de anos seja de facto um dipolo orientado segundo o eixo de rotação da Terra. Este é o princípio do Paleomagnetismo que é usado na reconstituição da posição dos continentes para tempos muito recuados.

O campo magnético externo tem a sua origem nas correntes elétricas que se desenvolvem na ionosfera, sendo muito influenciado pela atividade do Sol e também pela atração gravitacional da Terra e da Lua. Por isso, a sua variação é rápida (com um período de 24 horas), podendo mesmo ocorrer tempestades magnéticas que podem impedir as comunicações via rádio durante várias horas.

Para referenciar o campo magnético terrestre medido num local à superfície do Globo, é habitual usar-se um sistema de referência (ver figura 5) em que o eixo dos  $xx$  tem a direção do meridiano apontando para o norte geográfico, o eixo dos  $yy$  tem a direção do paralelo, apontando para este, E, e o eixo dos  $zz$  é vertical, apontando para baixo (nadir). Se designarmos por  $(B_x, B_y, B_z)$  as componentes do campo magnético neste referencial, definem-se então as seguintes grandezas:

$$F = \|\vec{B}\| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad H = \|\vec{B}_{Horizontal}\| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (3)$$

$$D = \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_x}\right) \quad I = \tan^{-1}\left(\frac{B_z}{H}\right)$$

onde  $F$  é o campo total,  $H$  é o campo horizontal,  $D$  é a declinação magnética e  $I$  é a inclinação magnética.

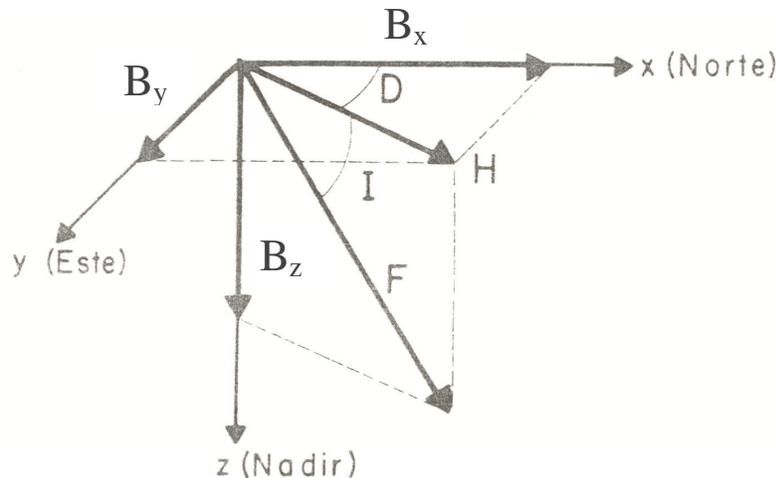


Figura 5

### 1.2 Propriedades magnéticas das rochas

Ao nível microscópico, os átomos também possuem um momento dipolar magnético mas o campo magnético macroscópico é normalmente nulo devido à orientação aleatória que têm os pequenos ímanes. Isto não é o que sucede nos materiais *ferromagnéticos*, nos quais os momentos magnéticos têm tendência a alinharem-se paralelos uns aos outros, dando origem a um campo magnético macroscópico assinalável. Este alinhamento dos dipolos atômicos pode

também ocorrer na presença de um campo magnético externo. Um material diz-se *paramagnético* quando os seus dipolos têm tendência a alinharem-se na mesma direção do campo magnético externo, dando origem a um campo magnético próprio (induzido) que reforça o campo aplicado. Um material diz-se *diamagnético* quando os dipolos têm tendência a alinharem-se no sentido oposto do campo aplicado, originando assim um campo magnético induzido que contraria o campo aplicado.

A ação de um campo magnético sobre um material é caracterizada pela suscetibilidade magnética  $\chi$ . Se for  $\vec{M}$  o vetor intensidade de magnetização (ou momento dipolar por unidade de volume), e  $\vec{H}_0$  o vetor intensidade do campo magnético ( $H_0 = \frac{B_0}{\mu_0}$ ) então tem-se

$$\vec{M} = \chi \vec{H}_0 \quad (4)$$

A suscetibilidade magnética (nº sem dimensões no SI) varia entre 0.07 a 6 para os materiais ferromagnéticos, sendo da ordem de  $10^{-6}$  para os materiais paramagnéticos, e da ordem de  $-10^{-6}$  para os diamagnéticos.

