

momento total nulo. Então tal sistema tem um conteúdo de energia no referencial em que o momento total é nulo, e portanto onde o respectivo CM (centro de massa) está em repouso. Assim sendo, tal sistema possui um conteúdo de energia em repouso, logo tem massa (Alcaine, 1989, p. 61; Baierlein, 1991, p. 174).

A equação da definição de massa permite-nos calcular a massa do sistema dos fótons que, como vimos, tem momento nulo:

$$\sqrt{E_f^2 - p_f^2 c^2} / c^2 = \sqrt{(2mc^2)^2 - 0} / c^2 = 2m.$$

Vemos assim que a massa do sistema de fótons não é nula mas é igual a  $2m$ , ou seja igual à massa antes da ocorrência do processo. Não houve, pois, conversão de massa em energia. Houve, sim, conservação da massa e outra coisa podia suceder, aliás, já que a massa corresponde à grandeza do quadri-vector momento-energia e o momento-energia conserva-se nos sistemas isolados. O que variou foi a manifestação da energia: deixou de estar associada ao electrão e ao positrão na forma de energia em repouso (e de energia cinética que desprezamos apenas por simplicidade); passou a manifestar-se apenas na forma cinética, após a produção dos fótons. Mas o conteúdo de energia e a massa e, portanto, a inércia do sistema não mudaram. Mas... sendo a massa do fóton isolado nula, como pode ser não nula a massa do conjunto dos dois fótons? A massa total do sistema de fótons não é a soma das massas dos fótons?! Tal como muito bem realçam Taylor e Wheeler (1992, p. 247), *o que é aditivo não é a massa, mas, sim, a energia e o momento*. Não só a energia em repouso, equivalente à massa, de cada partícula de um sistema, contribui para o conteúdo energético do sistema, logo para a massa deste. Toda a energia (cinética ou potencial) das partículas do sistema, como já afirmamos, contribui para a massa do sistema. Se, por exemplo, tivermos um sistema de  $n$  partículas livres, a massa do sistema excederá a soma das massas das suas partículas numa quantidade equivalente à soma das energias cinéticas dessas partículas (quando medidas no referencial próprio, isto é, onde o momento total é nulo). No caso dos dois fótons, a soma das massas das duas partículas é zero, mas a massa do sistema dos fótons não é nula, porque eles têm energia cinética que contribui para a energia em repouso do sistema<sup>(3)</sup>. E, afinal, não é este caso o único em que o todo é algo mais que a soma das partes...

## Resumo

Neste artigo defendemos a *abolição da massa relativista* ou massa dependente da velocidade, que consideramos uma «misconception» que a história da evolução das ideias relativistas, mais do que o próprio Einstein, ajudou a estabelecer. Uma partícula, para sofrer um dado

aumento de velocidade num certo intervalo de tempo, exige uma força cada vez maior, quando a sua velocidade se aproxima da velocidade da luz. Este facto induziu a ideia de que a estrutura da partícula, a sua energia própria e a sua massa, foram afectadas, quando, na realidade, isso é uma consequência da dilatação temporal relativista.

A massa e a energia de uma partícula são *grandezas* diferentes correspondendo a primeira à grandeza do quadri-vector momento-energia e a segunda a uma componente, apenas, desse quadri-vector. A massa não varia de referencial de inércia para referencial de inércia e a energia varia. Partículas há que possuem energia mas não possuem massa.

A massa de um sistema equivale à sua energia em repouso, isto é, à energia das suas partículas constituintes medida no referencial próprio (referencial em que o momento linear total é nulo), já que apenas quando o momento é nulo o quadri-vector momento-energia se reduz à componente energia. Uma parte, e só uma parte, desta energia em repouso equivale à soma das massas das partículas. Por conseguinte, a massa de um sistema excede a soma das massas das suas partículas numa quantidade igual à energia que essas partículas possuem no referencial próprio. Se a energia em repouso do sistema se mantém, mantém-se a massa. Se o sistema perde energia para o exterior, a massa diminui; se recebe energia do exterior a massa aumenta. Trata-se de variações concomitantes ou correlativas da massa e energia do sistema, e não de conversão de massa em energia ou de energia em massa.

