

6º Trabalho Prático: ESTUDO DO CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO EM CORPOS FERROMAGNÉTICOS¹

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 *gamma* (γ) com $1\gamma = 10^{-5}G = 10^{-9}T$, isto é, equivale a um *nanotesla* (nT). A constante μ_o é a permeabilidade magnética do vazio, e vale $\mu_o = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H.m}^{-1}$

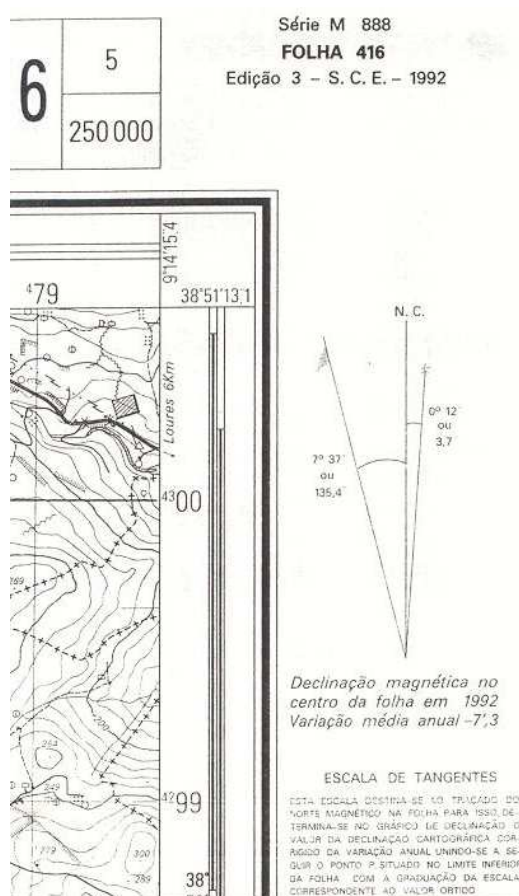


Figura 1

¹Trabalho 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 $A \cdot m^2$.

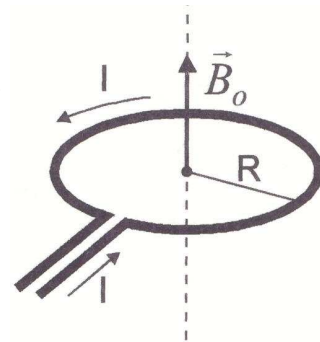


Figura 2

Para representar as componentes do campo magnético de um dipolo, é mais conveniente usar as coordenadas esféricas (r, θ, φ) 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.

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 $44\,000 \text{ nT}$.

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.

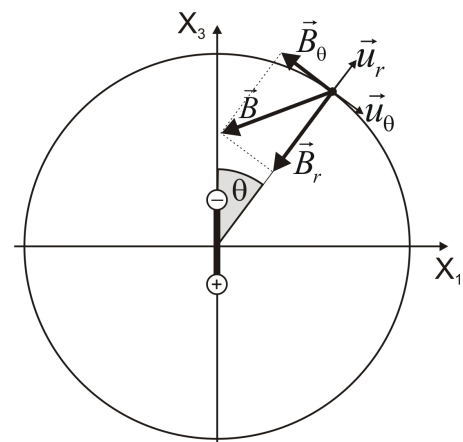


Figura 3

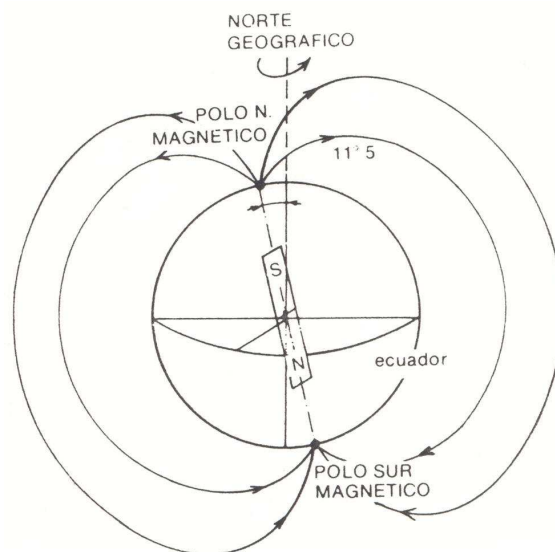


Figura 4

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 atracção 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 direcção do meridiano apontando para o norte geográfico, o eixo dos yy tem a direcção 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.