Certos minerais e metais apresentam uma suscetibilidade muito elevada (por exemplo a magnetite, hematite, ilmenite e o ferro) e, por isso, o seu efeito é notado através do aparecimento de anomalias magnéticas, isto é, diferenças assinaláveis entre o campo magnético observado e o campo "normal" para a superfície da Terra. Na figura 6 dá-se um exemplo do campo magnético produzido por um prisma quadrangular (um filão) devido à indução do campo magnético terrestre, com uma inclinação de  $45^\circ$  e uma intensidade de  $44000$  nT.

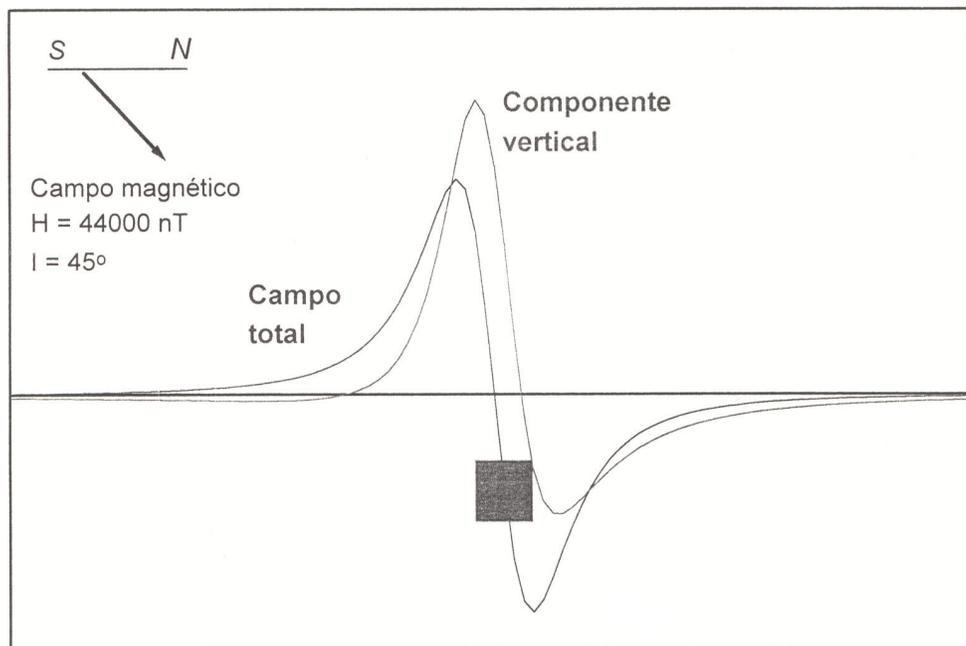


Figura 6

No caso de se ter uma esfera de raio  $R$  enterrada à profundidade  $z$ , então o campo vertical anômalo produzido por este corpo devido à ação do campo magnético terrestre vertical (ver figura 7), vem dado pela expressão

$$H_z = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 M}{z^3} \frac{2 - \left(\frac{x}{z}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{x}{z}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (5)$$

onde  $M$  é a intensidade de magnetização, e  $x$  mede o afastamento do ponto à superfície em relação à vertical que passa pelo centro da esfera.