## BIBLIOGRAFIA

### 1. Em português

- EINSTEIN, A., Sobre a Electrodinâmica dos corpos em movimento, in TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume — O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE, Fundação Calouste Gulbenkian, 1972
- EINSTEIN, A., A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético?, in TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume — O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE, Fundação Calouste Gulbenkian, 1972
- PAIS, A., Subtil é o Senhor, Edit. Gradiva, Lisboa, 1993

### 2. Em outras línguas

- ADLER, C., Does mass really depend on velocity, dad?, Am. J. Phys. 55 (8), August 1987
- ALCAINE, G., Sobre masa y energia, Revista Española de Física, 3, 1, 1989
- BAIERLEIN, R., Teaching  $E = mc^2$ , The Physics Teacher, March 1991
- EINSTEIN, A., Sobre la teoría de la relatividad especial y general, Alianza Editorial, Madrid, 1984
- EINSTEIN, A., Notas autobiográficas, Alianza Editorial, Madrid, 1984
- JAMMER, M., Concepts of mass, Harvard University Press, Cambridge — Massachusetts, 1961
- NOVAK, J.; GOWIN, D., Learning how to learn, Cambridge University Press, Cambridge, 1991
- OKUN, L., The concept of mass, Physics Today, June 1989
- RON, J., El origen y desarrollo de la relatividad, Alianza Universidad, Madrid, 1983
- STACHEL, J.; TORRETTI R., Einstein's first derivation of mass-energy equivalence, Am. J. Phys. 50(8), Aug 1982
- TAYLOR, E.; WHEELER, J., Spacetime Physics, Introduction to Special Relativity, WH Freeman & Company., 1992

<sup>(3)</sup> É legítimo falarmos em energia em repouso e, portanto, em massa do sistema dos dois fótons, porque existe para esse sistema um referencial próprio, no qual o momento total é nulo (ainda que o momento de cada fóton não o seja).

# MEDIDAS MAGNÉTICAS EM PROSPECÇÃO ARQUEOLÓGICA

MANUEL JOÃO SENOS MATIAS

Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, 3800 Aveiro

*As medidas de campo magnético terrestre podem ser aplicadas à localização de vestígios arqueológicos, em particular os que sofreram aquecimento prolongado, como antigos fornos e peças de cerâmica cozida. Contudo o carácter bipolar do campo magnético, a inclinação do vector campo e a magnetização do corpo anómalo pode tornar complexas as anomalias registadas e mesmo deslocá-las da posição dos corpos que as originam. Para ultrapassar este problema recorre-se ao método da redução ao polo de medidas magnéticas obtidas em dois locais de interesse arqueológico.*

## 1. Introdução

O campo magnético terrestre é concerteza dos assuntos mais antigos da Geofísica, e variados estudos têm sido efectuados no sentido de determinar as suas origens e características.

À aplicação de estudo do campo magnético terrestre à procura de recursos minerais chama-se prospecção magnética e geralmente, neste âmbito, considera-se que o valor medido do campo magnético num ponto é o resultado de três factores [1]:

— *campo principal*, de origem interna, variando muito lentamente com o tempo e que constitui a principal contribuição para a medida;

— *campo externo*, que como o nome indica tem origem externa à Terra, variando rapidamente com o tempo, de um modo cíclico mas com flutuações aleatórias sobrepostas;

— *campo local variável*, normalmente bastante mais pequeno que o campo principal, e que é devido a anomalias magnéticas locais na parte superficial da crosta terrestre.

É claro que os objectivos da prospecção magnética são as *variações* locais do campo e a sua *localização*.

Nos anos sessenta constatou-se [2, 3], que estas variações também podem ser provocadas por ruínas arqueológicas, em particular as que sofreram aquecimento prolongado, como antigos fornos e peças de cerâmica cozida. De facto, o contraste entre a susceptibilidade magnética daqueles vestígios arqueológicos e do terreno circundante é apreciável, sendo atribuído à reorientação de domínios magnéticos dos minerais ferromagnéticos constituintes das argilas quando arrefecem na presença do campo magnético terrestre, após terem sido aquecidos a temperaturas superiores à sua temperatura de Curie. O tipo de magnetização resultante é muito estável e costuma chamar-se *magnetização termoremanescente* [4].

No presente trabalho apresentam-se dois exemplos da aplicação da prospecção magnética à Arqueologia, bem como uma técnica de processamento de dados, a chamada «Redução ao Pólo» que permite melhorar a interpretação e localização de anomalias magnéticas com interesse arqueológico.

