

**Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Geologia**



**Desenvolvimento de uma metodologia para realização de levantamentos magnéticos marinhos para deteção de objetos**

**Sandra Cristina Pacheco da Silva**

**Dissertação  
Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território**

**2013**



**Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Geologia**



**Desenvolvimento de uma metodologia para realização de  
levantamentos magnéticos marinhos para deteção de  
objetos**

**Sandra Cristina Pacheco da Silva**

**Dissertação**

Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do  
Território

**Orientada por**

Rui Pires de Matos Taborda (DGEO/FCUL) e Fernando Acácio Monteiro  
dos Santos (DEGGE/FCUL)

**2013**



## Resumo

A caracterização ambiental é fundamental para operações de guerra de minas e de proteção portuária. Um dos principais fatores ambientais é o campo magnético da área de interesse.

Um levantamento do campo magnético de referência, para além de fornecer um registo do campo magnético terrestre, poderá permitir a deteção de vários objetos, à superfície ou enterrados, constituídos por vários materiais com comportamento magnético como: navios afundados, contentores, tubagens, infraestruturas portuárias, artefactos arqueológicos, etc.

Os objetos traduzem-se em anomalias magnéticas com baixa amplitude e curto comprimento de onda, normalmente desprezáveis na caracterização regional do campo magnético. A diferente escala de trabalho coloca problemas específicos, tornando-se necessário desenvolver e implementar uma metodologia desde a fase de planeamento até ao processamento e análise de dados, e encontrar as melhores soluções operacionais.

Este trabalho apresenta uma exposição das possíveis configurações a utilizar, os principais condicionantes a ter em conta na definição de um planeamento e as principais correções a aplicar num levantamento magnético no mar para a deteção de objetos. Esta exposição tem por base uma pesquisa da literatura existente sobre levantamentos magnéticos marinhos, a análise de ensaios realizados com o objetivo de determinação das principais correções a aplicar, e a realização de simulações de forma a responder a algumas das questões encontradas no desenvolvimento do trabalho. O processamento de dados e as simulações foram realizadas utilizando o *software* MATLAB (The MathWorks, Inc.).

Embora os exemplos tenham sido apresentados com base numa configuração com um só sensor, o trabalho apresentado permite definir uma metodologia que entre em conta com os vários condicionantes a considerar na realização de um levantamento magnético no mar para a deteção de objetos, e as principais correções a aplicar para qualquer configuração utilizada.

Palavras Chave: campo magnético, magnetómetro, deteção de objetos, metodologia.



## **Abstract**

One of the main supports for mine warfare and harbor protection is an environmental characterization. This requires an identification of the main environmental factors that affect naval operations including the characterization of the local magnetic field.

A characterization of a local magnetic field will show not just the Earth magnetic field itself but can also detect objects in the seabed or even buried (e.g. ship wrecks, pipelines, harbor and archeological artifacts among others), which are made of magnetic materials.

The magnetic signal of an object appears with a small amplitude and wavelength, normally not important in a regional magnetic characterization of an area. The work scale and the magnitude of this kind of anomalies leads to the necessity of implementing a workflow from survey plan to data analysis, in order to find better operational solutions.

This work exhibits the principal configurations to use, main constrains to take into account and the main corrections to be made on a magnetic marine survey for target detection. This work includes a biography research about marine magnetic surveys for target detection, the analysis of some trials executed to determine some of corrections to be applied and some simulations. Data processing and simulations were made in Matlab software (The Math Works Inc.).

Even though the presented trials were made with a single sensor configuration, this work permits a development of a workflow for a marine magnetic survey for target detection in any configuration.

Keywords: magnetic field, magnetometer, object detection, workflow.



## **Agradecimentos**

Este trabalho resultou do apoio e contribuição de muitas pessoas algumas das quais quero deixar aqui os meus agradecimentos:

Ao Prof. Fernando Santos e ao Prof. Rui Taborda pelo apoio e orientação na realização desta tese, desde o primeiro dia em que coloquei a questão de se uma metodologia poderia ser apresentada como uma tese de mestrado, até à sua conclusão.

Ao meu amigo e colega Luís Rosa pelas muitas horas de discussão, pelos conselhos e críticas construtivas que muito me ajudaram na elaboração deste trabalho.

Ao Instituto Hidrográfico pelo apoio no reingresso deste mestrado, sua disponibilidade financeira e dos meios que permitiram a realização deste trabalho.

Às guarnições dos navios NRP “Andrómeda” e NRP “Auriga” e respetivos comandantes pelo apoio, como sempre, nas missões realizadas, que muito contribuíram para este trabalho.

Aos meus amigos e colegas do Instituto Hidrográfico pelo apoio e ânimo não somente durante a elaboração da tese, mas desde o meu primeiro dia no Instituto. Um agradecimento muito especial às minhas amigas, camaradas e colegas Catarina Fradique e Laura Reis. Caras, já acabei a tese!

Ao Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra pela cedência de dados. Um agradecimento em especial ao Paulo Ribeiro pela sua disponibilidade e rápida resposta na solicitação dos dados.

No início do desenvolvimento deste trabalho muitas conversas foram trocadas com várias pessoas, a quem deixo aqui o meu agradecimento. Ao Prof. Miguel Miranda, Nuno Lourenço, Francisco Alves, Cristina Cabral, Pedro Henrique, obrigada pela vossa disponibilidade.

Por fim e não menos importante à minha família e aos meus amigos por todo o seu incentivo! A ti Nuno Santos, um agradecimento muito especial e com muito carinho pelo apoio INCONDICIONAL em todas as fases de realização deste trabalho.



# Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice de tabelas</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Siglas e abreviaturas</b> .....	<b>xv</b>
<b>Capítulo I - Introdução</b> .....	<b>1</b>
I.1 Definição do problema .....	1
I.2 Estrutura do trabalho.....	2
<b>Capítulo II - Medição do campo magnético no mar</b> .....	<b>5</b>
II.1 O Campo Magnético .....	5
II.2 Tipos de sensores.....	6
II.3 Montagem e configuração do sistema .....	12
II.4 Controlo da profundidade.....	16
II.5 Tipos principais de posicionamento .....	17
II.6 Discussão .....	19
<b>Capítulo III – Planeamento de um levantamento</b> .....	<b>23</b>
III.1 Propriedades magnéticas dos objetos a detetar .....	23
III.2 Cálculo da amplitude de uma anomalia magnética.....	26
III.3 Parâmetros a definir num levantamento. ....	29
III.4 Condicionantes num levantamento .....	30
III.5 Discussão .....	35
<b>Capítulo IV - Influência magnética de uma embarcação na medição do CM</b> .....	<b>41</b>
IV.1 Método de quantificação.....	41
IV.2 Exemplos de implementação.....	42
IV.3 Aplicação nas lanchas hidrográficas classe Andrómeda .....	44
IV.4 Discussão .....	50

<b>Capítulo V – Posicionamento dos dados.....</b>	<b>53</b>
V.1. Plano vertical .....	53
V.2. Plano horizontal .....	57
V.3. Exemplos na bibliografia de cálculo e aplicação do valor de <i>layback</i> .....	58
V.4. Discussão .....	68
<b>Capítulo VI – Medição do campo externo .....</b>	<b>73</b>
VI.1 O CE .....	73
VI.2 Correção e registo da variação do CE .....	76
VI.3 Discussão .....	79
<b>Capítulo VII – Conclusões e trabalhos futuros.....</b>	<b>83</b>
VII.1 Considerações finais e trabalhos futuros .....	91
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>93</b>
<b>Apêndice A – Principais unidades na medição do campo magnético.....</b>	<b>95</b>
<b>Apêndice B – Rotinas MATLAB.....</b>	<b>97</b>
B.1 Cálculo do afastamento médio da fiada planeada e fiada realizada .....	98
B.2 Cálculo da distância entre fiadas e a resolução espacial do levantamento	99
B.3 Cálculo da variação diurna.....	100
B.4 Aplicação da correção da variação diurna .....	101
B.5 Cálculo do valor de rumo ( <i>heading</i> ) e correção do CP para o planeamento circular.....	104
B.6 Cálculo do valor do rumo e correção do CP para o planeamento radial..	106
B.7 Cálculo do valor de <i>layback</i> pelo modelo simplificado de forças. ....	110
B.8 Aplicação do valor de <i>layback</i> à posição GPS.....	112
<b>Apêndice C – Metodologia para a realização de levantamentos magnéticos marinhos para deteção de objetos.....</b>	<b>117</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>119</b>

## Índice de figuras

Figura 1 – Imagem representativa do campo magnético terrestre. Retirado de <a href="http://solar.physics.montana.edu/yipop/Spotlight/Magnetic/what.html">http://solar.physics.montana.edu/yipop/Spotlight/Magnetic/what.html</a> .....	6
Figura 2 – Princípio de funcionamento do magnetómetro de fluxo. a) a c) sem a presença do CM; d) a e) com a aplicação do CM. Retirado de Kearey et al. [2002].....	7
Figura 3 – Princípio de funcionamento do magnetómetro de precessão protónica, onde $B_e$ é o CM local e $B_p$ é o campo magnético induzido superior a $B_e$ e de diferente direção. Retirado de Kearey et al. [2002].....	8
Figura 4 – Esquema básico da estrutura dos magnetómetros de excitação ótica. Retirado de Jones [1999].....	9
Figura 5 – Exemplo de um cabo extensor, a amarelo, do magnetómetro rebocado SeaSpy a um cabo em aço, cuja terminação mecânica se encontra abaixo da patesca. ....	13
Figura 6 – Colocação do magnetómetro na água. ....	13
Figura 7 – Exemplo da colocação de um magnetómetro estação de referência, Sentinel da MARINE MAGNETICS: imagem à esquerda, mostra a colocação da estação em terra e à direita mostra a preparação do fundeamento da mesma estação.....	14
Figura 8 – Exemplos de configuração em gradiómetro: Em cima numa configuração transversal, horizontal G-882 TVG da GEOMETRICS, e em baixo numa configuração longitudinal, SeaSpy da MARINE MAGNETICS. Retirado de: <a href="http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-882-marine-magnetometer/">http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-882-marine-magnetometer/</a> , e <a href="http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaSPY_2012.pdf">http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaSPY_2012.pdf</a> .....	15
Figura 9 – Exemplo de uma configuração com 4 sensores, o SeaQuest da MARINE MAGNETICS. Retirado de <a href="http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaQuest_2012.pdf">http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaQuest_2012.pdf</a> .....	15
Figura 10 – Exemplos de carenagem de cabos eletromecânicos. Retirado de Helmond [2001]. ....	17
Figura 11 – Figura com as principais configurações de sistemas de posicionamento acústico. De cima para baixo e da esquerda para a direita: Sistema SBL, Sistema LBL, Sistema combinado SBL e LBL (L/SBL) e Sistema USBL. Retirado de Vickery, [1998].....	19
Figura 12 - Relação da Bobjeto, $r$ e mobjeto, considerando um objeto ferroso de densidade $7,86 \text{ g/cm}^3$ e uma $X$ de 100. ....	27

Figura 13 – Da esquerda para a direita: anomalia magnética produzida por um objeto de massa $M$ ; anomalia magnética produzida por um objeto com massa $8M$ , a maior profundidade que o exemplo anterior; e a anomalia magnética produzida por um objeto de massa $M$ à mesma profundidade que o exemplo anterior. Retirado de Breiner [1975].	28
Figura 14 – Variação da amostragem de uma anomalia a várias taxas.	30
Figura 15 - Gráfico de exemplo de afastamento entre a fiada realizada e a fiada planeada com representação da direção e amplitude da vaga e do vento.	34
Figura 16 - Imagem representativa do cálculo da distância entre fiadas, para detecção de um objeto no fundo, com o sensor a duas distâncias ao fundo, A e B, e detecção de um objeto enterrado, C.	37
Figura 17 – Gráfico de relação da amplitude da anomalia magnética, produzida por uma mina do tipo cilíndrica, com uma massa de 100 Kg e $X_m$ de 0.0013 m <sup>3</sup> /Kg, com a distância ao fundo.	38
Figura 18 – Anomalia em dipolo. O número mínimo de amostras para representar esta anomalia encontra-se representada por círculos vermelhos.	39
Figura 19 – Variação do campo medido com o rumo do navio Discovery II. Retirado de Bullard e Mason [1961].	42
Figura 20 – Variação da anomalia magnética com o rumo do navio RRS Charles Darwin com o magnetómetro a ser rebocado a cerca de 250 m de distância a ré do navio. Os dados representados por pontos variam na hora local em que foram adquiridos e a curva adaptada foi calculada através do método dos mínimos quadrados, aplicando a equação (2). Retirado de Jones [1999].	43
Figura 21 – Gráfico com valores projetados do $F_{medido}$ versus o rumo do navio e a curva ajustada aos mesmos. Retirado de Kang et al. [2010].	44
Figura 22 – Projeção dos resultados obtidos com o magnetómetro rebocado a uma distância de 100 m do navio, a vermelho, de 150 m, a azul e a 250 m a verde. Nas mesmas cores encontram-se projetadas as curvas que melhor se ajustam. A) planeamento radial B) planeamento circular.	46
Figura 23 - Projeção dos resultados obtidos com o magnetómetro rebocado a uma distância de 80 m do navio, a vermelho, de 120 m, a azul e a 200 m a verde. Nas mesmas cores encontram-se projetadas as curvas que melhor se ajustam. A) planeamento radial B) planeamento circular.	47
Figura 24 – Representação gráfica dos coeficientes resultantes do ajustamento da equação (2), para cada ensaio realizado. De cima para baixo: Gráfico para medições realizadas no NRP Andrómeda e gráfico para as medições realizadas para NRP Auriga.	49

Figura 25 – Plano vertical do cálculo do posicionamento do magnetómetro. Magnetómetro rebocado, a partir de uma patesca colocada a ré da embarcação, a uma velocidade $V_{mag}$ .....	54
Figura 26 – Variação da profundidade do magnetómetro em função da velocidade de reboque e comprimento de cabo. Retirado de Breiner [1975]. .....	57
Figura 27 – Plano horizontal do cálculo do posicionamento do magnetómetro. Magnetómetro rebocado, a partir de uma patesca colocada a ré da embarcação, a uma velocidade $V_{mag}$ .....	57
Figura 28 – Esquema exemplificativo de reboque de um sistema de dois magnetómetros, configuração em gradiómetro longitudinal. Retirado de Hansen [1985]. .....	59
Figura 29 – Esquema exemplificativo de um sistema rebocado em profundidade, retirado de Hansen [1985]. .....	60
Figura 30 – Variação da profundidade em função da velocidade de reboque para o magnetómetro SeaSpy, com 120 m de cabo fora. A reta a azul representa um magnetómetro sem pesos adicionados e a reta a vermelho um magnetómetro com um total de peso adicionado de 5,442 kg. Retirado de Marine Magnetics Corp.....	61
Figura 31 – Cálculo do valor de layback através do teorema de Pitágoras e um fator de catenária, sugerido pelo software HYPACK, INC. ....	62
Figura 32 - Cálculo do valor de layback através do teorema de Pitágoras, sugerido pela L3 Klein Associates, Inc.....	63
Figura 33 – Coeficientes normal e tangencial de arraste para um cabo típico de reboque, retirado de Helmond [2001]. .....	65
Figura 34 – Variação de profundidade de um sistema rebocado: ângulo de equilíbrio do cabo ( $\Phi_0$ ) e ângulo entre o cabo e o veículo ( $\Phi_1$ ). Retirado de Helmond [2001]. .....	66
Figura 35 – Aplicação do valor de layback. Retirado de Geometrics Inc.....	67
Figura 36 – Cálculo do valor de layback a partir das forças de peso ( $W$ ) e forças de arrasto ( $T$ ).....	69
Figura 37 – Gráficos de comparação do cálculo do valor de layback a partir dos três métodos apresentados, para diferentes comprimentos de cabo e diferentes profundidades.....	70
Figura 38 – Valor de layback calculado através do método das forças para um equipamento rebocado, a 50 m de profundidade e com 100 m de comprimento de cabo, para cinco cabos com o mesmo diâmetro, 0,01 m, mas com diferentes pesos.....	71