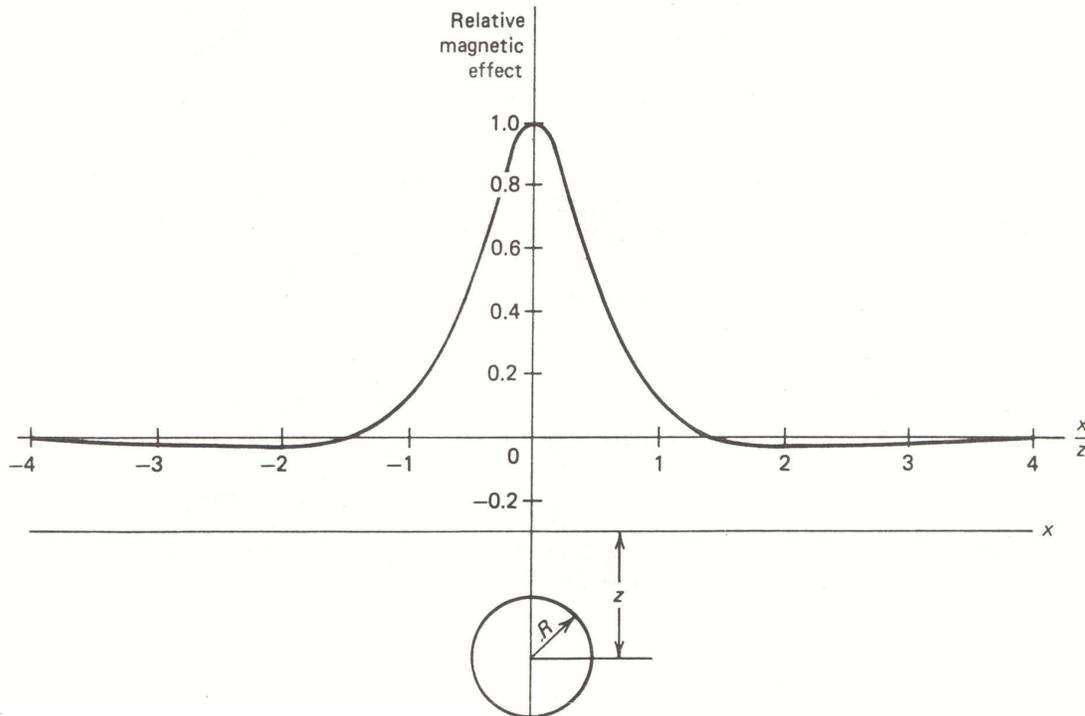


Figura 7

A expressão anterior mostra que a anomalia muda de sinal, passando de positiva a negativa, no ponto de coordenada  $x = \sqrt{2}z$ . Além disso a anomalia toma metade do seu valor máximo,  $H_z(x) = H_z(0)/2$ , quando o afastamento da vertical vale  $x = z/2$ . Qualquer destes dois critérios pode ser usado para determinar a profundidade da esfera, uma vez conhecida a forma da anomalia.

## 2. Objetivo e dispositivo experimental

Neste trabalho prático tem à sua disposição um magnetómetro que mede a intensidade do vetor indução magnética,  $B$ , numa dada direção do espaço, indicada pela seta no sensor ou no paralelepípedo de proteção. Com este aparelho vai proceder-se à medição das várias componentes do campo magnético terrestre num ponto do laboratório, podendo-se assim determinar o valor das diferentes grandezas que o caracterizam, definidas nas equações (3). O mesmo instrumento será usado para medir a anomalia na componente vertical do campo magnético produzida por uma esfera contendo ferro. Pretende-se desta forma ilustrar como as propriedades magnéticas das rochas podem ser usadas para determinar a estrutura e composição da crosta, ou para descobrir jazidas de minérios.

## **6º Trabalho Prático: ESTUDO DO CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO EM CORPOS FERROMAGNÉTICOS**

### **1. EQUIPAMENTO NECESSÁRIO**

- Magnetómetro, sonda magnética, bloco de proteção em madeira e cabo de ligação.
- Bússola
- Caixa de plástico contendo areia e tapada com uma placa que define um sistema de coordenadas.
- Esfera com ferro, bloco de ferro e outros objetos contendo ferro ou não.

### **2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Notas:

- 1) Registe todas as medições no seu caderno de bordo.
- 2) Todos os valores medidos ou calculados devem ser apresentados com a respetiva incerteza.
- 3) Inclua sempre as unidades de cada valor medido ou calculado.

#### ***2.1 Orientação da bancada***

Com o auxílio da bússola, oriente a caixa de plástico de forma que o eixo dos  $xx$  coincida com o N magnético. Meça, com o auxílio da bússola, a orientação da parede da janela em relação ao norte magnético. Não se esqueça de indicar a incerteza da medição efetuada tendo em conta as condições em que efetua a medição.

#### ***2.2 Medição do campo magnético terrestre***

Verifique se a sonda magnética se encontra ligada ao magnetómetro. Coloque a sonda no bloco de proteção. Ligue o magnetómetro.

**2.2.1** Coloque a sonda numa posição fixa em cima da bancada longe de interferências. Descreva como o valor da intensidade do campo magnético medido varia com a direção em que coloca a sonda magnética, tendo a atenção de encontrar e registar a direção em que o campo toma o seu valor máximo, mínimo e o valor nulo.

**2.2.2** Fixe agora, além da posição, a direção da sonda. Procure escolher uma direção que faça com que as flutuações do valor do campo sejam pequenas. Aproxime da sonda os vários objetos disponíveis. Descreva o que observa com cada objeto.