Embora este artigo não aborde a teoria de campo de potencial e princípios matemáticos que fundamentam todo o trabalho, a bibliografia referenciada permite o aprofundamento das matérias



Linhas de força do campo magnético produzido por uma barra magnética.

expostas. Espera-se sim despertar a curiosidade e fomentar a aplicação destes métodos a trabalhos práticos aparentemente simples e com resultados fáceis de confirmar.

## 2. Princípios da prospecção magnética

Em qualquer local da Terra, uma agulha magnética orienta-se segundo a direcção do campo magnético terrestre  $F$ , Fig. 1. Normalmente, esta direcção fará um ângulo  $I$  com a sua componente vertical,  $Z$ , enquanto a sua projecção horizontal,  $H$  (Fig. 1) fará um ângulo  $D$  com a direcção Norte-Sul.

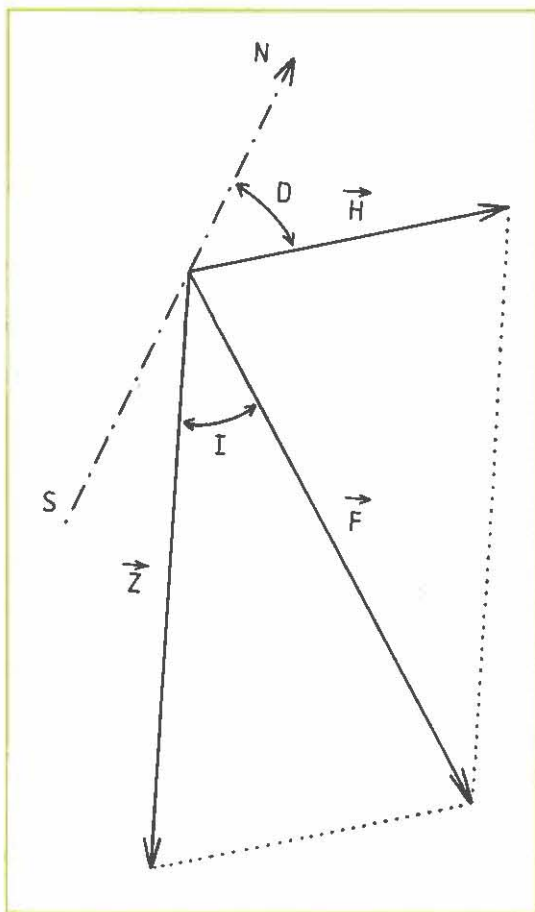


Fig. 1 — Componentes do Campo Magnético Terrestre  
 $F$  - vector campo;  $Z$  - componente vertical;  
 $H$  - componente horizontal;  $D$  - declinação;  $I$  - inclinação

Hoje em dia, na prospecção magnética medem-se as magnitudes do vector  $F$  (campo total) ou dos vectores  $H$  e  $Z$  (componentes horizontal e vertical). O desenvolvimento da electrónica permitiu construir aparelhos, chamados magnetómetros, leves, baratos, expeditos, fáceis de operar e com sensibilidade da ordem

do nanoTesla (nT), portanto convenientes para usar em prospecção arqueológica.

Em Arqueologia é comum fazer as medidas com o sensor junto ao solo de modo a aumentar a detectabilidade das ruínas, usando-se uma grelha de amostragem, normalmente quadrada, com lado variando de 0,5 m a 2 m.

Os resultados costumam ser apresentados sob a forma de um mapa de contorno, em nT, sobre o qual se faz a interpretação.

## 3. Dados de campo

No presente trabalho vão ser apresentados dados de campo magnético referentes a dois locais com interesse arqueológico: Ferrol e Alcochete.

### Ferrol

Nas proximidades de Ferrol, NW Espanha, realizou-se um trabalho de prospecção magnética, medindo o campo total, vector  $F$  na Fig. 1. As leituras foram executadas sobre uma malha quadrada de 2 m x 2 m, num local onde se suspeitava da existência de ruínas romanas [5].