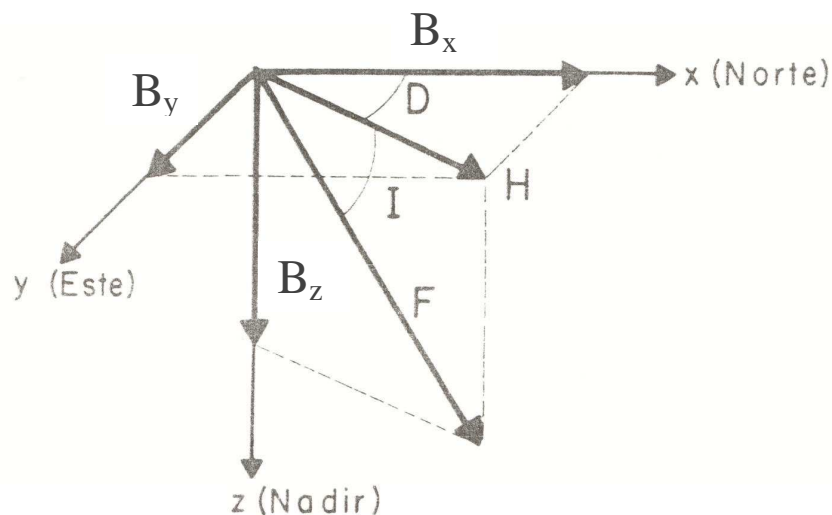


Figura 5

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 às orientações aleatórias 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 χ . 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° e uma intensidade de 44000 nT.

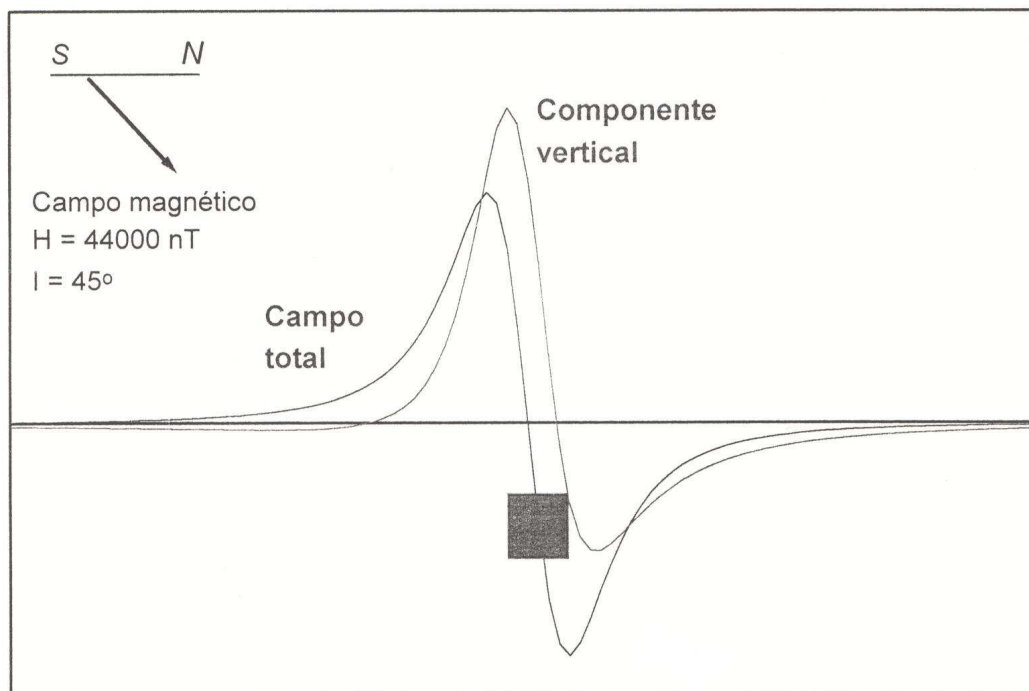


Figura 6

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

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

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.