**2.2.3** Certifique-se de que no interior da caixa de plástico não se encontra nenhum objeto metálico. Meça as 3 componentes do campo magnético terrestre ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) no centro da caixa de leitura. Dê também as coordenadas ( $x,y$ ) desse ponto central. Não se esqueça de indicar a incerteza das medições efetuadas bem como as respetivas unidades.

### 2.3 Medição do campo magnético induzido numa esfera de ferro

**2.3.1** Verifique novamente que no interior da caixa de plástico não se encontra **nenhum objeto metálico**. Meça a componente vertical do campo magnético terrestre,  $B_z$ , em cada ponto da malha regular definida pelo cruzamento das linhas horizontais e verticais marcadas na tampa da caixa de plástico. O espaçamento entre linhas é de 4 cm. Tenha o cuidado de manter constante a orientação do bloco de leitura. Assegure-se sempre da posição correta do sensor. Lance os valores medidos na entrada superior de cada célula da Tabela I. Cada célula representa um ponto de leitura  $(x,y)$ . Registe uma incerteza média associada a estas medições de acordo com as flutuações que observa na sonda.

**2.3.2** Coloque a **esfera de ferro** no interior da caixa, numa posição próxima do seu centro. Meça de novo a componente vertical do campo magnético terrestre nos mesmos pontos da malha regular definida na placa de leitura. Lance os valores obtidos de novo na Tabela I mas agora na 2ª entrada de cada célula.

Nota: a esfera não deve estar demasiado enterrada, por forma a permitir a deteção de campos mais intensos. Caso contrário, será necessário uma recolha mais alongada de dados que permita um estudo estatístico das propriedades do campo magnético no local.

## 3. RELATÓRIO

Indique sempre a turma, o número e nome de cada aluno que constitui o grupo de trabalho assim como a data da realização do trabalho.

Em linhas gerais, o relatório deve ser uma exposição/relato escrito em que se descrevem e analisam todos os factos/dados recolhidos no decorrer de uma experiência. Os registos efetuados servem para responder aos objetivos que originaram a atividade experimental. Faz parte de um relatório o **RESUMO** (sucinto), a **DISCUSSÃO** e as **CONCLUSÕES**. Não se pretende uma introdução.

Em particular, neste relatório deve responder às seguintes questões:

**3.2.1.** Justificar/interpretar as observações feitas em **2.2.1.**, indicando a fonte do campo magnético medido e utilizando o conhecimento que possui sobre esse campo.

**3.2.2** Justificar/interpretar as observações feitas em **2.2.2.**, procurando justificar os valores obtidos através da classificação das propriedades magnéticas dos materiais testados.

**3.2.3.** Usando os dados recolhidos em **2.2.3.**, calcule o campo horizontal, campo total, inclinação e declinação do campo magnético terrestre tal como foi medido no ponto central do sistema de leitura.

**3.2.4.** Compare os valores obtidos com aqueles que seriam de esperar para um dipolo de momento  $m = 8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$  situado no centro da Terra e com a direção do seu eixo de rotação. Discuta os resultados obtidos.

**3.2.5.** Utilize o portal [http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf\\_form.shtml](http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf_form.shtml) e obtenha os valores esperados para as componentes do campo magnético terrestre usando o modelo IGRF. Compare

os valores obtidos com os medidos e calculados anteriormente.

**3.3.1.** Determine o campo anômalo produzido pela esfera metálica, fazendo a diferença entre os valores com esfera (**2.3.2.**) e os valores sem esfera (**2.3.1.**) (2ª entrada – 1ª entrada). Lance os resultados de novo na Tabela I (3ª entrada). Indique o erro associado a esta entrada.

**3.3.2** Usando a base da figura 8a, faça um mapa do campo medido em **2.3.1** (*campo regional*), traçando um conjunto de linhas de igual valor de campo.

Para tal, identifique o valor máximo, *max*, e mínimo, *min*, que o campo toma nos dados recolhidos. Agrupe os valores recolhidos em três ou quatro intervalos de valores de forma a que pontos cujas intensidades do campo sejam semelhantes estejam no mesmo grupo. Utilize um esquema de cores (ou de símbolos) para identificar a que grupo pertence cada um dos pontos da figura 8a. Trace linhas que revelem a tendência que os pontos mostram tendo em atenção que estas linhas não se podem cruzar e que, ou se fecham sobre elas próprias, ou não têm princípio nem fim.