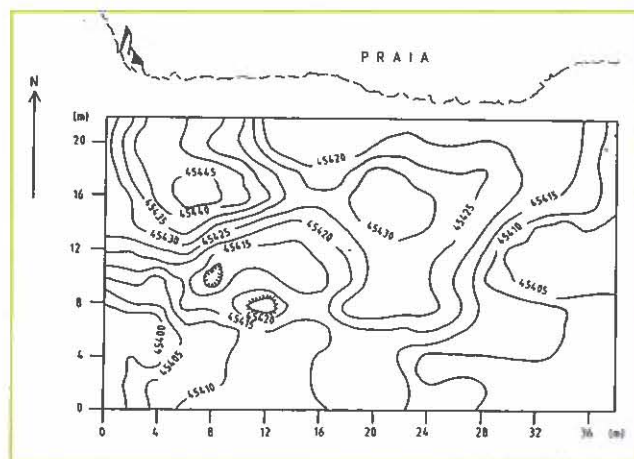


Fig. 2 — Mapa Magnético de Ferrol  
(contornos em nanoTesla)

O mapa magnético da Fig. 2, mostra alguns máximos locais situados no ponto (12,8) e na parte noroeste do mapa, que devem ter interesse arqueológico.

### Alcochete

Próximo da vila de Alcochete existem alguns fornos romanos, suspeitando-se da existência de outros ainda não localizados [6].

Assim, foi mapeada uma área sobre uma grelha 1,5 m x 1,5 m e desenhada a carta da Fig. 3. Neste caso foram executadas medidas de componente vertical do campo, vector **Z** da Fig. 1. Os contornos apresentados na Fig. 3 são de 10 em 10 nT, pois o magnetómetro utilizado tem sensibilidade inferior à do usado em Ferrol.

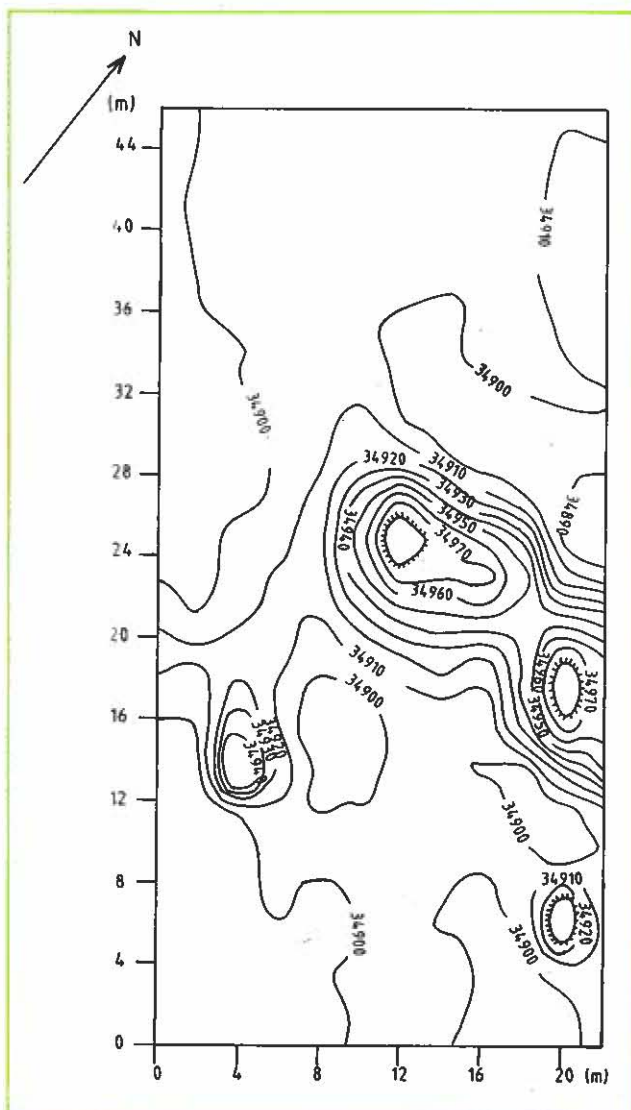


Fig. 3 — Mapa Magnético de Alcochete  
(contornos em nanoTesla)

O mapa da Fig. 3 mostra claramente duas anomalias situadas em pontos com as coordenadas (20,18) e (12,25), e outras de menor dimensão e amplitude na parte inferior da carta, ponto (4,14).

São estes os locais com maior interesse arqueológico.

#### 4. Redução ao Pólo

A interpretação de anomalias magnéticas oferece algumas dificuldades devido ao carácter bipolar do campo magnético, à inclinação dos vectores campo e à magnetização do corpo anómalo. Por isso, as anomalias registadas são muitas vezes complexas e estão deslocadas da posição dos corpos que as provocam. Em prospecção arqueológica este «desfasamento posicional» pode levar a escavações infrutíferas.