Figura 39 – Representação do posicionamento da embarcação e do resultado de posicionamento do magnetómetro por dois métodos, deslocamento e arraste.....	72
Figura 40 – Variação da componente $S_q$ ao longo de várias latitudes para a componente vertical, horizontal e para a declinação do CMT, retirado de Regan e Rodriguez, [1981]. .....	74
Figura 41 – Registo de uma tempestade magnética pelo observatório geomagnético de Guam, ilha situada no Oceano Pacífico. Retirado de Regan e Rodriguez, [1981]. .....	75
Figura 42 – Espectro de amplitude de pulsações geomagnéticas em relação à sua frequência. Retirado de <a href="http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/22/magnetic_pulsations">http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/22/magnetic_pulsations</a> . .....	75
Figura 43 – Localização do Observatório de Coimbra e dos três observatórios magnéticos mais próximos de Portugal continental. Imagem editada e retirada do Google Earth, Google Inc.....	77
Figura 44 – Variação do CE em 24h dos observatórios de Coimbra, em Portugal, e de San Fernando, Ebro e Toledo em Espanha. As setas indicam episódios de variações não periódicas, micropulsações, registados nos quatro observatórios.....	78
Figura 45 - Variação do CE da estação do observatório de Coimbra e de uma estação colocada na Nazaré para a correção de um levantamento. ....	78
Figura 46 – Micropulsção do tipo Pi2, impulsiva, registada numa estação, com uma amplitude máxima de cerca de 6 nT. Retirado de Samson, [1991].....	81

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Tabela resumo de algumas características dos principais magnetômetros marinhos. Informação retirada de: (*) <a href="http://www.planet-electronics.co.uk/specification.htm">http://www.planet-electronics.co.uk/specification.htm</a> ; (**) <a href="http://www.hydro-international.com/productsurvey/id17-Magnetometers_janfeb.html">http://www.hydro-international.com/productsurvey/id17-Magnetometers_janfeb.html</a> ; (***) <a href="http://www.marinemagnetics.com/products/seaspy">http://www.marinemagnetics.com/products/seaspy</a> ; (****) <a href="http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-882-marine-magnetometer/">http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-882-marine-magnetometer/</a> .....	11
Tabela 2 – Valores de suscetibilidade magnética , $X$ , de alguns materiais. Adaptado de Jankowsky e Sucksdorff [1996] .....	26
Tabela 3 – Valores de amplitudes máximas de anomalias magnéticas produzidas por alguns objetos mais comuns. Adaptado de Breiner [1975].....	28
Tabela 4 – Valores de resolução espacial para diferentes velocidades de levantamento e taxas de amostragem. ....	29
Tabela 5 – Coeficientes e principais parâmetros estatísticos resultantes do ajustamento da equação (2), para cada ensaio realizado. ....	48



## **Siglas e abreviaturas**

AUV – *Autonomous Underwater Vehicles*

CA – Componente Antropogénica

CC – Campo Crustal

CD – Coeficiente de Determinação

CE – Campo Externo

CGS – Unidades Comprimento, Massa e Segundo (*Centimeter, Gram and Second*)

CM – Campo Magnético

CMT – Campo Magnético Terrestre

CP – Campo Principal

CTD – *Conductivity, Temperature, Depth*

DGPS – Differential Global Positioning System

EGNOS – European Geostationary Navigation Overlay Service

EQM - Erro Quadrático Médio

EMM2010 – Enhance Magnetic Model

GLONASS – GLObal naya NAvigatsionnaya Sutnikovaya System

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS – Global Positioning System

HDGM – High Definition Geomagnetic Model

IAGA – International Association of Geomagnetism and Aeronomy

IGRF – International Geomagnetic Reference Field

IGUC – Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra

INTERMAGNET – International Real-time Magnetic Observatory Network

IODP – Integrated Ocean Drilling Program

LBL – *Long Baseline*

MCM – *Mine Countermeasures*

NGDC – National Geophysical Data Center

NRP – Navio da República Portuguesa

PVC – Policloreto de polivilina

ROV – *Remotely Operated Vehicles*

RRS – Royal Research Ship

R/V – Research Vessel

SBL – *Short Baseline*

SI – Sistema Internacional

SEPLAT – Sedimentos Superficiais da Plataforma Continental

USBL – *Ultra Short Baseline*

USS – United States Ship

VHF – *Very High Frequency*

**“We live in a magnetic world”**

*Stephen Pumphrey em*

*Latitude & The Magnetic Earth*



## Capítulo I - Introdução

Um dos suportes para operações de guerra de minas e de proteção portuária, é a caracterização ambiental. Esta caracterização contempla inúmeros fatores entre os quais, fatores atmosféricos, morfológicos, acústicos, geofísicos e antropogénicos. Os fatores ambientais de natureza geofísica incluem, entre outros, uma caracterização do campo magnético da área de interesse [NAP, 2003].

As operações de guerra de minas dividem-se em dois tipos principais: a colocação de minas, e a sua deteção e destruição (ação de contra medidas ou *Mine Countermeasures - MCM*) [NAP, 2001]. Em ambas as operações é necessário conhecer o valor do campo magnético local. Na colocação de minas, mais especificamente de minas de influência magnética, ter-se-á de ter em conta o valor do campo magnético local e o valor da influência magnética dos navios que irão colocar as minas, ou para os quais as minas serão ativadas. Nas operações MCM, especificamente em ações de deteção e identificação de minas (*minehunting*), é necessário o conhecimento do valor de referência para o campo magnético local, onde a deteção ocorre, para que a procura seja feita para novas anomalias e não para as previamente existentes.

Em casos de proteção portuária um valor de referência para o campo magnético local é de extrema importância. Numa situação de queda de contentores, afundamento de embarcações, queda de pontes, entre outras situações de catástrofe, é necessário que a sua deteção seja suficientemente célere. Esta necessidade pode-se dever à recuperação de possíveis vítimas e/ou de garantir a segurança da navegação, como por exemplo na necessidade de reabertura de um porto à navegação. A existência prévia de um levantamento magnético de referência, poderá reduzir em muito o tempo de reconhecimento de novas anomalias.

Um levantamento do campo magnético de referência, para além do registo do campo magnético terrestre (CMT) local, deverá detetar vários objetos, à superfície ou enterrados, constituídos por vários materiais com comportamento magnético como: navios afundados, contentores, tubagens, partes de guias e outras estruturas dos navios e de infraestruturas portuárias, artefactos arqueológicos, etc.

### I.1 Definição do problema

Para a definição de um procedimento de execução de um levantamento magnético para deteção de objetos, foi realizada uma vasta pesquisa bibliográfica onde não foi encontrada,

de uma forma estruturada, uma metodologia. Grande parte da bibliografia refere-se à caracterização do campo magnético regional de uma área, para fins geológicos. Porém a detecção de objetos, que originam anomalia locais, necessita de uma abordagem diferente à encontrada.

Os objetos traduzem-se em anomalias magnéticas com baixa amplitude e curto comprimento de onda, normalmente desprezáveis na caracterização regional do campo magnético. A escala de trabalho e a amplitude da anomalia colocam problemas específicos, pelo que se torna necessário desenvolver e implementar uma metodologia desde a fase de planeamento até ao processamento e análise dos dados, e encontrar as melhores soluções operacionais.

Num levantamento de referência, que tenha que traduzir a presença de objetos, terá que se ter em conta os principais condicionantes à sua realização, nomeadamente:

- a configuração do sistema a utilizar,
- o planeamento do levantamento,
- o posicionamento dos dados,
- e as principais correções a realizar.

## **I.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho apresenta e discute alguns dos principais condicionantes na realização de um levantamento magnético marinho para detecção de objetos, estando estruturado da seguinte forma:

No capítulo II apresentam-se os tipos de sensores existentes, configuração e posicionamento e discute-se a melhor solução para o objetivo inicialmente proposto.

No capítulo III são apresentadas fórmulas fundamentais na detecção de objetos, parâmetros e condicionantes de um levantamento, e discutida a sua importância para a definição de um planeamento.

No capítulo IV é apresentado o modelo de cálculo da influência magnética de uma embarcação na medição do campo magnético, de Bullard e Mason [1962]. São apresentados exemplos práticos de cálculo retirados da bibliografia e a aplicação prática ao cálculo da influência magnética das lanchas hidrográficas da classe Andrómeda (Marinha

Portuguesa), utilizadas para este trabalho. Por fim é feita uma discussão de como melhor determinar esta influência com base nos dados apresentados.

No capítulo V apresentam-se alguns dos modelos e algoritmos de cálculo do posicionamento de veículos marinhos rebocados. Discute-se qual o método que melhor responde ao real comportamento de um sistema rebocado, de modo a que se consiga posicionar devidamente os dados adquiridos.

No capítulo VI apresentam-se as principais variações do CE e de que forma é feito o seu registo. No fim é feita uma discussão de que forma é feita a sua correção.

Por fim, no capítulo VII são apresentadas as conclusões do trabalho apresentado, considerações finais e proposta de trabalhos a desenvolver no futuro.

Todo o trabalho apresentado tem por base: 1) uma pesquisa da literatura existente sobre levantamentos magnéticos marinhos, dando maior importância aos referentes à deteção de objetos; 2) a análise de ensaios realizados, com principal objetivo de determinação das correções a aplicar; 3) e a realização de simulações de forma a responder a algumas das questões encontradas no desenvolvimento do trabalho. O processamento de dados e as simulações foram realizados utilizando o *software* MATLAB versão 2012b (The MathWorks, Inc.).

Em anexo encontram-se três apêndices:

- Apêndice A onde se apresentam as principais unidades usadas na medição do campo magnético;
- Apêndice B onde se apresentam as principais rotinas simplificadas desenvolvidas no *software* Matlab para o processamento dos dados apresentados;
- Apêndice C onde se apresenta resumida uma metodologia para a realização de levantamentos magnéticos marinhos para deteção de objetos.

Todas as unidades apresentadas neste trabalho encontram-se no Sistema Internacional (SI), salvo contrário será mencionado.



## Capítulo II - Medição do campo magnético no mar

As primeiras medições do campo magnético no mar tiveram como principal preocupação a determinação da declinação, entre a agulha magnética (norte magnético) e o norte geográfico (através da observação do céu), dada à sua importância para a navegação. Durante a Segunda Guerra Mundial surgiu a necessidade de detecção de submarinos, e esta necessidade levou ao desenvolvimento do primeiro magnetômetro marinho rebocado, o magnetômetro de fluxo [Jones, 1999].

Atualmente, os levantamentos com magnetômetros marinhos são utilizados para fins de detecção de anomalias quer de natureza geológica, a nível regional ou local, quer de natureza antropogénica, detecção de objetos com ou sem interesse arqueológico.

De acordo com o objetivo inicialmente colocado, os meios e disponibilidade financeira, existem várias configurações pelas quais se pode optar em relação: ao tipo de sensor, ao número de sensores, à sua colocação num veículo rebocado ou num veículo autónomo, ao tipo de posicionamento utilizado, entre outros.

### II.1 O Campo Magnético

O campo magnético (CM) medido num determinado local será a soma do campo magnético terrestre (CMT) com uma componente antropogénica (CA).

O CMT é estudado assumindo que este se assemelha a um íman permanente, cujo polo positivo se encontra junto ao polo sul geográfico e o polo negativo junto ao polo norte geográfico. Este dipolo provoca um fluxo magnético cujas linhas de fluxo se deslocam do polo sul para o polo norte, magnéticos (figura 1).

O CMT resulta da sobreposição de três campos magnéticos: campo principal (CP), campo crustal (CC) e campo externo (CE). O CP tem origem no núcleo externo e o seu estudo é realizado através da análise de séries temporais obtidas pelas medições realizadas por observatórios magnéticos (em terra e/ou no espaço). Destas observações surgem modelos matemáticos como o International Geomagnetic Reference Field (IGRF) que determinam um conjunto de coeficientes que melhor se aproximam ao valor do CP. O CC resulta da soma das propriedades magnéticas de todo o material geológico existente na crosta terrestre. Existem modelos já desenvolvidos que cartografam a variação deste campo. Alguns exemplos dos modelos existentes do CP e do CC serão apresentados no capítulo III. Por fim, o CE que tem a sua origem na interação dinâmica entre os campos magnéticos da

Terra e do Sol. Desta interação resulta uma variação, periódica e não periódica, cuja correção nos dados de CM é importante e que será abordada em maior pormenor no capítulo VI.

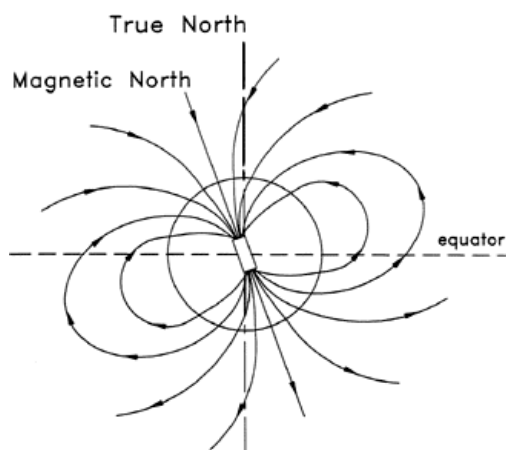


Figura 1 – Imagem representativa do campo magnético terrestre. Retirado de <http://solar.physics.montana.edu/ypop/Spotlight/Magnetic/what.html>.

A CA é definida por todos os objetos de origem humana com propriedades magnéticas existentes na superfície terrestre e/ou enterrados a poucos metros de profundidade. Para a sua deteção, objetivo inicialmente proposto, a devida correção dos campos que constituem o CMT é importante, como será abordado no capítulo III.

Um resumo das principais unidades de medição do CM encontram-se no Apêndice A.

## **II.2 Tipos de sensores**

Um magnetómetro é um sensor que mede a densidade do fluxo magnético ( $B$ ), que é diretamente proporcional à força do campo magnético ( $H$ ), sendo capaz de registar o CM local (CMT + CA). Os dados registados podem ser anomalias dinâmicas, relacionadas com a atividade do campo principal, origem no núcleo, e/ou com a atividade solar, como podem também ser anomalias estáticas que estão relacionadas com os diferentes tipos de materiais presentes na crosta terrestre [Hrvoic e Hollyer], quer de origem geológica, quer de origem antropogénica.

Os magnetómetros são divididos quanto ao modo de medição, em dois tipos principais: os que medem a densidade do fluxo numa determinada direção no espaço, denominados por vetoriais, e os que apenas medem a magnitude do vetor independentemente da sua direção, denominados por escalares. Os principais tipos de sensores utilizados para levantamentos

magnéticos no mar são os magnetômetros de fluxo, os de precessão protônica e os de excitação ótica.

Os magnetômetros de fluxo (*fluxgate*) possuem um sensor constituído por dois núcleos de um material com uma permeabilidade magnética muito elevada, paralelos entre si. À volta dos núcleos são colocados dois enrolamentos (primário e secundário) em sentidos contrários. O tipo de material utilizado permite que, mesmo em zonas de baixo campo magnético, este seja saturado magneticamente (indução magnética). Uma corrente alterna é aplicada ao enrolamento primário e conseqüentemente é gerado um campo magnético suficiente para levar à saturação dos dois núcleos. Conseqüentemente o campo magnético gerado no enrolamento secundário terá igual direção, mas de sentido contrário, como se pode verificar na figura 2 a) e b). Quando um CM é aplicado, este é somado ao campo do núcleo, a menos que o campo seja perpendicular [Kearey et al., 2002]. Quando a saturação é atingida gera-se um atraso entre os dois campos induzidos, resultando num sinal, em tensão, cuja amplitude é proporcional ao CM local (figura 2 c) a e)).