Este campo não é uniforme. Porquê?

**3.3.3** Usando a base da figura 8b, faça um mapa do campo medido em **2.3.2** (*campo total*), traçando um conjunto de linhas de igual valor de campo. O que pode concluir?

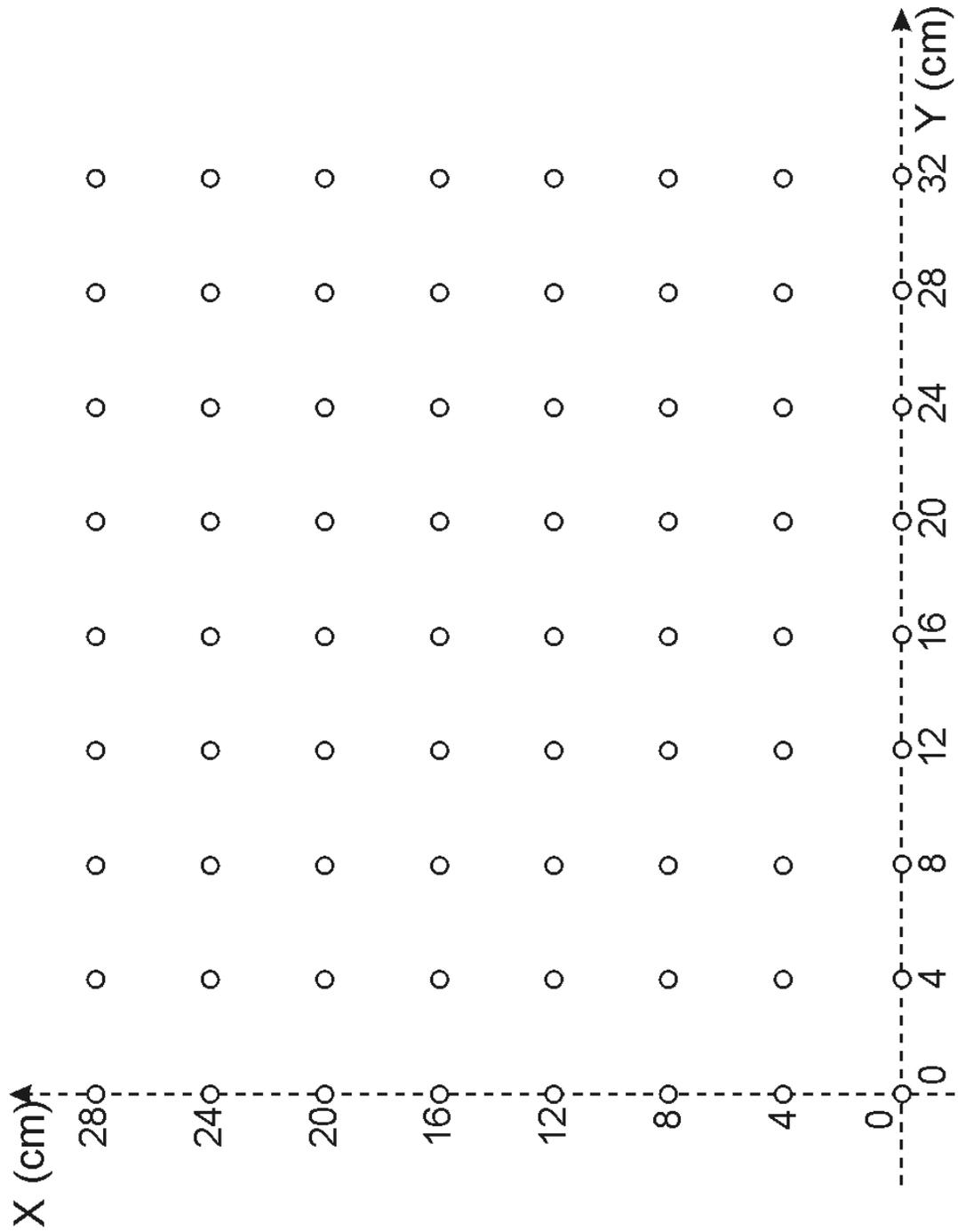
**3.3.4** Usando a base da figura 8c, faça um mapa do campo calculado em **3.3.1** (*campo anômalo*), traçando um conjunto de linhas de igual valor de campo. Determine as coordenadas ( $x,y$ ) do centro da esfera de ferro. Como de costume, faça uma estimativa do erro dessa determinação.