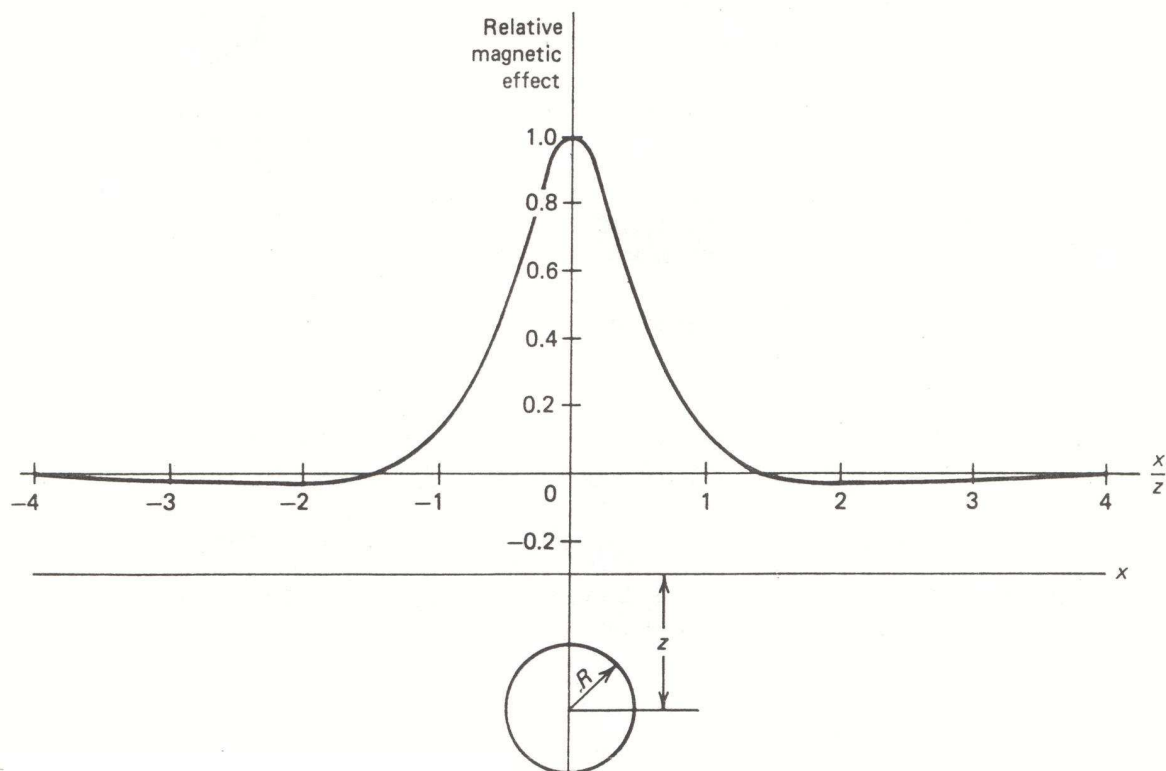


Figura 7

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 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									