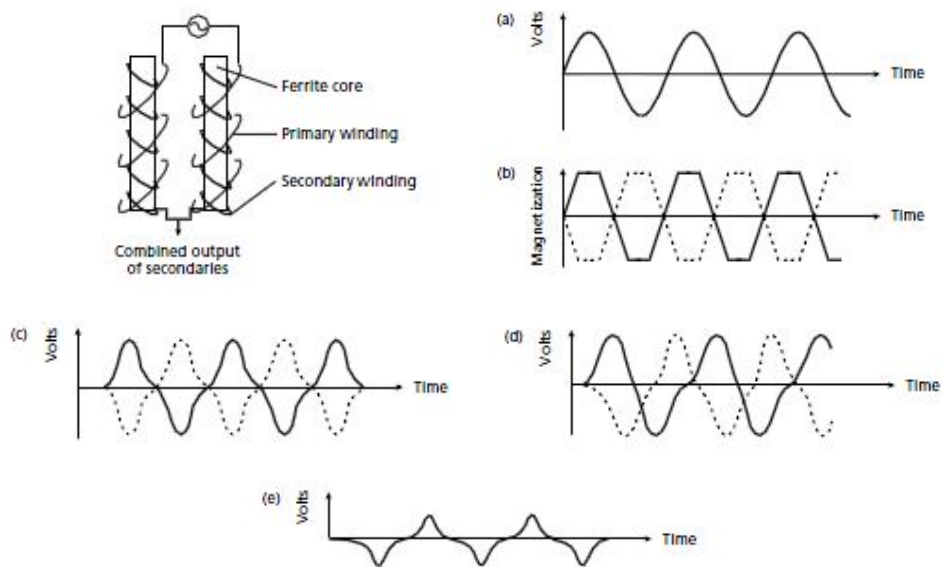


Figura 2 – Princípio de funcionamento do magnetômetro de fluxo. a) a c) sem a presença do CM; d) a e) com a aplicação do CM. Retirado de Kearey et al. [2002].

O CM pode ser definido por três componentes: vertical (Z), sul-norte (X) e oeste-este (Y). Para a medição das três componentes são necessários três magnetômetros de fluxo montados perpendicularmente entre si, num sistema de suspensão controlado por motores [Jones, 1999]. Dois dos sensores são rodados até medirem campo zero e o terceiro mede o valor de campo, na direção em que se encontra. Este tipo de magnetômetro é considerado como um instrumento vetorial e relativo, pois determina a direção do campo medido, no

entanto, necessita de ser calibrado com um instrumento absoluto pois é sensível a variações de temperatura.

Os magnetômetros de precessão protónica são instrumentos escalares cujo funcionamento se baseia na ressonância magnética dos núcleos dos átomos de hidrogénio, ou de céσιο, quando submetidos a um CM [Kearey et al., 2002]. O sensor consiste num contentor com um pequeno volume de fluido (querosene ou metanol) rico em protões, cercado por um enrolamento de fio condutor (figura 3 a)). Os protões atuam como pequenos dipolos que se alinham paralelamente ao CM local (figura 3 b)).

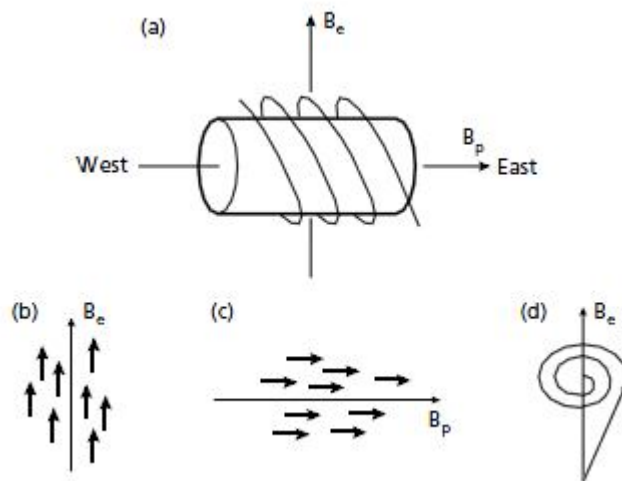


Figura 3 – Princípio de funcionamento do magnetómetro de precessão protónica, onde  $B_e$  é o CM local e  $B_p$  é o campo magnético induzido superior a  $B_e$  e de diferente direção. Retirado de Kearey et al. [2002].

Induzindo à volta do líquido, um campo magnético artificial muito superior ao CM local e com outra direção, irá provocar o realinhamento dos spins dos protões de acordo com a nova direção, ocorrendo a sua polarização (figura 3 c)). Após alguns segundos esse campo é desligado e os protões alinham-se com a direção do CM local, sendo esse alinhamento acompanhado de um movimento de precessão (figura 3 d)).

Uma das limitações destes instrumentos é o tempo entre duas medições consecutivas. Sendo necessário um ciclo de polarização e um de medição, tem de se garantir de que não exista uma sobreposição entre os tempos de ambos. Para resolver este problema surgiu uma variante do magnetómetro de precessão protónica que recorre ao efeito *Overhauser* [Miranda et al., 2010]. Este efeito consiste na adição, ao líquido rico em protões, de um líquido rico em radicais livres (um átomo com eletrões livres). Esta adição possibilita um aumento da taxa de polarização e permite a aplicação de um campo magnético na banda

radiofrequência que corresponde a uma energia específica de um nível de energia, requerendo menos energia e conseqüentemente possibilitando o aumento da frequência de amostragem [Marine Magnetics, 2002].

Por fim, os magnetômetros de excitação ótica, ou de efeito de *Zeeman*. Este tipo de magnetômetros utiliza metais alcalinos como césio, rubídio, potássio ou sódio, ou gás nobre hélio. O seu processo consiste na polarização de um destes elementos, colocados numa célula na sua forma gasosa, através da incidência de um feixe de luz de um determinado comprimento de onda. Numa fase inicial os seus elétrons de valência encontram-se espalhados entre os níveis de energia 1 e 2. Posteriormente, um comprimento de onda definido irá levar os elétrons para o nível de energia 3, num processo denominado por polarização. Nesta fase, os elétrons que se encontram no nível de energia 3 são instáveis e irão procurar ir para os níveis de energia mais baixos, 1 e 2. No decorrer este movimento, o nível 1 irá ficar quase totalmente preenchido e o nível 2 menos preenchido. Este processo, denominado por excitação ótica, leva a que a célula pare de absorver luz passando de opaca para transparente. A despolarização ocorre por aplicação de uma energia na ordem da radiofrequência. O comprimento de onda correspondente à diferença de energia entre os níveis de energia 1 e 2 despolariza a célula e é a medição do CM local. A despolarização é extremamente rápida fazendo com que a medição realizada seja instantânea [Kearey et al., 2002], resultando em elevadas taxas de amostragem. Um esquema da estrutura básica destes magnetômetros encontra-se representado na figura 4.

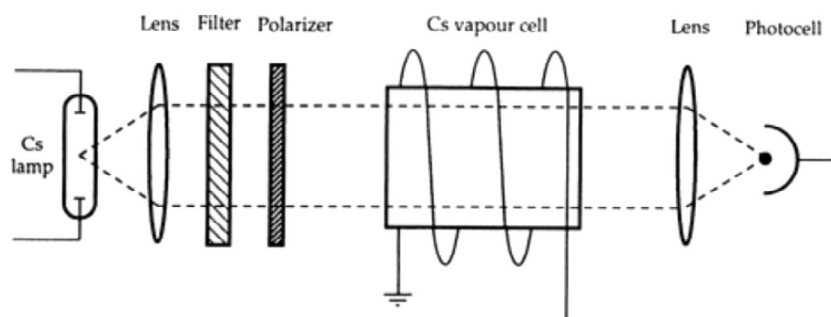


Figura 4 – Esquema básico da estrutura dos magnetômetros de excitação ótica. Retirado de Jones [1999].

Devido à influência dos núcleos dos respectivos elementos, todos os seus elétrons de valência possuem diferentes níveis de energia (efeito de *Zeeman*), cada um proporcional ao CM. As transições entre níveis adjacentes de energia são chamadas de linhas espectrais. No caso do Césio, elemento mais utilizado neste tipo de sensores, tem 14 linhas espectrais,

cada uma com 20 nT de diferença entre si. Como a medição ocorre num conjunto de linhas espectrais, a variação da magnitude dos níveis de energia sobrepõem-se originando alguns erros na medição consoante a orientação do sensor [Hrvoic e Hollyer].

Na escolha ou mesmo comparação entre magnetómetros existem algumas características importantes que devem ser tidas em conta. De seguida faz-se uma breve apresentação e definição de algumas destas características.

A resolução (*resolution*) é uma característica que define a variação mínima do campo que o magnetómetro consegue registar. É importante que a resolução do seu contador seja inferior à mínima diferença do CM que o magnetómetro consegue registar, para que não se gerem erros na medição [Geometrics, 2000]. A resolução é um valor que é limitado pelo nível de ruído interno do magnetómetro [Jankowsky e Sucksdorff, 1996]. Este valor é dado normalmente em nT.

A zona de operação (*operating range*) refere-se ao valor, máximo e mínimo, que o magnetómetro regista. Uma maior zona de operação significa uma melhor resposta por parte do magnetómetro [Geometrics, 2000]. Esta característica é normalmente dada por dois valores, limite máximo e mínimo, em nT.

O erro absoluto (*absolute error*) é definido pela diferença entre a média de leituras feitas pelo magnetómetro e a média do valor do CM que mede. Este valor vai variando ao longo do tempo a uma determinada taxa, e é importante conhecê-lo [Geometrics, 2000]. Este valor é dado normalmente em nT.

O valor quadrático médio (*root mean square, RMS*), ou valor eficaz, dá-nos o valor da variabilidade dos dados. Calcula-se através da raiz quadrada da soma dos quadrados de cada valor registado, dividido pelo número total dos valores [Geometrics, 2000]. Este valor é dado normalmente em nT.

O ruído (*noise*) determina uma variação que não é devida à alteração do campo. Este valor vem atribuído, normalmente, à sensibilidade (*sensitivity*) e deveria ser dado em unidades de valor de campo, nT, pela raiz quadrada da frequência de amostragem, Hz [Geometrics, 2000]. Porém, este valor é dado normalmente em nT, sendo importante procurar-se saber qual a frequência a que se refere.

O erro de rumo (*heading error*) define a diferença na medição do campo consoante a orientação do sensor, num CM local constante. As causas deste erro podem ser devidas a dois fatores: aos princípios físicos nos quais se baseiam as medições do campo, ou a

própria suscetibilidade magnética dos materiais constituintes do sensor [Geometrics, 2000]. Este valor é normalmente atribuído ao erro total em 360° e é fornecido em nT.

Uma zona morta (*dead zone*) é uma série de orientações, em relação ao CM, nas quais o sensor não produz nenhuma medição. O valor é normalmente dado em graus e representa os ângulos entre o CM local e o sensor no qual não se obterá qualquer medição.

Na tabela 1 encontram-se algumas características de diferentes magnetómetros marinhos com diferentes sensores.

Tabela 1 – Tabela resumo de algumas características dos principais magnetómetros marinhos. Informação retirada de: (\*)<http://www.planet-electronics.co.uk/specification.htm>; (\*\*) [http://www.hydro-international.com/productsurvey/id17-Magnetometers\\_janfeb.html](http://www.hydro-international.com/productsurvey/id17-Magnetometers_janfeb.html); (\*\*\*) <http://www.marinemagnetics.com/products/seaspy>; (\*\*\*\*) <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-882-marine-magnetometer/>.

Modelo FABRICANTE	Tipo de Sensor	Taxa máxima de amostragem (Hz)	Resolução (nT)	Zona de operação (nT)	Zonas mortas	Erro de heading
MX500(*)(**) PLANET ELECTRONICS LDA.	Precessão protónica	0.5	0.5	25000 a 65000	Não tem	Não tem
Magis300(**) IXSEA descontinuado	Ressonância magnética	10	0.01	25000 a 75000	Não tem	Não tem
SeaSpy(***) MARINE MAGNETICS	Precessão protónica de efeito <i>Overhauser</i>	4	0.001	18000 a 120000	Não tem	Não tem
G882(****) GEOMETRICS	Excitação ótica utilizando vapor de Césio	10	0.001	18000 a 90000	<6° do eixo longitudinal e transversal do sensor	<0.1 nT em 360°

Na impossibilidade de testar todos os magnetómetros, a melhor forma de decidir qual o sensor que melhor se adequa ao objetivo proposto, é através da comparação entre as fichas com as características de cada magnetómetro. O que normalmente dificulta o estudo das características enunciadas anteriormente, entre outras, é a sua forma de apresentação e os respetivos nomes atribuídos. Nestas situações a única solução é colocar as questões necessárias aos fabricantes.

### **II.3 Montagem e configuração do sistema**

Para a realização de um levantamento magnético no mar é normalmente utilizada uma plataforma, embarcação, em que grande parte da sua estrutura poderá ser constituída por material ferromagnético, situação esta que irá ser abordada nos capítulos III e IV, e cujo sistema de propulsão e geradores de energia geram campos eletromagnéticos que irão inevitavelmente afetar, senão mesmo impossibilitar, a medição do campo a partir da mesma. Tendo em atenção esta limitação a única forma de realizar levantamentos magnéticos no mar passa por rebocar o sistema de medição, o magnetómetro, a ré da plataforma através de um cabo.

Um magnetómetro marinho rebocado é constituído basicamente por: uma estrutura de forma cilíndrica, robusta e estanque, normalmente em PVC (policloreto de polivinila) ou em fibra de vidro (materiais não magnéticos), contendo no seu interior um recipiente com um sensor que permite fazer a medição do campo magnético e uma zona de eletrónica que permite fazer a conversão do valor medido e a sua digitalização; um cabo eletromecânico, suficientemente resistente para o reboque do magnetómetro, preparado para fornecimento de energia, e transmissão de dados; e uma unidade de superfície que recebe os dados do magnetómetro, envia as configurações definidas (por exemplo a taxa de amostragem) e a alimentação necessária para o sensor.

O cabo eletromecânico encontra-se normalmente enrolado num tambor, manuseado manualmente, ou num guincho que devem ser bem fixos à plataforma de reboque. No cabo a tração pode ser feita por uma fibra sintética de *kevlar* (normalmente designado por cabo leve), ou por arames de aço (normalmente designado por cabo armado). O cabo em aço é normalmente utilizado para que o magnetómetro atinja uma maior profundidade com menor comprimento de cabo, devido ao seu maior peso. Porém, ter-se-á de ter em conta a possível influência magnética nos registos devido às suas propriedades magnéticas. Esta influência irá variar proporcionalmente com o diâmetro e comprimento do cabo. De forma a reduzir esta influência, existe a possibilidade de colocação de um cabo extensor em *kevlar* entre o cabo em aço e o magnetómetro (figura 5).



Figura 5 – Exemplo de um cabo extensor, a amarelo, do magnetómetro rebocado SeaSpy a um cabo em aço, cuja terminação mecânica se encontra abaixo da patesca.

O magnetómetro é normalmente lançado a ré de uma embarcação através de uma patesca, garantido que o seu lançamento seja feito longe da embarcação, ou simplesmente à mão como se pode ver na figura 6.