**3.3.5** A partir do mapa anterior, usando os dados que obteve em **3.3.1.**, faça **dois gráficos** para a variação do campo magnético anômalo segundo duas direções que passam pelo centro da anomalia: uma paralela ao campo magnético terrestre horizontal  $H$  e outra perpendicular a essa direção. Marque as direções usadas para este cálculo na figura 8c. Compare com o gráfico da figura 7.

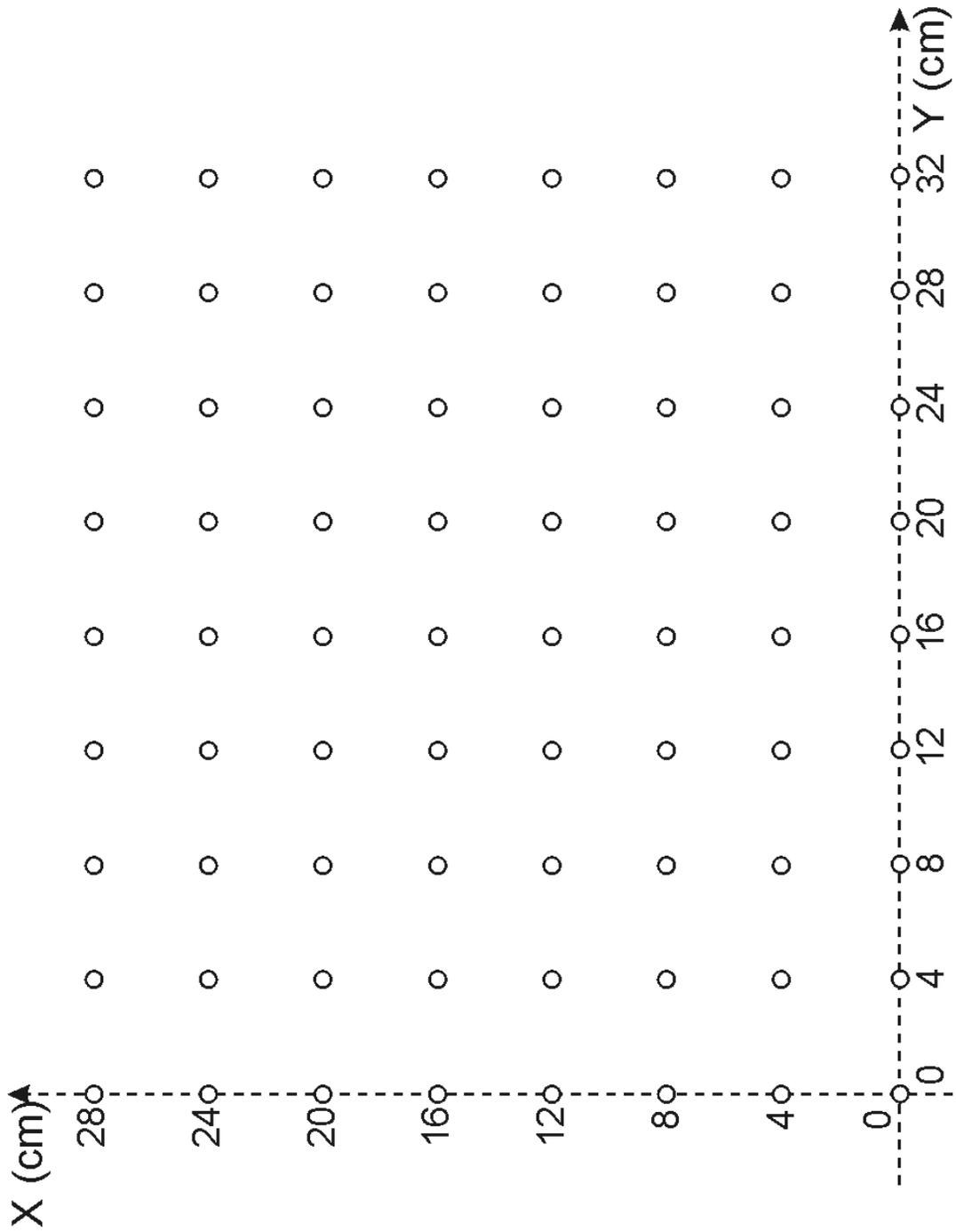
**3.3.6** A partir do gráfico do perfil perpendicular a  $H$  e usando os elementos apresentados na introdução, determine a profundidade do centro da esfera em relação ao plano de leitura. Estime o erro associado à medição justificando.