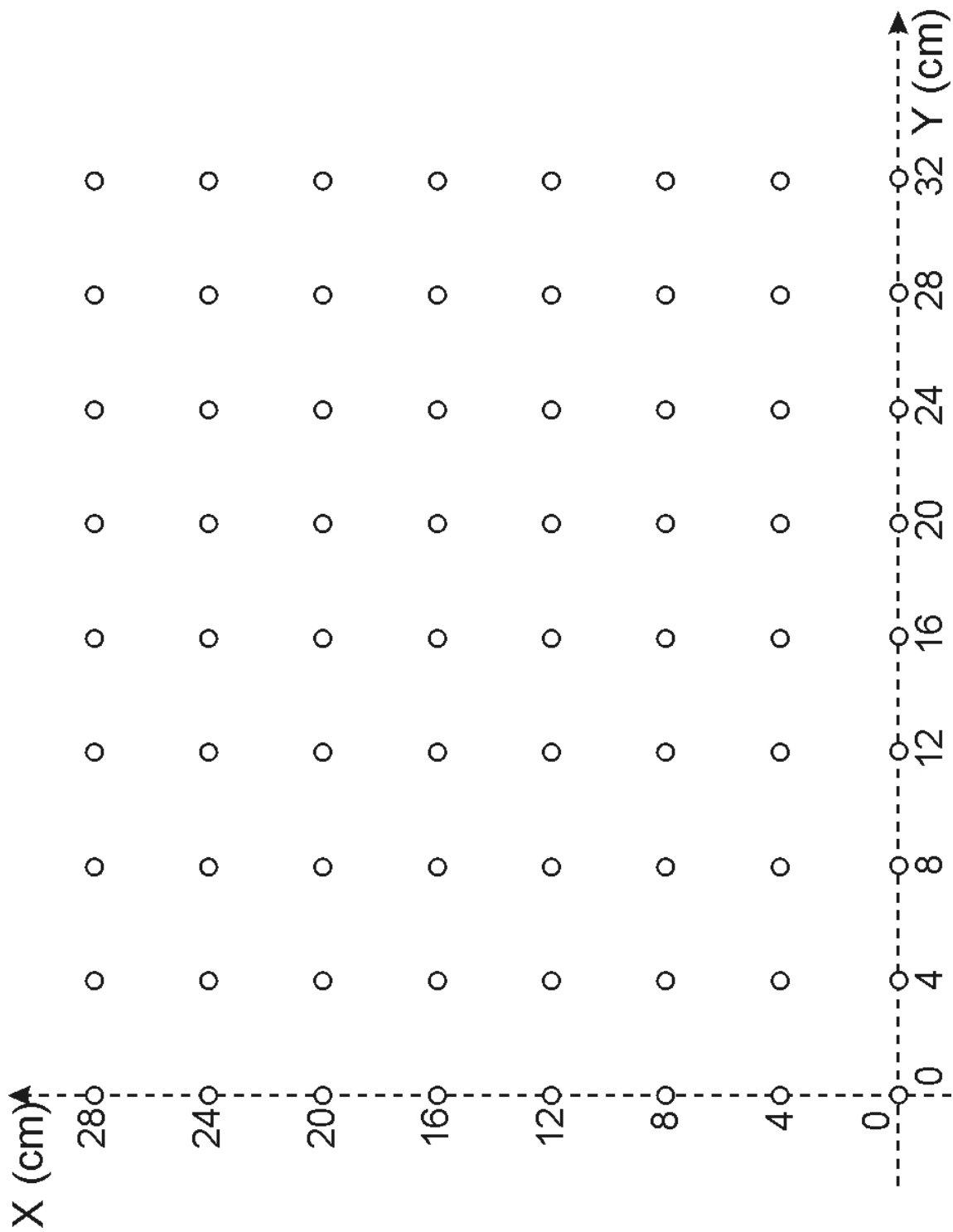


Figura 8a

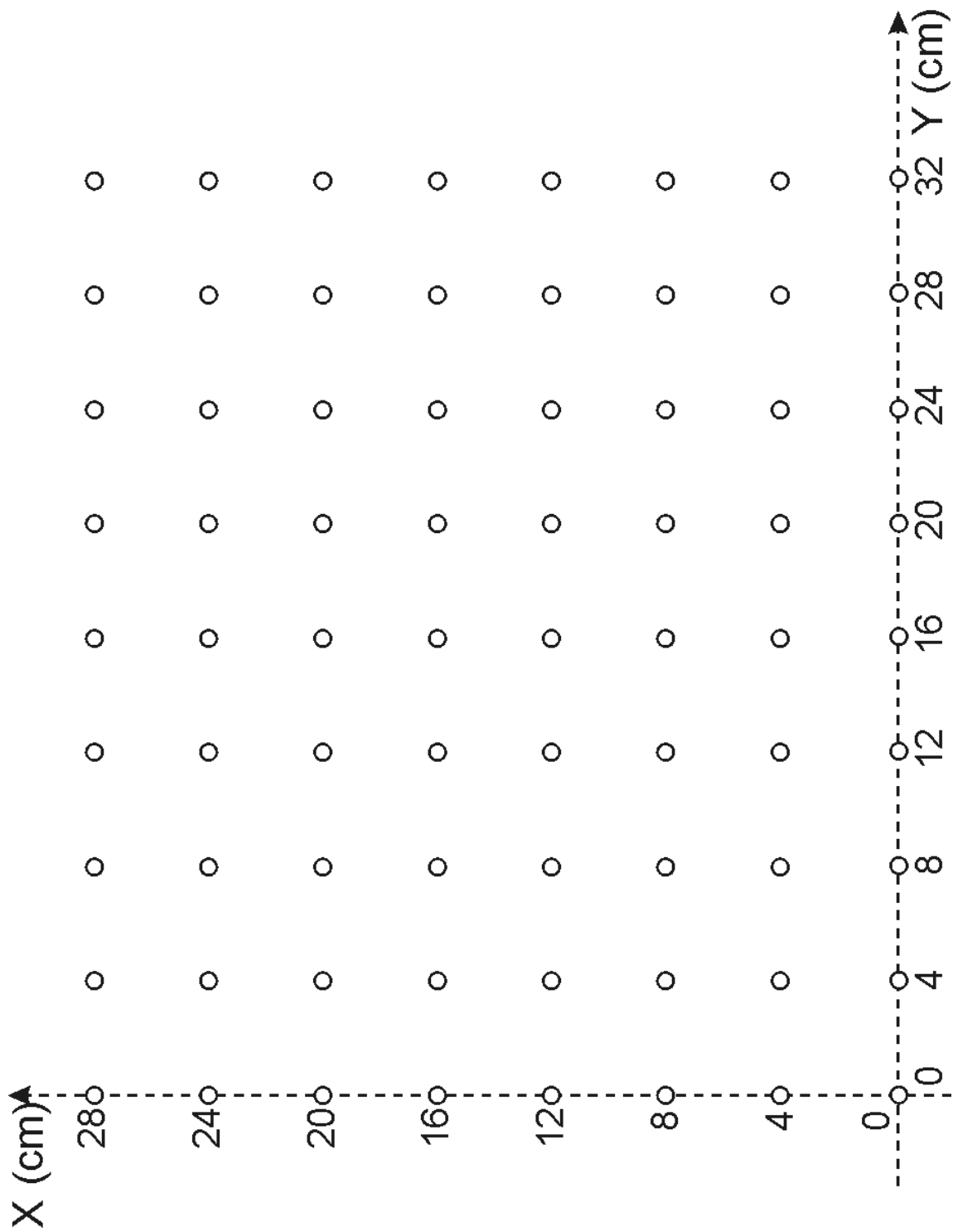