Figura 6 – Colocação do magnetómetro na água.

Existem várias configurações possíveis para este sistema acima descrito, consoante o número de magnetómetros utilizados.

A configuração mais comum é a de um só magnetómetro, cuja operação foi descrita anteriormente. No entanto, é necessário, como descrito inicialmente, realizar as devidas

correções dos campos que constituem o CMT, nomeadamente o CE, para a deteção de objetos. Para o registo da variação do CE, para posterior correção dos dados adquiridos, pode ser utilizado um outro magnetómetro que adquira num determinado local a variação do CMT, sendo que no mesmo local o CP e o CC são constantes. Estes magnetómetros são normalmente concebidos para serem colocados em terra, porém existe, até agora, um fabricante que produziu estes magnetómetros de modo a serem fundeados (figura 7).



Figura 7 – Exemplo da colocação de um magnetómetro estação de referência, Sentinel da MARINE MAGNETICS: imagem à esquerda, mostra a colocação da estação em terra e à direita mostra a preparação do fundeamento da mesma estação.

Existe também a possibilidade de utilizar dois magnetómetros, cuja configuração é designada por gradiómetro. Neste tipo de configuração os magnetómetros são fixos numa plataforma rebocável, com uma determinada distância entre ambos, possibilitando a medição de um gradiente. Os dois magnetómetros podem ser colocados transversalmente, na horizontal ou na vertical, ou mesmo longitudinalmente dependendo do objetivo de deteção (figura 8).



Figura 8 – Exemplos de configuração em gradiómetro: Em cima numa configuração transversal, horizontal G-882 TVG da GEOMETRICS, e em baixo numa configuração longitudinal, SeaSpy da MARINE MAGNETICS. Retirado de: <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-882-marine-magnetometer/>, e [http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaSPY\\_2012.pdf](http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaSPY_2012.pdf).

Certos fabricantes oferecem ainda a possibilidade de incorporar mais de que dois magnetómetros, permitindo assim medir o campo magnético em mais do que uma direção. Mais uma vez os magnetómetros são colocados numa plataforma fixa rebocável, com uma determinada distância entre eles, e orientados segundo três eixos (figura 9).



Figura 9 – Exemplo de uma configuração com 4 sensores, o SeaQuest da MARINE MAGNETICS. Retirado de [http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaQuest\\_2012.pdf](http://www.marinemagnetics.com/wordpress/wp-content/themes/marine/brochures/SeaQuest_2012.pdf).

Os sistemas com configuração em gradiómetro podem dispensar a utilização de um magnetómetro de referência. Como o sinal está a ser adquirido em simultâneo por dois ou mais sensores, as variações espaciais, CP e CC, e temporais, CE, cujos comprimentos de onda são inferiores à distância entre os sensores são removidas. Deste modo, ficará somente o registo de anomalias cujo comprimento de onda é superior à distância entre os sensores, entre os quais as anomalias correspondentes à componente antropogénica. Um

sistema com dois ou mais sensores também permitirá determinar a direção do CM e, conseqüentemente, a forma dos objetos e a sua distância.

As configurações apresentadas até agora mostram a utilização de sensores magnéticos numa plataforma sem qualquer outro sensor, porém, os magnetômetros marinhos podem também ser acoplados a outras plataformas como ROVs (*Remotely Operated Vehicles*) ou AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), que possuem normalmente diversos sensores incorporados como sonares de varredura lateral, perfiladores de sedimentos, CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), câmaras, etc. Estes sensores, montados numa mesma plataforma, permitem uma maior eficácia na deteção e identificação de um objeto.

É de referir ainda que o próprio magnetómetro poderá incluir na sua configuração alguns sensores tais como: sensor de pressão, dando a profundidade relativa à superfície da água, sensor de altitude, dando a distância ao fundo, sensor de *heading*, ou mesmo, no caso prático do SeaQuest, da MARINE MAGNETICS, um sensor de atitude que mede os movimentos da plataforma fixa onde se encontram montado. Estes sensores auxiliam o cálculo do seu posicionamento como será abordado mais à frente.

### II.4 Controlo da profundidade

A magnitude de uma anomalia magnética é inversamente proporcional ao cubo da distância ao objeto que a originou, como se verá no capítulo III. Devido a esta relação, e para a deteção de objetos, é importante que o magnetómetro siga o mais próximo possível do fundo. A profundidade do magnetómetro, e conseqüentemente a distância ao fundo, dependerá de vários fatores que serão discutidos mais em pormenor no capítulo V. No entanto, sendo este capítulo a discussão da configuração do sistema, faz sentido enunciar algumas das medidas que normalmente são aplicadas para que o magnetómetro rebocável ganhe maior profundidade e se aproxime mais do fundo.

Um dos principais problemas em sistemas rebocados são as forças de arrasto sofridas pelo conjunto cabo e sensores. Esta força é uma resistência criada no conjunto cabo e sensores, que por sua vez, se move a uma determinada velocidade no fluido envolvente, a água do mar. No que diz respeito à força exercida no cabo, esta pode ser minimizada aplicando uma estrutura com uma forma hidrodinâmica, ao longo do cabo, para que o seu movimento siga uma linha tangente à corrente minimizando a sua resistência (figura 10). Este processo é denominado *fairing* (carenagem).

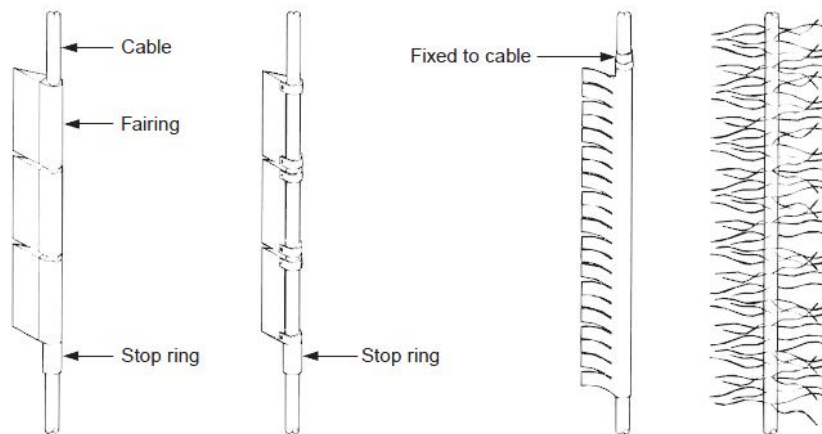


Figura 10 – Exemplos de carenagem de cabos eletromecânicos. Retirado de Helmond [2001].

Uma forma de tentar aproximar o magnetômetro ao fundo é através da colocação de algum peso no cabo ou mesmo no próprio equipamento, lastros ou depressores. Numa situação de colocação de um depressor a vante do magnetômetro, desacoplado deste mas unido por um cabo, para além de aumentar a profundidade de reboque irá amortizar o efeito do movimento da embarcação no magnetômetro. A escolha do tipo de material tem de ser tido em conta, não podendo conter materiais com comportamento magnético para não originar uma influência no sensor e adulterar o valor da medição. Um exemplo de material utilizado, não magnético e com uma alta densidade, é o chumbo. Se não for possível controlar a natureza desse material, o mesmo deve ser colocado a uma determinada distância de forma a não influenciar a medição. Outro fator a ter em conta na escolha de lastros, será o seu hidrodinamismo, de forma a não oferecer muita resistência ao ser rebocado, da mesma forma que também deverá ser uma estrutura que não seja facilmente apanhada por eventuais redes ou quaisquer objetos que estejam junto ao fundo ou mesmo na coluna de água [Breiner, 1975].

Outro método de controlo de profundidade é a escolha do ponto de reboque do equipamento. O reboque normalmente é feito pelo nariz, para zonas de baixa profundidade, ou pelo centro de gravidade, para zonas de maior profundidade pois irá fazer com que o equipamento afunde mais.

## II.5 Tipos principais de posicionamento

O posicionamento assume uma grande importância na determinação do local da medição. De seguida descrevem-se os principais sistemas desenvolvidos ao longo do tempo.

Os sistemas globais de navegação e posicionamento por satélite (GNSS – Global Navigation Satellite System) permitem a transmissão via satélite de informação da posição, navegação e tempo a qualquer antena recetora preparada para receber esta informação. Estes sistemas encontram-se disponíveis para todo o mundo e são independentes das condições meteorológicas [Seeber, 2003]. Exemplos destes tipos de posicionamento são o GPS (Global Positioning System), desenvolvido pelo departamento de defesa dos EUA na década de 60, o GLONASS (GLObal naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya System), desenvolvido pela Rússia, e o GALILEO que está a ser desenvolvido pela União Europeia e a Agência Europeia Espacial. Estes sistemas permitem a determinação da posição de qualquer antena à superfície terrestre através da captação e descodificação dos sinais de rádio enviados pelos satélites [Matos, 2001].

Mais tarde surgem os sistemas globais de posicionamento com correção diferencial (DGPS) que permitem a determinação da posição de forma mais exata e precisa de qualquer ponto, estação móvel, através da aplicação das correções da posição conhecida, estação base [Akbar et al., 2008]. Esta correção pode ser emitida através de várias frequências (*radiobeacon*, VHF, etc.) a partir de uma estação em terra, determinando deste modo o seu alcance.

Com a produção e desenvolvimento de equipamentos para prospeção marinha, surge a necessidade do seu posicionamento, ou seja, do posicionamento do sinal na coluna de água. Sendo que a radiação eletromagnética não se propaga na água, os sistemas de posicionamento referidos anteriormente só permitem a obtenção da posição da embarcação a partir do qual o equipamento está a ser operado.

A necessidade de desenvolvimento de um posicionamento acústico surgiu na década de 60, quando se necessitou detetar um submarino nuclear, USS Thresher, que se tinha afundado, e mais tarde uma bomba nuclear perdida ao largo da costa Espanhola [Christ e Wernli, 2007]. A emissão de som através da água pode ser feita basicamente por um transdutor. Este não faz mais do que transformar energia elétrica em energia mecânica para gerar um impulso acústico, através da coluna de água, facilmente detetado por outros transdutores que se encontrem na direção de propagação do mesmo. O posicionamento acústico resume-se a um problema de propagação do som na água e de triangulação [Christ e Wernli, 2007]. A posição desconhecida, do equipamento, é dada através da diferença em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , desde o transdutor, dispositivo colocado no equipamento que responde ao ser questionado, ao conjunto de transdutores. A linha imaginária formada entre o conjunto de transdutores é denominada de *baseline*, linha de base [Christ e Wernli, 2007]. As diferenças

de distância entre estas linhas de base permitem definir três tipos principais de arquitetura de sistemas de posicionamento acústico: *Long baseline* (LBL), *Short baseline* (SBL) e *Ultra Short baseline* (USBL) (figura 11).

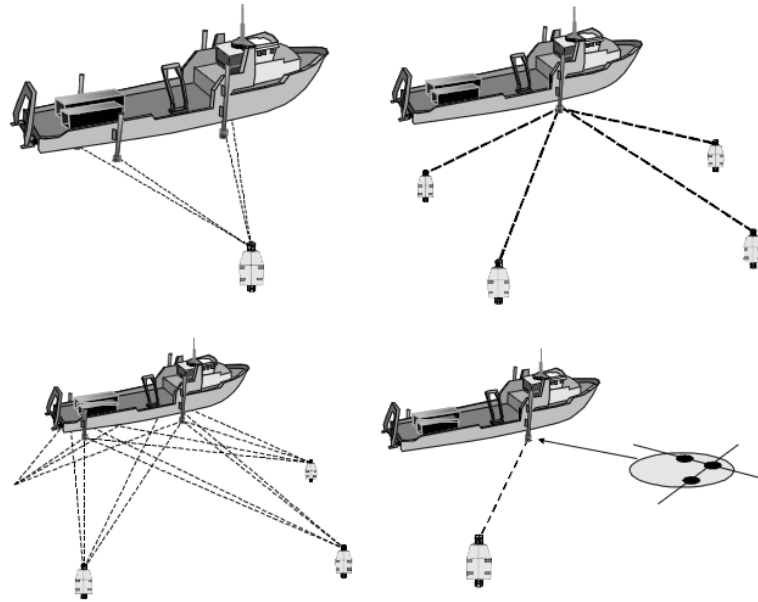


Figura 11 – Figura com as principais configurações de sistemas de posicionamento acústico. De cima para baixo e da esquerda para a direita: Sistema SBL, Sistema LBL, Sistema combinado SBL e LBL (L/SBL) e Sistema USBL. Retirado de Vickery, [1998].

O desenvolvimento de sensores de atitude e rumo vieram dar um grande avanço na medição dos movimentos rotacionais e translacionais quer das plataformas de reboque de equipamentos de prospeção no mar quer dos próprios equipamentos. Exemplos destes sensores são giroscópios, que dão o movimento de rotação de um corpo, acelerómetros, que permitem obter o valor do deslocamento, e os próprios magnetómetros *fluxgate* que permitem obter o rumo do corpo em relação ao norte magnético.

## II.6 Discussão

Tendo exposto anteriormente as principais características a considerar na configuração de um sistema de um magnetómetro marinho, apresenta-se de seguida uma discussão sobre a configuração adequada para o objetivo de deteção de objetos.

No que diz respeito ao tipo de sensor, os magnetómetros de excitação ótica possuem uma maior sensibilidade e uma capacidade de amostragem maior que, para a deteção de objetos, será uma vantagem. No entanto, este sensor possui zonas mortas e um erro de rumo inerentes ao processo físico com que se baseia o seu funcionamento. Mesmo

aplicando técnicas de separação do feixe, de modo a polarizar separadamente conjuntos de elétrons a diferentes orientações, no caso do elemento césio, o erro mínimo atingido é de 1nT [Hrvoic e Hollyer]. Atualmente estes tipos de sensores têm vindo a ser melhorados no que diz respeito à redução destes erros, como se verifica pelas características do magnetómetro G882 apresentadas na tabela 1. No entanto, tornaram-se também mais dispendiosos. A elevada instabilidade sentida por um magnetómetro marinho ao ser rebocado impossibilita a utilização de magnetómetros de fluxo, pois a direção do campo que estaria a ser medida seria muito difícil de determinar. A sua relativa baixa sensibilidade e baixa resolução fazem com que não sejam sensores escolhidos para este tipo de operações. Por fim, os magnetómetros de precessão protónica, de efeito *Overhauser*, que operam com sensores omnidirecionais ou isotrópicos, e que não possuem zonas mortas, e já há muito tempo fabricados e utilizados, são os sensores que possuem a melhor razão custo e qualidade. No entanto, têm uma taxa de amostragem mais baixa do que os sensores de excitação ótica.

Quando se realizam levantamentos em áreas de elevado gradiente magnético, a componente de alta frequência, anomalias de comprimento de onda pequeno que normalmente correspondem a pequenos objetos, surge por vezes sobreposta à geologia da zona tornando-se difícil o seu registo. Assim sendo, quanto à configuração do sistema, um gradiómetro, ou uma configuração com mais do que um magnetómetro incorporado, terá uma melhor resolução espacial, comparada com a utilização de um só magnetómetro de medição do campo total. Desta forma, torna-se o instrumento ideal para a localização de pequenos objetos [Gem Systems]. As medições realizadas por um sistema em gradiómetro são obtidas em simultâneo e a curta distância entre os sensores é inferior ao comprimento de onda de muitos dos fenómenos que contribuem para a variação do CE. Logo, numa medição realizada em simultâneo por dois magnetómetros, ou mais, o valor do CE é idêntico em ambas as medições e é automaticamente filtrado. O valor do gradiente pode ser usado quantitativamente por si só mas poderá também ser utilizado para a determinação da direção do seu vetor, para determinar a profundidade, momento magnético e mesmo a forma do objeto [Breiner, 1999].