Para ultrapassar estes problemas têm surgido métodos numéricos de processamento de dados de entre os quais a «Redução ao Pólo» [7, 8]. Com esta técnica pretende-se corrigir a forma da anomalia de modo a apresentar um novo mapa de valores semelhante ao obtido se as medidas tivessem sido efectuadas no pólo magnético, isto é, se os vectores campo e de magnetização fossem verticais. Nestas circunstâncias, a localização das anomalias corresponderia à dos corpos que as provocam.

É sabido que o campo magnético terrestre pode ser representado matematicamente por uma série dupla de Fourier e, por isso, não é difícil calcular matematicamente o campo magnético reduzido ao pólo [9]. Será pois possível «corrigir» e «clarificar» a posição e os tipos de anomalias registadas [10].

Pretende-se agora reduzir ao pólo os dados de prospecção de Ferrol e Alcochete, usando para tal valores de inclinação e declinação magnética obtidos em Observatórios Magnéticos situados perto dos locais de trabalho.

A redução foi feita usando programas em Fortran 77 num PC386/87, que leva cerca de um minuto a processar uma grelha de 20 por 30 pontos.

##### 4.1. Dados de Ferrol

A Fig. 4 mostra o mapa de redução ao pólo das medidas magnéticas de Ferrol. Comparando este mapa com o da Fig. 2 nota-se que:

- as anomalias positivas registadas na Fig. 4, estão deslocadas de 2 a 4 m para norte em relação aos máximos registados na Fig. 2;

- na Fig. 4, desenvolve-se claramente uma anomalia polar em (20,18) que após escavações, Fig. 5, corresponde a um pátio interior das construções romanas, onde é normal a deposição de matéria orgânica que dá origem a um conhecido mineral magnético, a magnemite;

- o pólo identificado em (12,10) corresponde a uma grande lareira, como se pode verificar na Fig. 5;

— na parte noroeste da Fig. 4 desenvolve-se uma área de valores positivos e elevados que correspondem a um local onde, a cerca de 4 m de profundidade, foi encontrada grande quantidade de madeira queimada e carvão;

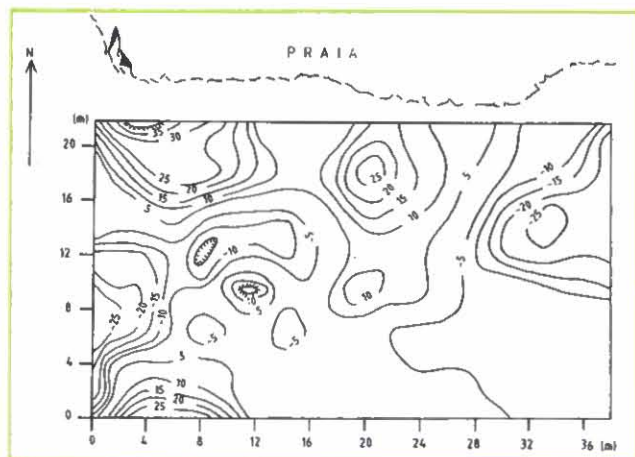


Fig. 4 — Mapa de redução ao pólo de Ferrol (contornos em nanoTesla)

— a zona anômala a SW na Fig. 4, que não tinha sido revelada na Fig. 2, é uma área de possível continuação dos vestígios romanos, conforme é sugerido pelo mapa das escavações, Fig. 5;