Figura 8b

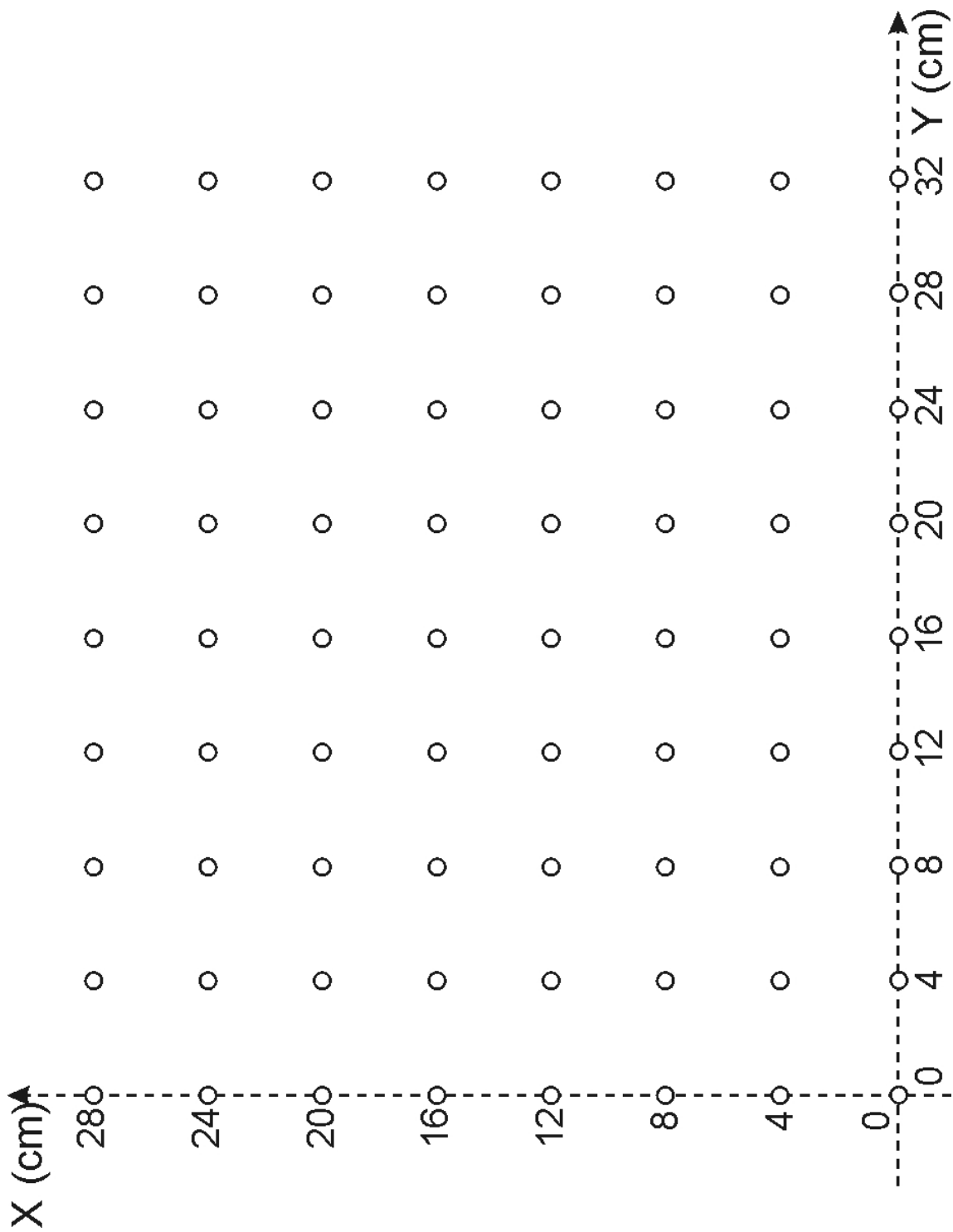


Figura 8c