No entanto, deve-se considerar que uma estrutura mais complexa com dois ou mais magnetómetros, trará um maior perigo durante o seu reboque, pois poderá ficar preso em redes de pesca ou em qualquer objeto junto ao fundo ou mesmo na coluna de água. Estas situações são muito frequentes na nossa costa, até algumas dezenas de milhas, mesmo quando os locais e datas dos referidos levantamentos sejam devidamente transmitidos à navegação, através de avisos, ou mesmo sinalizadas. A melhor resolução espacial, obtida

com esta configuração, devido à obtenção de um gradiente, também determina um levantamento com um espaçamento entre fiadas mais reduzido, aumentando o tempo de execução do levantamento.

Optando por uma configuração de um só sensor é necessário a obtenção do registo do CE, este pode ser obtido por um sensor montado numa estação, o mais próxima possível da área de levantamento, numa zona segura, e longe de influências de campos eletromagnéticos externos ao CMT, como será melhor abordado no capítulo VI.

A possibilidade de colocação de pesos, embora ajude na redução do comprimento de cabo na água e para que o magnetómetro atinja uma maior profundidade, reduz drasticamente a resposta aquando da recolha do magnetómetro em situação de emergência, como por exemplo, a necessidade de diminuir a sua profundidade numa zona de redes de pesca. Mais uma vez, mesmo que seja imperativo usar este método, ter-se-á de ter em conta a zona de levantamento para prevenir possíveis problemas.

Por fim, no que diz respeito aos sistemas de posicionamento, a solução ideal seria a combinação de um sistema de posicionamento por satélite para posicionamento da plataforma de reboque, com sensores de atitude para determinação da inclinação e proa da plataforma, e com um sistema de posicionamento acústico que posicione o magnetómetro relativamente à plataforma de reboque. O sistema de posicionamento acústico com arquitetura USBL é o mais indicado para sistemas a reboque, devido à sua pequena estrutura e montagem mais simples. Este sistema terá de ser colocado na água abaixo da quilha do navio, de modo a que os seus transdutores estejam desobstruídos, e fixo numa estrutura resistente a um reboque até cerca de 6 nós, pois acima desta velocidade irá criar demasiado ruído junto aos transdutores. O sistema pode ser fixo permanentemente no casco do navio, lançado por uma válvula no casco ou montado lateralmente à borda. Cada uma destas soluções tem as suas vantagens/desvantagens e seus custos associados.

A logística e os custos de utilização de sistemas de posicionamento acústico e sensores de atitude impedem muitas vezes a sua utilização, pelo que a posição é normalmente obtida com recurso ao posicionamento por satélite da plataforma, ao conhecimento do comprimento de cabo de reboque e à informação de outros sensores, como o sensor de pressão.

Para um sistema como o do magnetómetro marinho, preparado para ser colocado à mão na água e ser utilizado em qualquer embarcação para a realização de um levantamento, o sistema de posicionamento mais utilizado é o DGPS. No entanto, há alguns fatores a ter em

conta de forma a minimizar o erro da posição. Um deles é o conhecimento das distâncias da antena ao ponto de reboque e no caso de se utilizar um sistema móvel, garantir a sua colocação numa zona desobstruída que possibilite a receção da correção diferencial, ou que receba a informação de um número suficiente de satélites, como se verá no capítulo V.

Os levantamentos apresentados neste trabalho, ensaios realizados para responder a algumas das questões inicialmente enunciadas, foram realizados com um sistema de magnetómetro marinho constituído por um magnetómetro marinho rebocável, SeaSpy, e um magnetómetro estação de referência, Sentinel, ambos com sensores de precessão protónica com efeito *Overhauser*, fabricados pela MARINE MAGNETICS, pertencentes ao Instituto Hidrográfico. O magnetómetro rebocável possui ainda um sensor de pressão e um sensor de altitude.

A escolha deste sensor deve-se às razões já apontadas anteriormente, como a inexistência de zonas mortas e erro de rumo. Quanto à configuração optada deve-se essencialmente à particularidade da nossa costa no que diz respeito às zonas de pesca, mas também à mobilidade e facilidade de montagem deste sistema em qualquer embarcação e em qualquer local. Uma última razão, e esta também inerente à versatilidade destes sensores, deve-se à possibilidade de colocação do magnetómetro Sentinel, estação de referência, numa configuração em gradiómetro sendo só necessário a preparação de uma plataforma de fixação para reboque de ambos os magnetómetros.

## **Capítulo III – Planeamento de um levantamento**

No levantamento de uma determinada área para deteção de objetos, existem dois casos a considerar: a deteção de um objeto conhecido ou a deteção de um objeto desconhecido. No primeiro caso as características físicas do objeto são conhecidas e são fundamentais para o planeamento da sua deteção. No segundo terão de se estimar quais os objetos que podem ser detetados. Em ambos os casos, sabendo ou estimando estes valores, a magnitude máxima da anomalia magnética produzida pelo objeto e a respetiva distância do sensor ao objeto podem ser calculadas.

Após a determinação destes valores há que considerar os principais parâmetros e condicionantes a considerar num planeamento. Os principais parâmetros são a profundidade de levantamento e a distância entre fiadas, que vão determinar a deteção do objeto, e a taxa de amostragem e a velocidade que irão contribuir para a resolução espacial do levantamento, ou seja, a amostragem da anomalia do objeto a detetar. Os condicionantes serão aqueles que irão comprometer a deteção de objetos como: as características do sensor, as fontes de ruído no sinal e a incerteza da medição quanto ao seu posicionamento, quer em relação à embarcação quer em relação ao objeto.

Não sendo possível quantificar todos os condicionantes neste trabalho, neste capítulo são identificados alguns destes indicando-se sempre que possível valores através de ensaios realizados ou através da bibliografia. No fim será apresentada uma forma expedita de definição de um planeamento que entra em conta com as características do objeto, características do local, parâmetros de levantamento e alguns condicionantes.

### **III.1 Propriedades magnéticas dos objetos a detetar**

Os objetos detetados por um magnetómetro são constituídos por materiais magnéticos. Exemplos destes materiais são metais com o ferro, níquel, aço, etc. Metais como latão, bronze, alumínio, cobre, ouro, prata, etc., não são materiais magnéticos e não são detetados pelo magnetómetro [Breiner, 1975].

Existem vários objetos de natureza antropogénica, constituídos por diversos materiais, cada um com comportamento magnético diferente, e que podem ser detetados num levantamento, tais como: oleodutos, cabos submarinos, embarcações afundadas, amarrações, material militar como minas, artefactos arqueológicos como cerâmicas, canhões, etc.

O comportamento magnético de um material deve-se à existência de um momento magnético associado aos átomos ou moléculas de que é formado. Esta particularidade permite que o material se comporte como um íman alinhando-se de acordo com um CM aplicado. Este campo, se variável, induz correntes que levam à formação de um campo de direção oposta ao campo aplicado. Podem-se assim definir dois efeitos na presença deste campo, o alinhamento das partículas constituintes do material na direção do CM, criando uma força atrativa, e a criação de um campo oposto ao aplicado, criando uma força repulsiva [Villate, 1999].

Chamam-se materiais diamagnéticos, aqueles que são ligeiramente repelidos por CM fortes, pois geram um campo oposto a este. Exemplos destes materiais são a água, o vidro, os plásticos e muitos compostos orgânicos. Os materiais chamados paramagnéticos, como por exemplo, o alumínio, o sódio e o oxigénio, são aqueles onde as forças atrativas se anulam com as forças repulsivas criadas. Por fim, existem os materiais ferromagnéticos, como por exemplo o ferro e o níquel, cujas forças atrativas prevalecem, havendo um alinhamento mais eficaz dos seus elementos constituintes [Villate, 1999]. Consoante a predominância de um ou de outro efeito o material terá um comportamento magnético diferente, quantificado por propriedades como a suscetibilidade ou permeabilidade magnética, como será apresentado mais à frente.

Cada objeto, constituído por um ou mais tipos de materiais, possui uma determinada magnetização que tem duas origens, uma induzida e outra permanente. A magnetização induzida consiste num efeito combinado do comportamento magnético do material, condicionado pela forma e orientação do material em relação ao CMT. A máxima indução verificar-se-á quando o objeto tiver uma forma alongada e o seu eixo maior estiver alinhado como o CMT [GEM Systems, 1998]. A magnetização permanente, também denominada por remanescente, está relacionada com a história temporal metalúrgica, termal e mecânica do objeto. Durante todas estas etapas o objeto pode ter tido várias orientações em relação ao CMT e pode ter estado sujeito a diferentes intensidades deste mesmo [GEM Systems, 1998]. Deste modo, quando um objeto é submetido a um determinado CMT, parte do seu material irá adquirir a orientação deste último. No entanto, parte do material irá manter a orientação da sua magnetização remanescente, adquirida durante o seu fabrico. A soma destes dois tipos de magnetização é denominada por magnetização total.

A grandeza medida pelo magnetómetro será a soma da perturbação magnética causada pelo objeto, resultante da sua magnetização total, e do CMT. No entanto, se um objeto for composto por vários materiais, orientados de forma aleatória, pode-se considerar que a

magnetização permanente irá ser cancelada, prevalecendo deste modo a magnetização induzida [Breiner, 1975].

Um magnetómetro mede a densidade do fluxo magnético,  $B$ , como mencionado no capítulo II. Esta será a soma de uma contribuição da força do campo magnético,  $H$ , e de uma contribuição da magnetização,  $M$ , do objeto a detetar, multiplicada pela permeabilidade magnética no espaço vazio,  $\mu_0$ , [Brito, et al. 1999]:

$$B = \mu_0(H + M)$$

Se o objeto for constituído por materiais isotrópicos e homogéneos, verifica-se que existe proporcionalidade entre  $M$  e  $H$  [Mendiratta, 1984]:

$$M = X.H$$

A grandeza  $X$  recebe o nome de suscetibilidade magnética podendo ser expressa de vários modos: como sendo um valor adimensional, ou um valor em relação à massa do objeto,  $Xm$ , ou mesmo em relação ao seu volume,  $Xv$ . Nos materiais diamagnéticos  $X$  é negativo, da ordem dos  $-10^{-5}$ , e nos materiais paramagnéticos  $X$  é positivo, da ordem dos  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$  [Brito, et al. 1999]. Nos materiais ferromagnéticos  $X$  pode ter valores elevados, atingindo o valor de  $10^6$  [Fiolhais, et al. 2000].

Partindo da relação entre a permeabilidade magnética e a suscetibilidade magnética,

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \mu_0 \cdot (1 + X)$$

onde,  $\mu$  é a permeabilidade absoluta do material, e  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa, e das relações anteriores, chega-se à equação,

$$B = \mu.H$$

Esta equação mostra que, nas condições inicialmente estabelecidas para o objeto em estudo,  $B$  e  $H$  são paralelos. No entanto, é importante mencionar que para materiais ferromagnéticos esta proporcionalidade não se verifica, pois a sua magnetização é muito forte [Brito, et al. 1999]. Na tabela 2 encontram-se representados alguns valores de suscetibilidade magnética de alguns materiais.

Tabela 2 – Valores de suscetibilidade magnética,  $X$ , de alguns materiais. Adaptado de Jankowsky e Sucksdorff [1996]

<b>Materiais</b>	<b>X</b>
Diferentes tipos de rocha	$10^{-1}$ - $10^{-5}$
Tijolos	$10^{-2}$
Magnetite	$1^{-10}$
Ferro	$10^2$
Ligas especiais de ferro	$10^6$

Os materiais ferromagnéticos e paramagnéticos são os mais facilmente detetados pelo magnetómetro.

### III.2 Cálculo da amplitude de uma anomalia magnética

A amplitude máxima de uma anomalia magnética produzida por um objeto pode ser estimada tendo em conta a sua massa, a sua suscetibilidade magnética, a sua distância ao sensor, e o valor do CMT no local da medição. Para simplificar o cálculo assumem-se algumas premissas: 1) a distância entre o magnetómetro e o objeto deve ser superior ao comprimento do mesmo; 2) existe um só dipolo, considerando que os dois tipos de magnetização presentes no objeto, induzida e permanente, terão a mesma direção; e 3) não é considerada uma magnetização permanente, uma vez que esta é difícil de quantificar.

Tendo em conta estas considerações obtém-se a seguinte fórmula que dá uma aproximação ao valor de amplitude de uma anomalia magnética produzida por um objeto:

$$B_{objeto} = \frac{B_{CMT} \cdot X_{objeto} \cdot m_{objeto}}{r^3} \quad (1)$$

Onde,  $B_{CMT}$  é o valor de densidade do fluxo do CMT do local, e  $X_{objeto}$  é a suscetibilidade magnética do objeto dada em unidades de massa, ou seja,  $X_m$ . Estes dois últimos parâmetros são uma aproximação ao valor da magnetização induzida do objeto. O termo  $m_{objeto}$  é a massa do objeto,  $r$  é a distância entre o sensor e o objeto e por fim,  $B_{objeto}$ , que é a anomalia magnética, ou seja, o valor de densidade de fluxo do campo gerado pelo objeto com uma determinada suscetibilidade, massa e distância ao sensor, valor normalmente dado em nT [Breiner, 1975; Marine Magnetics, 2002; GEM Systems, 1998; Jankowsky e Sucksdorff, 1996]. A densidade do fluxo do CMT,  $B_{CMT}$ , considerada é normalmente o valor do CP, pois este é o campo que mais contribui para a magnitude do CMT. No entanto,

existem modelos que contabilizam o CP e o CC que podem ser usados para obter um valor mais próximo do valor real do CMT, como será abordado mais à frente.

Considerando  $B_{CMT}$  igual a 43000 nT, valor médio do CP para Portugal,  $X_{objeto}$  igual a 0.0013 m<sup>3</sup>/kg, calculado tendo por base um objeto ferroso com uma  $X$  de 100 e uma densidade de 7.86 g/cm<sup>3</sup>, obtém-se uma relação entre  $B_{objeto}$ ,  $r$  e  $m_{objeto}$ , apresentada na figura 12:

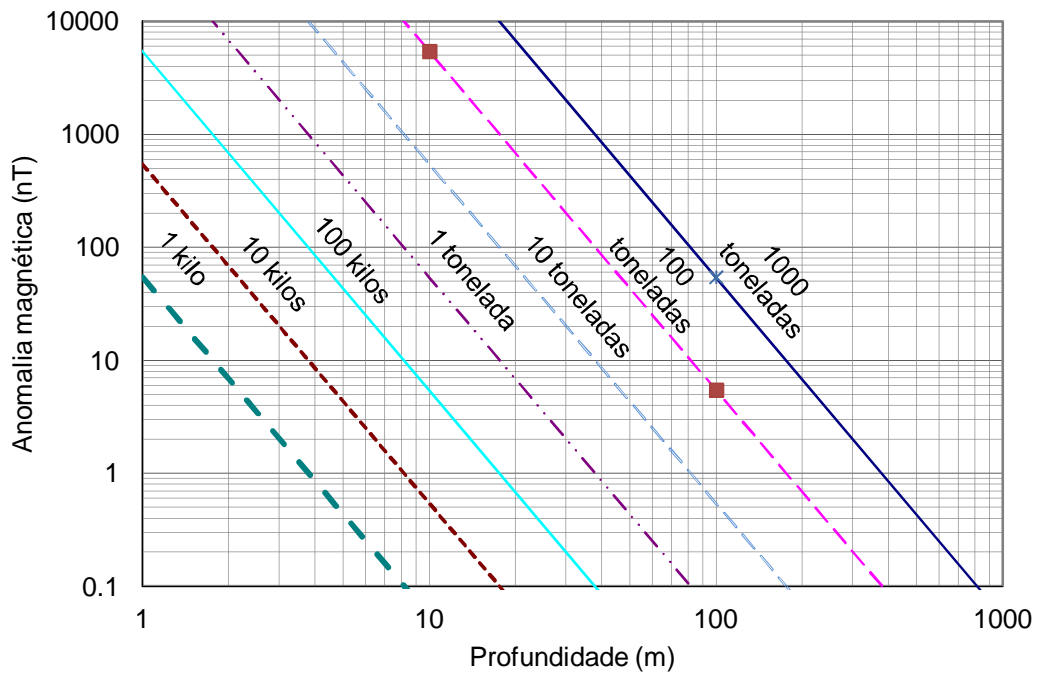


Figura 12 - Relação da  $B_{objeto}$ ,  $r$  e  $m_{objeto}$ , considerando um objeto ferroso de densidade 7,86 g/cm<sup>3</sup> e uma  $X$  de 100.