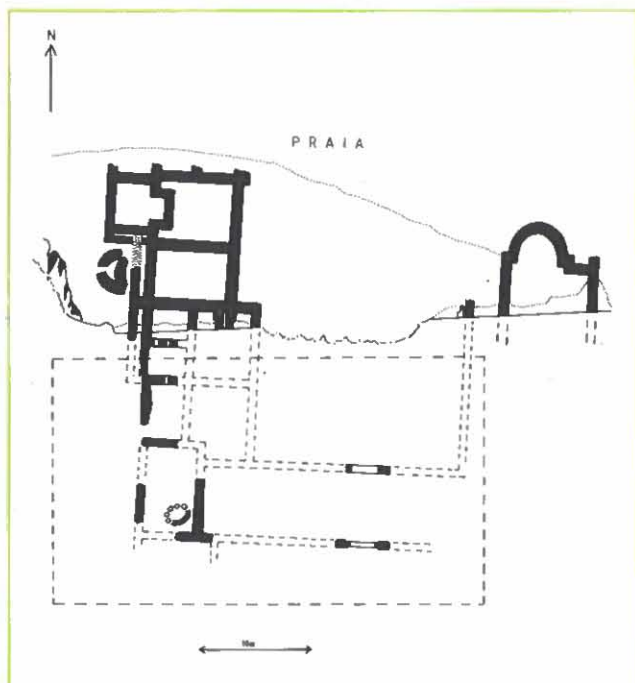


Fig. 5 — Escavações Arqueológicas em Ferrol

— a área de valores negativos, cerca de (2,8), corresponde à proximidade à superfície dos xistos que existem na região.

#### 4.2. Dados de Alcochete

No mapa da Fig. 6 encontra-se a redução ao pólo das medidas da Fig. 3. Comparando as duas Figs. conclui-se que:

- as anomalias positivas da Fig. 6 estão deslocadas 2 a 3 metros para NW em relação aos máximos da Fig. 3;
- a redução ao pólo proporcionou uma maior «agudização» das anomalias registradas, revelando-se elevados gradientes;
- são claramente visíveis três núcleos anômalos: um em (10,25), outro em (18,18) e um terceiro, de menores dimensões, em (3,14).

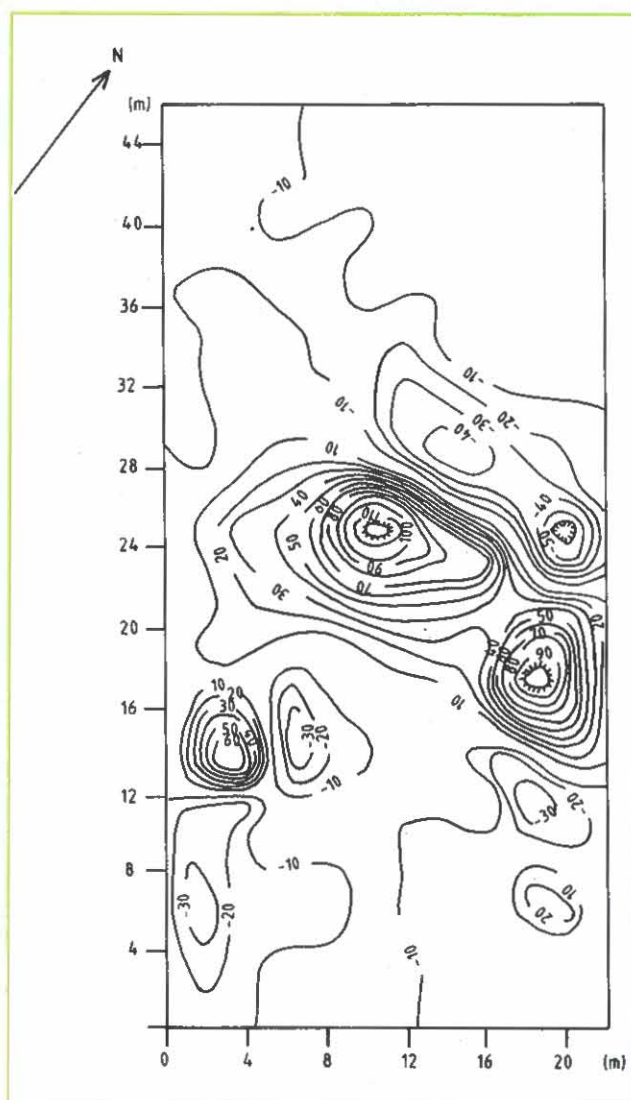


Fig. 6 — Mapa de redução ao pólo de Alcochete (contornos em nanoTesla)

Na Fig. 7, as localizações destes três núcleos foram projectados conjuntamente com a da ruínas já descobertas. É óbvio que o núcleo em (18,18), Fig. 6, e

A1 na Fig. 7, corresponde à parte ainda soterrada de um forno já descoberto. Contudo, o núcleo a (10,25), Fig. 6, e A na Fig. 7, deve constituir outra área de enorme interesse, tanto mais que está alinhado com A1 e o outro forno já completamente descoberto, Fig. 7.