**Tabela I**

$y$ (cm) \ $x$ (cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32
0									
4									
8									
12									
16									
20									
24									
28									



*Figura 8a*



*Figura 8b*

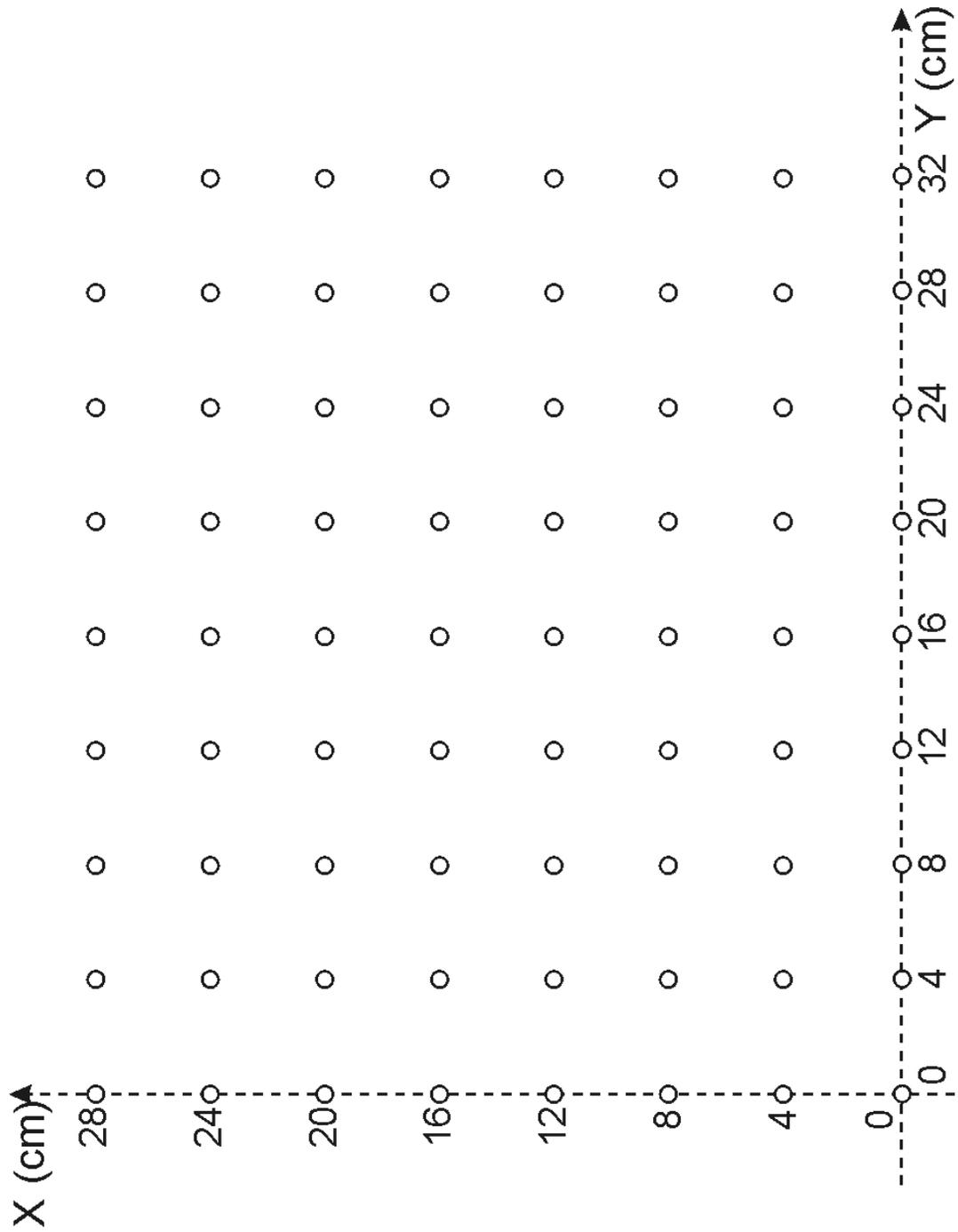


Figura 8c