A perturbação magnética gerada por um objeto pode ser de grande amplitude e de comprimento de onda curto, no entanto, quanto mais afastado do objeto estiver o magnetómetro, maior é o seu comprimento de onda e menor será a sua amplitude. Para um objeto pontual, ao duplicar a distância entre este e o sensor, a anomalia por ele produzida diminui num fator de oito como se pode verificar pela figura 13.

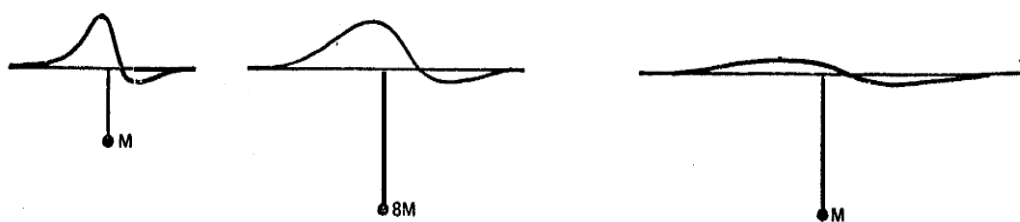


Figura 13 – Da esquerda para a direita: anomalia magnética produzida por um objeto de massa  $M$ ; anomalia magnética produzida por um objeto com massa  $8M$ , a maior profundidade que o exemplo anterior; e a anomalia magnética produzida por um objeto de massa  $M$  à mesma profundidade que o exemplo anterior. Retirado de Breiner [1975].

Na tabela 3 encontram-se exemplos de amplitudes máximas de anomalias magnéticas produzidas por alguns objetos comuns e a respetiva distância ao magnetómetro.

Tabela 3 – Valores de amplitudes máximas de anomalias magnéticas produzidas por alguns objetos mais comuns. Adaptado de Breiner [1975]

Objeto	Peso (ton)	Distância (m)	Anomalia (nT)
Embarcação	1000	30	300 a 2000
		300	0.3 a 2.0
Âncora	20	15	200 a 650
		30	25 a 80
Oleoduto (30 cm de diâmetro)		8	50 a 200
		15	12 a 50
Automóvel	1	10	40
		30	1

No que diz respeito às características físicas, sobretudo de objetos com interesse arqueológico e que se encontram submersas há mais tempo, ter-se-á de considerar a perda de algumas das propriedades magnéticas por oxidação e posterior perda do material. A água do mar, com uma elevada concentração de iões, contribui para a oxidação dos materiais. Esta taxa de corrosão irá variar de oceano para oceano mas também em profundidade. Como exemplo, Farro et al. [2009] determinou, para um porto peruano, uma taxa de corrosão de aço macio, totalmente submerso, em cerca de 0.2 mm/ano. Esta perda

de material ao longo do tempo deve ser tida em conta na determinação das características do objeto para determinar a sua deteção.

### **III.3 Parâmetros a definir num levantamento.**

Os principais parâmetros a considerar num planeamento são: a profundidade de levantamento, a distância entre fiadas, a taxa de amostragem e a velocidade de levantamento.

A definição da profundidade a que o equipamento deve ser rebocado e da distância entre fiadas determinam a deteção ou não do objeto. Estes valores têm de ser definidos de acordo com as características físicas do objeto e do valor do CMT local, como foi abordado anteriormente, e terá de considerar ainda os condicionantes na sua deteção, nomeadamente a existência de ruído magnético ambiente como será falado mais à frente.

A velocidade e a taxa de amostragem determinam a resolução espacial do levantamento e devem ser estimadas para melhor se definir o planeamento. A tabela 4 mostra a variação da resolução espacial em função da velocidade de levantamento e da taxa de amostragem.

Tabela 4 – Valores de resolução espacial para diferentes velocidades de levantamento e taxas de amostragem.

<b>Velocidade</b>		<b>Resolução espacial em metros (m) a uma taxa de amostragem</b>		
<b>m/seg</b>	<b>nós</b>	<b>5 Hz</b>	<b>1 Hz</b>	<b>0.2 Hz</b>
1.5	3	0.3	1.5	7.5
2.1	4	0.42	2.1	10.5
2.57	5	0.514	2.57	12.85
3.6	7	0.72	3.6	18
5.1	10	1.02	5.1	25.5

Como seria de se esperar, à medida que se aumenta a velocidade, para uma mesma taxa de amostragem, a resolução diminui, pois aumenta a distância entre duas medições consecutivas. Para a mesma velocidade, a diminuição da taxa de amostragem levará também à diminuição da resolução.

A taxa de amostragem é um parâmetro importante na deteção de uma possível anomalia magnética. Como exemplo, a figura 14 mostra uma anomalia magnética detetada numa fiada de um dos ensaios realizados, simulando a sua amostragem a três taxas diferentes.

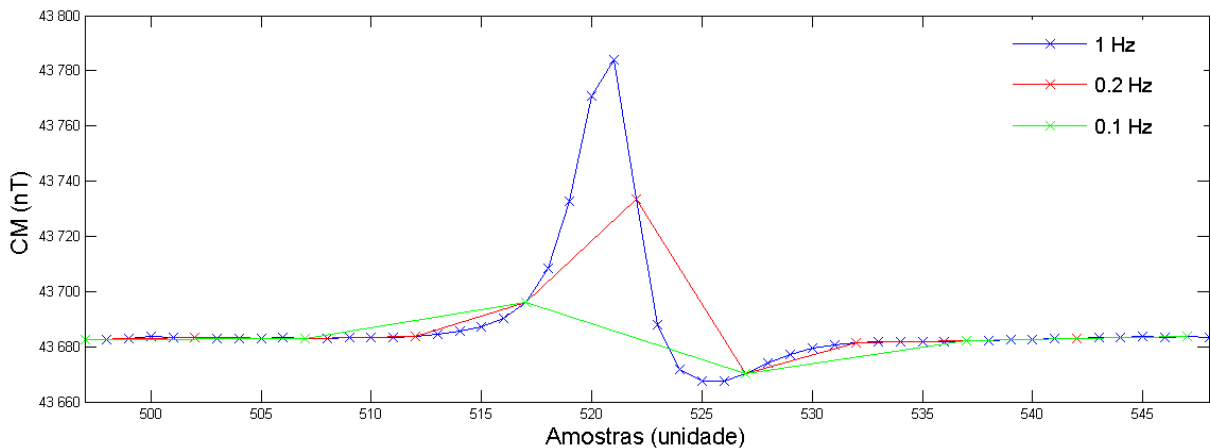


Figura 14 – Variação da amostragem de uma anomalia a várias taxas.

Facilmente se verifica que com uma menor taxa de amostragem esta anomalia poderia não ser devidamente amostrada, correndo-se o risco do objeto não ser detetado. A fiada, representada na figura 14, foi executada a uma velocidade média de 5 nós, 2,57 m/seg, e com uma taxa de amostragem de 1 Hz. Com estes dados assume-se que a anomalia tem um comprimento de onda de 38,55 m. Aumentando a velocidade de levantamento para 10 nós e mantendo a mesma taxa de amostragem, a resolução espacial seria de 5 m. Pelo que, apenas se iriam obter 7 amostras no comprimento de onda total desta anomalia o que poderia ser insuficiente para a detetar.

### III.4 Condicionantes num levantamento

Na execução de um levantamento existem determinados condicionantes que devem ser tidos em conta na definição do seu planeamento. Estes condicionantes podem resultar na existência de ruído, com várias origens possíveis, que se poderá sobrepor ao sinal que representa a anomalia magnética do objeto que se pretende detetar. Parte deste ruído pode ser filtrado após a aquisição sem que a deteção do objeto esteja comprometida, outra parte terá de ser assumida como sendo uma limitação na deteção. Para além da possível existência de ruído existem erros associados ao posicionamento do magnetómetro que têm de ser considerados, de modo a que o planeamento definido tenha uma maior probabilidade de deteção do objeto.

A resolução de um magnetómetro, como já abordado no capítulo II, define o valor mínimo do campo que o magnetómetro consegue registar. Este valor deve entrar em conta com o possível ruído eletrónico do sensor, enquanto este se encontra a adquirir. Frequentemente este último valor vem associado à sensibilidade do sensor, que deve ser menor que a resolução, e deverá ser tido em conta na resolução do sensor.

Sabendo qual a variação mínima detetada por um determinado sensor, ter-se-á de ter em conta que tudo o que o sensor irá medir não terá só origem no objeto que se pretende detetar mas também outras origens que não é objeto de estudo. Essas fontes constituem um ruído presente no sinal adquirido e que terão de ser consideradas na avaliação do valor da anomalia mínima detetável pelo sensor utilizado.

Os três campos que constituem o CMT são um exemplo de ruído que se sobrepõe ao sinal. O CP apresenta-se como sendo um gradiente, que pode ser facilmente filtrado por cálculo de um declive ou por cálculo do seu valor através do modelo matemático IGRF em vigor, para uma determinada posição. Este modelo é aprovado quinquenalmente, pela International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), devido à existência de uma variação secular do CP [Miranda et al., 2000]. A variação do CC poderá apresentar-se como um sinal de comprimento de onda maior, diferente do sinal produzido por um objeto normalmente de comprimento de onda mais pequeno. Porém existem rochas que possuem essencialmente uma elevada concentração de minerais magnéticos na sua constituição e que dificultam a deteção de pequenas anomalias provenientes de um objeto [Breiner, 1975]. Estas rochas, por exemplo de origem ígnea, poderão também preencher pequenos acidentes geológicos, como falhas, e produzir anomalias magnéticas que podem ser confundidas com as produzidas por um objeto.

Existem atualmente modelos disponíveis gratuitamente na internet que permitem o cálculo do valor do CMT entrando em conta com o CP e o CC. Um exemplo destes modelos é o Enhance Magnetic Model (EMM2010), produzido pelo National Geophysical Data Center (NGDC) dos Estados Unidos, e que permite resolver anomalias magnéticas até um comprimento de onda de 56 km (informação retirada de <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/index.html>). Este modelo permite uma boa correção da variação do CMP e CC em grandes comprimentos de onda, porém não pode ser aplicado para pequenas variações.

O CE também possui uma variação periódica, de comprimento de onda largo, facilmente filtrada, e variações não periódicas, de pequeno comprimento de onda, que se podem sobrepor à anomalia magnética de um objeto. O registo da variação do CE pode ser feito

por um magnetómetro montado numa estação fixa, como já foi mencionado no capítulo II. No entanto, a distância desta estação à área de levantamento poderá levar a que pequenas variações da CE não sejam verificadas de igual modo no magnetómetro em estação e no magnetómetro a adquirir na área de interesse. Esta situação será abordada em maior pormenor no capítulo VI. Existe atualmente um modelo, High Definition Geomagnetic Model (HDGM) que entra em conta com o CP, o CC e um modelo básico do CE. Este produto da NGDC é atualizado anualmente porém não é gratuito (informação retirada de <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/models.shtml>) e não responde à variação de pequeno comprimento de onda do CE.

A variação da altitude poderá também introduzir um ruído no sinal. Esta variação pode dever-se ao movimento da embarcação, que pode levar a uma variação da sua velocidade e consequentemente à variação da distância do sensor ao fundo, ou à própria morfologia do fundo. A amplitude do ruído provocado por estes condicionantes será proporcional à amplitude da variação da altitude.

A água contém sais dissolvidos, que ao se dissociarem formam iões e consequentemente possibilitam o transporte de corrente elétrica. A água do mar, por possuir uma elevada salinidade possui proporcionalmente uma elevada condutividade elétrica, que por sua vez irá também variar com a temperatura [Bearman, 1995]. Considerando esta propriedade, o deslocamento de uma massa de água irá gerar uma corrente elétrica, e consequentemente um campo magnético, introduzindo ruído no sinal medido. Estes deslocamentos de água podem ocorrer por existência de correntes (produzidas por marés ou por ação do vento), ondulação, vagas, quer pelo movimento do magnetómetro na coluna de água quer da própria embarcação que o reboca. No que diz respeito à ondulação, Breiner [1975] afirma que o seu efeito aparecerá no registo como uma variação sinusoidal, com o período da ondulação e com amplitudes entre algumas décimas a alguns nT para valores de ondulação de sete a um metros de amplitude, respetivamente. Afirmando ainda que o seu máximo efeito é proporcional à velocidade de propagação, amplitude e direção da ondulação relativamente à direção do CMT. Quanto à magnitude deste efeito em profundidade Breiner [1975] diz que a sua influência diminui quase inversamente com o aumento da profundidade.

Considerando que o magnetómetro é rebocado, a uma distância fixa por uma embarcação ter-se-á de considerar que esta é constituída por determinados materiais, sistemas de energia e de propulsão que poderão introduzir algum ruído no sinal medido. Este ruído existirá com menor ou maior amplitude consoante, respetivamente, a maior ou menor

distância do magnetómetro à embarcação. No entanto, este efeito pode ser quantificado e o seu valor devidamente corrigido como será abordado no capítulo IV.

Por fim, e não menos importante, existe um ruído magnético ambiente a ter em conta. Este ruído pode ter várias fontes como a existência de tráfego marítimo próximo da área de levantamento, ou, concretamente em levantamentos em estuários ou zonas portuárias, a proximidade a estradas, pontes e a instalações elétricas de alta potência. Jankowsky e Sucksdorff [1996] afirmam que, para a definição de um local de colocação de um magnetómetro para aquisição em estação, um carro a cerca de 40 m de distância do sensor, e um autocarro a cerca de 80 m originam uma perturbação magnética de cerca de 1 nT.

Outro condicionante a ter em conta, e que irá ser abordado em pormenor no capítulo V, é o posicionamento do magnetómetro. De modo a garantir que o magnetómetro siga o planeamento ter-se-á de considerar os erros associados ao posicionamento. Estes erros estão associados ao movimento da embarcação e ao erro associado ao sistema de posicionamento utilizado.

Sendo um sistema rebocável, o magnetómetro sofre, através do seu cabo de reboque, movimentos rotacionais, como os de guinada (*yaw*), cabeceio (*pitch*) e balanço (*roll*), e laterais, como os de avanço (*surge*), deriva (*sway*) e arfagem (*heave*), consoante a agitação marítima e o movimento da embarcação [Marreiros, 2012]. O movimento do magnetómetro estará dependente da sua hidrodinâmica e da hidrodinâmica do seu próprio cabo de reboque, como já abordado no capítulo II. O movimento de uma embarcação, por sua vez, pode ser influenciado significativamente pela sua hidrodinâmica, pela interação de ventos, ondulação, correntes, marés, profundidades, passagem próxima de outras embarcações, com as próprias características físicas das embarcações, como a sua dimensão, tonelagem, altura, sistema de propulsão, etc. Para além destes fatores existe ainda um que é difícil de ser quantificado, o fator humano na pilotagem de uma embarcação [AMS, 2006].