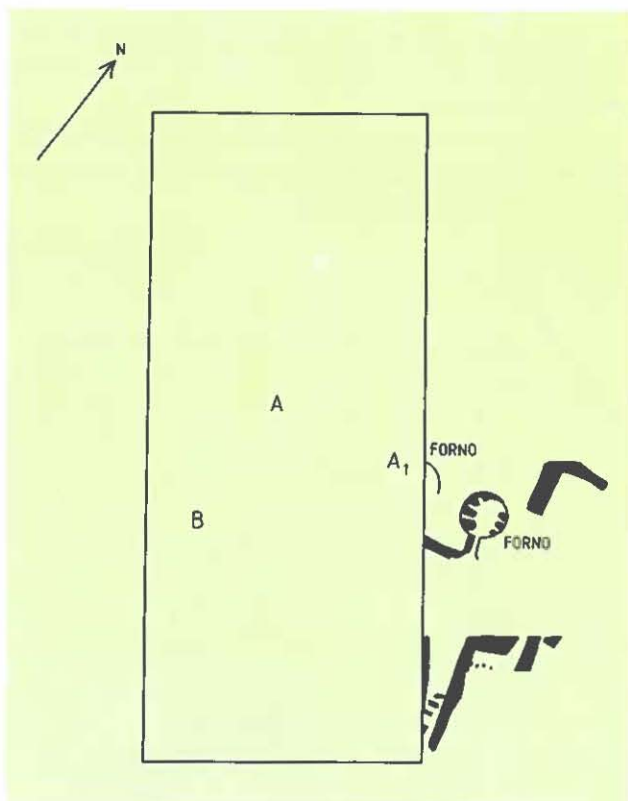


Fig. 7 — Escavações Arqueológicas em Alcochete

Quanto a (3,14), Fig. 6, ou seja B na Fig. 7, ele define outro ponto de interesse arqueológico, que pode estar na continuação de vestígios já descobertos, representados na parte inferior direita da Fig. 7.

## 5. Conclusões

As medidas de campo magnético terrestre são um meio expedito de obter informação relevante para perspetivar escavações arqueológicas, em particular, na presença de estruturas que sofreram aquecimento, tais como fornos, lareiras, cerâmica, etc.

Contudo, a inclinação dos vectores campo e magnetização pode «deslocar» as anomalias do local dos corpos que as provocam.

A redução ao pólo de dados de campo magnético terrestre permite «agudizar» as anomalias registadas, tornando-as mais claras e salientes do fundo magnético

regional e «focalizar» as anomalias, conferindo-lhes um aspecto mais simples de interpretar além de as centrar sobre os corpos que as provocam.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] TELFORD, W., GELDHART, L., SHERIFF, R., KEYS, D. — Applied Geophysics, Cambridge University Press, London (1979).
- [2] AITKEN, J. C. — Physics and Archaeology, Interscience, London (1961).
- [3] TITE, M. S. and ALFRED, J. C. — Aplicação dos métodos científicos de prospecção em estações arqueológicas portuguesas, (trad. por Alarcão), Trabalhos de Antropologia e Etnologia, Porto, vol. XX, fasc. 1-2, 147-160 (1965/66).
- [4] BREINER, S. — Applications manual for portable magnetometers, Geometrics, Sunnyvale, USA (1973).
- [5] SENOS MATIAS, M. J. e ALMEIDA, F. — A geophysical survey on the Archaeological site of Mugardos (NW Iberian Peninsula), Journal of Applied Geophysics, vol. 29, 119-124 (1992).
- [6] SENOS MATIAS, M. J. — Prospecção Magnética em Porto de Cacos, Almaden, II serie, n.º 1, 13-14 (1992).
- [7] BARANOV, V. — A new method for interpreting of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies, Geophysics, vol. 22, 359-383 (1957).
- [8] BARANOV, V. — Potential Fields and their transformations in Applied Geophysics, Geopublications Associates, monograph no. 6, Gebrueder Borntraeger, Berlin (1975).
- [9] BHATTACHARYA, B. — Two dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation, Geophysics, vol. 30, 829-857 (1965).
- [10] CASAS, A., PINTO, V., GENT, J., RIERA, S. e BURES, L. — Application de la Prospeccion Magnetica en la localizacion de hornos de ceramica romana de Naves (Llerida), Revista da Universidade de Aveiro — Geociências, vol. 5, 113-122 (1990).

## 1<sup>st</sup> European Conference on Synchrotron Radiation in Materials Science

3 - 8 July 1994

Chester, England

— Daresbury Laboratory —