Os ensaios apresentados neste trabalho, foram realizados a bordo das lanchas hidrográficas, classe Andrómeda, da Marinha Portuguesa. De acordo com o Manual de Manobra dos Navios Classe Andrómeda [2003], estas lanchas possuem uma superestrutura (toda a estrutura acima do convés) muito exposta ao vento, nomeadamente o castelo, onde se encontra a ponte de comando, e as suas chaminés, tornando o navio muito sensível ao mesmo. Possuem ainda um leme e um único propulsor que também condicionam um pouco a sua manobra. De forma a poder contabilizar o erro associado ao seu posicionamento foi estabelecida uma média de afastamento das fiadas realizadas em relação ao planeado. Este cálculo foi realizado através de uma pequena rotina apresentada no Apêndice B (rotina

B.1). Primeiro foi definida uma reta entre a primeira e a última posição da fiada, posteriormente foi calculado o afastamento total, em X e em Y, e por fim, foi calculada a média do afastamento total. Como exemplo apresenta-se uma fiada realizada para a determinação da influência magnética destas lanchas, que será apresentada no capítulo IV. Na figura 15 encontra-se representada o posicionamento da fiada referida. A fiada tem um rumo médio 315 e foi executada com estado de mar encrespado, de acordo com a escala de Douglas, e vento força 3, de acordo com a escala de Beaufort. O afastamento médio calculado para esta fiada foi de 3.86 m.

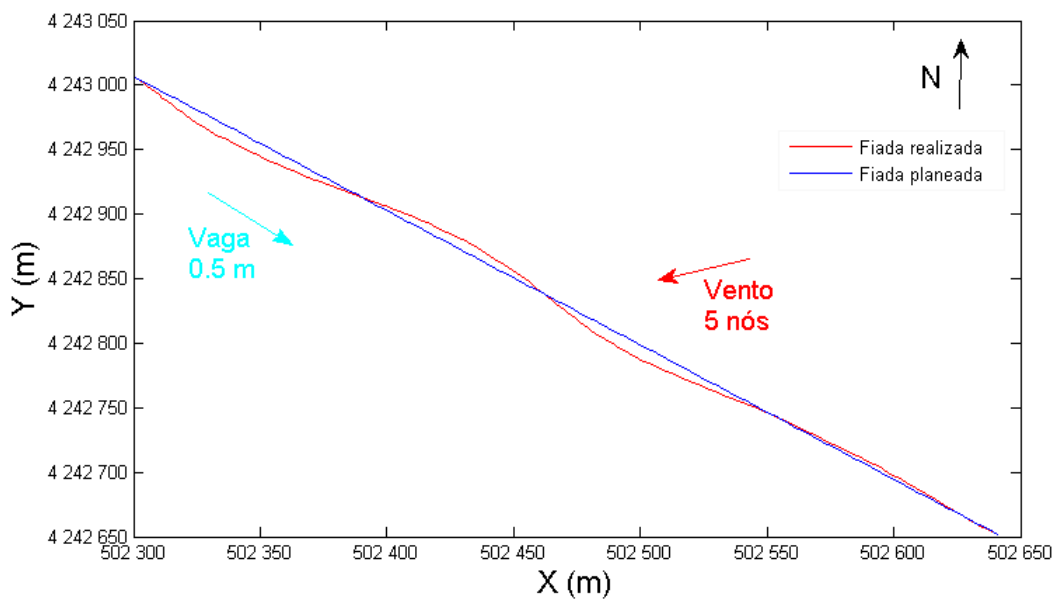


Figura 15 - Gráfico de exemplo de afastamento entre a fiada realizada e a fiada planeada com representação da direção e amplitude da vaga e do vento.

As condições meteorológicas e oceanográficas são de grande importância na previsão do movimento da embarcação. Embora difícil de quantificar para os mais diversos estados de mar e força de vento, é um erro a ter em conta na definição do afastamento médio entre uma fiada planeada e a fiada executada.

O sistema de posicionamento utilizado também terá um erro associado. Sendo que o posicionamento poderá ser obtido via acústica, este certamente terá um erro inferior a um cálculo da posição do equipamento partindo da posição da embarcação, obtida por um sistema via satélite. Um erro inferior será obtido utilizando os dois sistemas em simultâneo. Considerando os sistemas de posicionamento global por satélite com correção diferencial, o seu erro também irá variar entre dezenas de metros a centímetros consoante o tipo de correção, algoritmos e correções aplicados [Marreiros, 2012]. Considerando este último

sistema de posicionamento e que o magnetómetro é rebocado, há que introduzir o erro associado ao cálculo da posição real do magnetómetro partindo do valor da posição conhecida da antena, esta última normalmente fixa num ponto da embarcação. Este erro irá variar devido a vários condicionantes, sendo que um deles será a variação do comprimento de cabo na água, como se irá demonstrar no capítulo V.

Sendo que a distância ao objeto é importante na sua deteção, o posicionamento do magnetómetro na coluna de água é importante. Esta posição poderá ser calculada estimando o afundamento do magnetómetro consoante o comprimento de cabo na água e a velocidade de reboque ou através da medição realizada por um sensor incorporado no magnetómetro, situação esta mais comum. Este sensor de pressão, medindo a distância do magnetómetro à superfície, e/ou altímetro, medindo a sua distância ao fundo, possui a sua própria resolução e erro associado.

### **III.5 Discussão**

Entrando em conta com o exposto anteriormente poder-se-á traçar um planeamento com o objetivo de deteção de objetos com um levantamento com uma configuração de um magnetómetro.

Primeiro ter-se-á de definir qual o objeto a detetar e determinar as suas principais características físicas de modo a que se consiga estimar a sua massa e a sua suscetibilidade magnética. A condição de que um objeto só possui uma magnetização induzida implica que estejamos a sobrestimar a sua magnetização total, no entanto, desconhecendo a sua magnetização permanente, esta é a forma simplificada de se obter um valor que permita definir a distância ao objeto e prever a amplitude da sua anomalia magnética.

O passo a seguir será definir a anomalia mínima que o magnetómetro poderá detetar. Este valor dependerá não só da resolução do magnetómetro mas também de vários condicionantes, apresentados anteriormente. Considerando que o valor da resolução do magnetómetro entra em conta com o valor de ruído da eletrónica, e que o ruído proveniente dos campos que compõem o CMT e, se existir, a influência magnética da embarcação conseguem ser devidamente filtradas. Considerando ainda que a área de levantamento possui um fundo plano e que se encontra afastada de costa e de qualquer tráfego marinho, resta considerar a possível influência do deslocamento de massas de água pelas razões já apontadas.

De acordo com Breiner [1975] o ruído proveniente do deslocamento de massas de água encontra-se na ordem de alguns nT, considerando uma ondulação de 1 m. Não conseguindo contabilizar as restantes contribuições para o ruído ambiente total com origem no movimento de massas de água, considera-se um valor de 1,5 nT como sendo o valor de ruído total provocado pelo deslocamento de massas de água junto ao sensor.

Tomando como exemplo o magnetómetro rebocável utilizado nos ensaios, tem-se que a sua resolução é de 0.01 nT. Assumindo as condições e os valores apresentados anteriormente, pode-se definir a sua resolução operacional, ou seja, enquanto este se encontra a adquirir. Assumindo, que o ruído proveniente do movimento de massas de água é de cerca de 1.5 nT e que a resolução do magnetómetro é de 0.01 nT, o valor da resolução operacional será de 1.51 nT. Considerando este valor, pode-se assumir a anomalia mínima detetada como sendo aproximadamente de 3 nT, cerca do dobro da resolução operacional determinada.

A International Hydrographic Organization, em *Manual on Hydrography* [2005] assume um valor de 5 nT como sendo a anomalia mínima detetada por um magnetómetro, no entanto não é justificado de como se chegou a este valor. A definição de um valor que represente a anomalia mínima, devidamente justificado, é de extrema importância no cálculo da distância mínima ao objeto a garantir. No entanto, não deixa de ser uma aproximação para que os cálculos da distância possam ser realizados e sejam os mais próximos possíveis da realidade.

Conhecendo o valor da anomalia mínima detetada, as características físicas do objeto a detetar e o valor do CMT local,  $B_{CMT}$ , pode-se calcular, através da equação (1) e assumindo as suas premissas, a distância mínima do magnetómetro ao objeto de modo a que este possa ser detetado.

Após determinar a distância ao objeto a detetar e tendo em conta a distância mínima ao fundo que é possível garantir, poder-se-á calcular o afastamento máximo entre fiadas. Para este cálculo é importante entrar em conta com o erro de posicionamento, ou seja, o possível afastamento à fiada planeada. Este afastamento irá variar de acordo com o movimento da embarcação e o erro de precisão do sistema de posicionamento e sensores utilizados. Como descrito anteriormente o movimento da embarcação depende essencialmente da relação hidrodinâmica resultante da interação de ventos, ondulação, correntes, marés, etc. com as características físicas da própria embarcação. O tipo de posicionamento que está a ser utilizado terá uma precisão que deverá ser tida em conta.

Nos ensaios realizados utilizou-se um sistema de posicionamento global com correção diferencial com uma precisão de cerca de 0.6 m. No que diz respeito à posição do sensor na coluna de água esta foi obtida por um sensor de altitude com uma frequência de 200 kHz, alcance entre os 1 e os 200 m e com uma precisão de 0.025% do alcance. Num dos ensaios realizados chegou-se a um valor médio de 5 metros de afastamento entre a fiada planeada e a fiada executada. Desta forma deve-se contabilizar na distância ao fundo um valor de 0.05 m de erro e na distância entre fiadas, para além dos 5 m de média de afastamento da embarcação, um erro de 0.6 m relativo ao tipo de posicionamento utilizado.

Sabendo a distância necessária garantir entre o sensor ao fundo e contabilizando o erro associado ao sensor ou ao cálculo desta distância, é possível através da simples aplicação do teorema de Pitágoras, como exemplifica a figura 16, determinar o afastamento entre fiadas desejável.

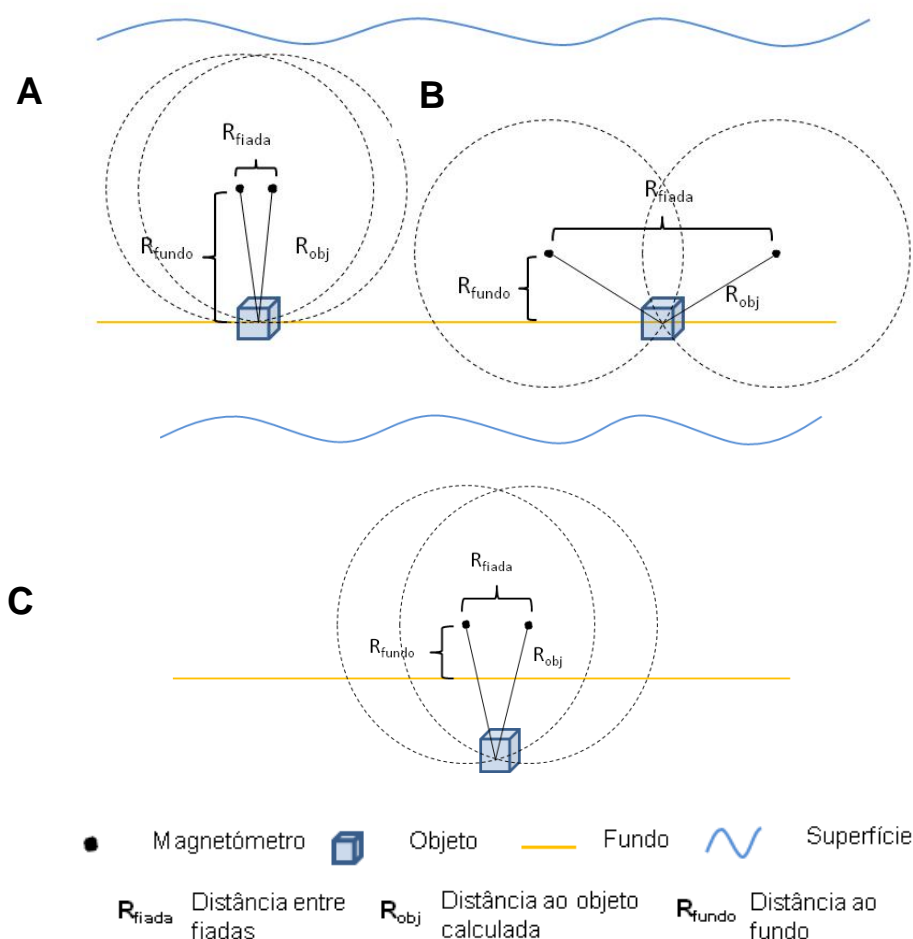


Figura 16 - Imagem representativa do cálculo da distância entre fiadas, para deteção de um objeto no fundo, com o sensor a duas distâncias ao fundo, A e B, e deteção de um objeto enterrado, C.

Como se pode verificar nas situações A e B, se o magnetómetro se encontrar mais junto ao fundo, a distância entre fiadas poderá ser maior. O aumento da distância entre fiadas

permite cobrir uma mesma área mais rapidamente. A situação C demonstra que se considerar que o objeto esteja enterrado, a distância ao fundo do sensor terá de diminuir e o espaçamento entre fiadas também. Ao valor calculado de distância entre fiadas deve ser somado o afastamento da embarcação à fiada planeada e o erro do sistema de posicionamento utilizado. No caso prático apresentado somar-se-ia 5.6 m.

Como já referido existe uma relação entre a amplitude da anomalia e a variação da distância ao objeto. No âmbito do projeto *Wreck on the seabed*, a Wessex Archaeology Ltd. realizou, numa área de interesse arqueológico na costa sul de Inglaterra, um ensaio de forma a determinar a influência na deteção de anomalias magnéticas de menor dimensão em função da distância ao fundo do magnetómetro e de diferentes espaçamentos entre fiadas. Embora houvesse uma diferença somente de cerca de 10 m entre a profundidade mínima e máxima testadas, detetou-se uma diferença significativa no número de anomalias detetadas. Quanto maior a profundidade de reboque, ou seja, menor a distância do magnetómetro ao fundo, maior o número de anomalias detetadas. Quanto ao espaçamento entre fiadas também se verificou com este ensaio que quanto maior fosse o espaçamento entre fiadas menor o número de anomalias magnéticas detetadas. Conclui-se assim que pequenas anomalias magnéticas só serão detetadas se o magnetómetro passar mesmo por cima do objeto. Porém, a probabilidade da sua deteção aumenta com a redução da distância do sensor ao fundo e a diminuição do espaçamento entre fiadas. No exemplo apresentado na figura 17 pode-se verificar, para um objeto conhecido, a relação entre a variação da magnitude da sua anomalia magnética e a distância do sensor a este.

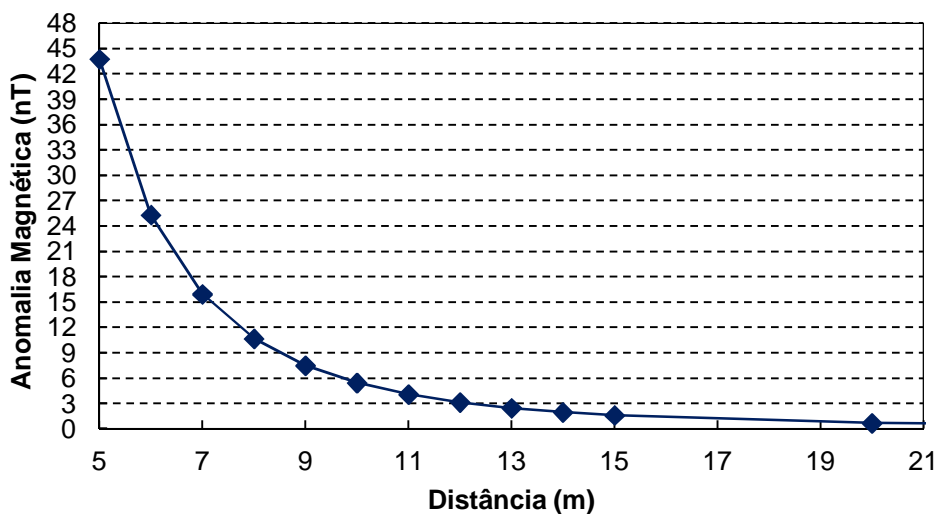


Figura 17 – Gráfico de relação da amplitude da anomalia magnética, produzida por uma mina do tipo cilíndrica, com uma massa de 100 Kg e  $X_m$  de  $0.0013 \text{ m}^3/\text{Kg}$ , com a distância ao fundo.

Embora seja necessário garantir uma distância mínima ao fundo, existem vários riscos de prisão e conseqüente perda do equipamento, como já mencionado no capítulo II. Estes riscos têm de ser tidos em conta e podem ser minimizados conhecendo as condições da área de interesse, nomeadamente a sua batimetria, existência de tráfego marítimo e existência de atividade pesqueira, antes de ser realizado o levantamento.

No que diz respeito à orientação do levantamento, este dependerá essencialmente da forma da área a ser levantada e da morfologia do terreno. Sendo que a distância ao fundo é determinante para a eficácia do levantamento, será importante garantir que esta não varie muito no decorrer de uma fiada. Porém existirá sempre uma variação da distância, que poderá ser minimizada variando o comprimento de cabo na água ou variando a velocidade de reboque do equipamento durante a execução da fiada. Em qualquer destas duas situações, há uma elevada probabilidade de introdução de um erro no posicionamento, principalmente quando este é calculado partindo da posição da embarcação, situação que irá ser descrita no capítulo V.

De forma a garantir que um objeto seja devidamente amostrado é importante a definição de uma taxa de amostragem e de uma velocidade desejável para a execução do levantamento. Considerando uma anomalia que se apresente como um dipolo, o número mínimo de amostras necessárias para reconstituir a anomalia seriam 4. Este número permite obter o nível base da anomalia, no início e no fim desta obtendo assim o seu comprimento de onda, e os polos negativo e positivo, obtendo assim a sua amplitude (Figura 18).

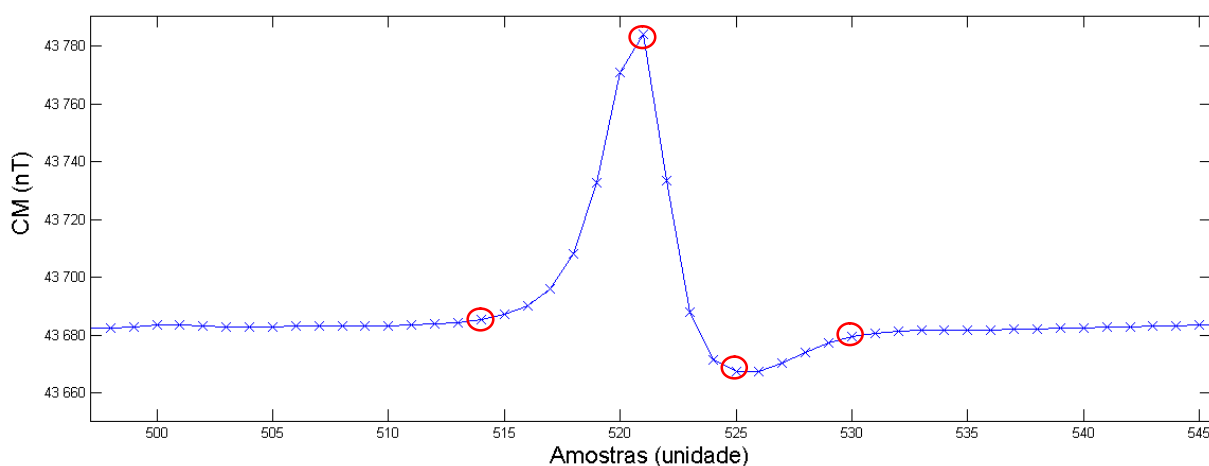


Figura 18 – Anomalia em dipolo. O número mínimo de amostras para representar esta anomalia encontra-se representada por círculos vermelhos.

Porém, como o magnetómetro se encontra em movimento o número mínimo de amostras podem não ser os valores necessários à reconstituição da anomalia. Desta forma deve ser utilizada a taxa máxima de amostragem do sensor e garantir a resolução espacial necessária definindo uma velocidade máxima de levantamento. Esta velocidade de levantamento deve ter em conta, para além da resolução espacial determinada, o controlo da embarcação e a eficiência do levantamento.

O espaçamento entre fiadas estabelecido é calculado considerando que o objeto se encontra entre duas fiadas, no entanto, o objeto poderá estar a diferentes distâncias entre cada fiada. Desta forma os parâmetros definidos num planeamento garante a sua deteção em pelo menos um registo, porém ter-se-á de definir se este único registo é suficiente. Considerando que um registo é insuficiente, dever-se-á levar a cabo um novo planeamento com um espaçamento entre fiadas mais reduzido sobre a zona de registo da anomalia.

Conclui-se assim que a definição de um planeamento terá de entrar em conta com os fatores mencionados, no entanto, será quase impossível quantificá-los todos com o mesmo rigor. Dever-se-á ter alguma sensibilidade, baseada na experiência do operador, relativamente ao comportamento do reboque do magnetómetro e da manobrabilidade da embarcação. Um reconhecimento prévio da área, nomeadamente da sua batimetria, e a existência de um *software* que possa em tempo real registar, sobre o planeamento traçado, a posição da embarcação ou mesmo do próprio magnetómetro, poderá ajudar a ajustar o planeamento durante o próprio levantamento de forma a garantir que os objetivos inicialmente propostos sejam atingidos.

No Apêndice B, rotina B.2, encontra-se o código simplificado de uma rotina realizada, que permite definir o espaçamento entre fiadas e a resolução espacial de amostragem expectável, através da introdução dos valores: das principais características físicas do objeto a detetar, conhecidas ou estimadas; da resolução operacional do magnetómetro; do afastamento máximo considerado da embarcação à fiada planeada; erros do posicionamento utilizado; da velocidade de levantamento; e da taxa de amostragem.

## Capítulo IV - Influência magnética de uma embarcação na medição do CM

O reboque do magnetómetro, como descrito no capítulo II, é normalmente feito através de uma embarcação cujos materiais de construção, sistemas de propulsão e geradores poderão influenciar a medição do campo. Estes materiais, normalmente de natureza ferromagnética, causam uma influência magnética no registo de medição do CM.

A forma mais eficiente de tentar minimizar a influência da embarcação será rebocando o magnetómetro a uma maior distância da embarcação. No entanto, dado que aquela distância será sempre finita e não muito grande, existirá sempre alguma influência que deverá ser quantificada para realizar a devida correção dos registos. Esta influência irá variar com a distância do sensor à embarcação, com o rumo da embarcação e com o valor do CMT local [Bullard e Mason, 1961].

Neste capítulo apresenta-se o método de quantificação da influência magnética de uma embarcação de Bullard e Mason [1961], a sua aplicação em alguns exemplos citados na bibliografia e exemplo de aplicação nas lanchas hidrográficas utilizadas para a realização deste trabalho.

### IV.1 Método de quantificação

Assumindo que a magnetização de uma embarcação poderá ser decomposta em uma magnetização induzida, proporcional ao CMT, e uma magnetização permanente, resultante da história de fabrico dos seus materiais, Bullard e Mason [1961], definiram uma equação para quantificar a sua influência:

$$F_{medido} = F_{local} + C_0 + C_1 \cos\theta + C_2 \cos 2\theta + S_1 \sin\theta + S_2 \sin 2\theta \quad (2)$$

Esta equação mostra que o valor de campo medido,  $F_{medido}$ , é igual à soma do valor do CMT no local,  $F_{local}$ , com cinco parâmetros,  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $S_1$  e  $S_2$ , relacionados com o rumo (*heading*),  $\theta$ , da embarcação. Os valores dos parâmetros dependem da magnetização da embarcação e da posição do sensor em relação a esta última, e definem, em relação ao rumo da embarcação, a influência desta no campo medido.

Bullard e Mason [1961] para estudarem esta relação, realizaram um levantamento rebocando um magnetómetro a uma distância de 57 m a ré da embarcação, em águas profundas e segundo um planeamento circular com cerca de 1 km de diâmetro. O mesmo

planeamento foi repetido guinando por bombordo e por estibordo, para que a média dos dois registos retirasse o efeito de variação do CMT. Os resultados encontram-se representados, na figura 19, por círculos. Uma curva foi ajustada a estes últimos, baseada na equação (2).

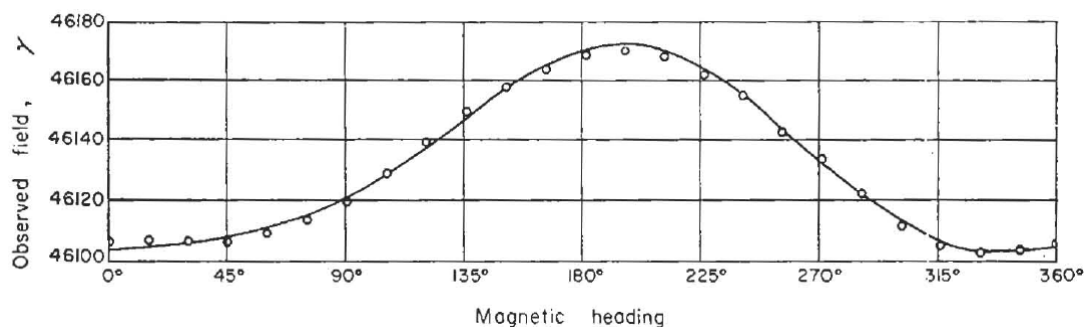


Figura 19 – Variação do campo medido com o rumo do navio Discovery II. Retirado de Bullard e Mason [1961].

Na definição dos parâmetros que descrevem a equação (2) Bullard e Mason [1961] concluíram que o parâmetro associado a  $\cos\theta$  é essencialmente devido a uma magnetização longitudinal permanente e o parâmetro associado a  $\cos 2\theta$  é devido a uma magnetização longitudinal induzida. O parâmetro  $C_2$  possui uma contribuição devida à magnetização longitudinal induzida e outra dependendo da magnetização vertical, ambas induzida e permanente. Concluíram ainda, que, para uma embarcação simétrica, os parâmetros  $S_1$  e  $S_2$  serão muito inferiores em relação aos restantes e poderão, eventualmente, ser ignorados. Constataram ainda que a influência magnética do navio, em relação ao seu rumo, é mínima nos seus polos e máxima no equador.

## IV.2 Exemplos de implementação

Buchanan, et al. [1996] mostram a influência magnética do navio RRS Charles Darwin, com cerca de 70 m de comprimento. O planeamento consistiu na colocação do navio a diferentes rumos numa área com uma menor variação do CC e CP possível, e durante o período mais estável possível da variação do CE. O magnetómetro foi rebocado a uma distância de cerca de três vezes o comprimento do navio.

Os dados adquiridos foram projetados em função do rumo do navio tendo sido ajustados, através do método dos mínimos quadrados, a uma curva definida pela equação (2) (figura 20).

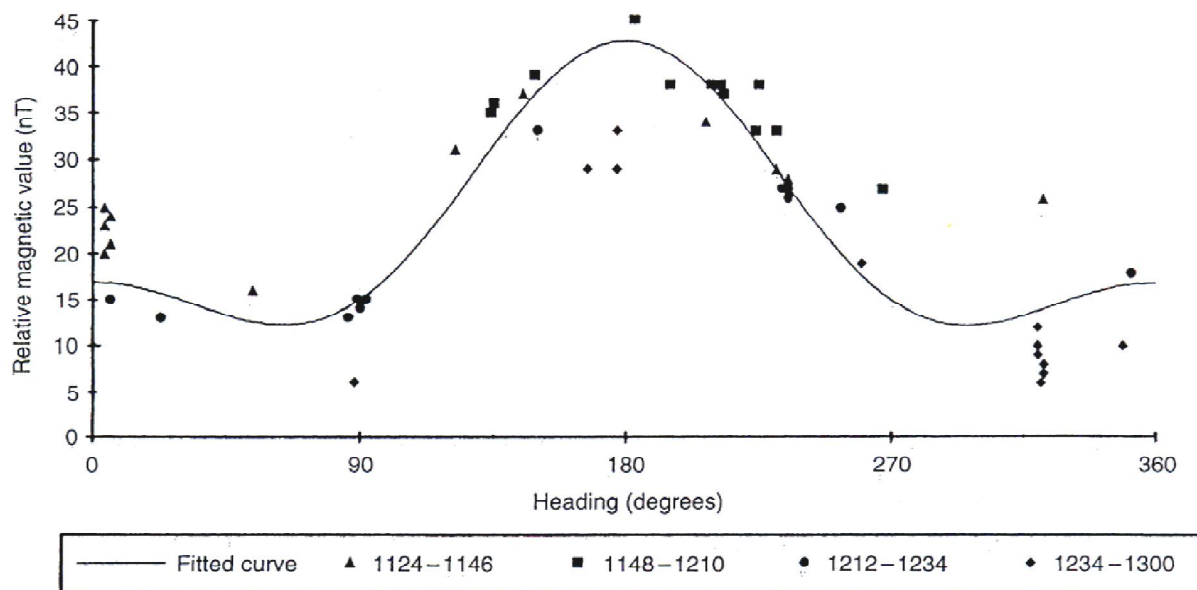


Figura 20 – Variação da anomalia magnética com o rumo do navio RRS *Charles Darwin* com o magnetómetro a ser rebocado a cerca de 250 m de distância a ré do navio. Os dados representados por pontos variam na hora local em que foram adquiridos e a curva adaptada foi calculada através do método dos mínimos quadrados, aplicando a equação (2). Retirado de Jones [1999].

O valor de  $F_{local}$  foi associado ao valor do termo  $C_0$  e os termos em seno foram ignorados devido ao seu baixo valor. O rumo foi calculado usando os dados da navegação e o erro associado foi analisado, sabendo que este seria maior nas fiadas em curva pois o magnetómetro deixaria de estar imediatamente a ré do navio, introduzindo erros na sua medição. A equação que resultou do ajuste e que quantifica a influência do campo magnético do navio RRS *Charles Darwin*, em relação ao seu rumo, estabelecendo como zero o rumo 000, foi:

$$\text{Correção de heading} = 5.5 - 12.9\cos\theta + 7.4\cos2\theta$$

O navio R/V *Joides Resolution* integrado no projeto Integrated Ocean Drilling Program (IODP), com cerca de 143 m de comprimento, realizou em 2012, no âmbito de uma expedição, um levantamento para a determinação da influência magnética do navio para aplicação da correção em registos de medição do CM no mar. Para este fim foi realizado um planeamento circular, com um diâmetro de cerca de 7 km, com um magnetómetro rebocado a uma distância de cerca de 300 m a ré do navio. De forma a minimizar os efeitos da variação diurna do CE, o levantamento foi realizado à noite, e numa área com um declive suave entre os 3242 e 3342 m de profundidade. O campo medido,  $F_{medido}$ , foi projetado em

relação ao rumo magnético e uma curva, definida pela equação (2) foi ajustada aos dados (figura 21). Considerando que o navio é simétrico, os parâmetros 5° e 6° da mesma equação (associados a seno) foram ignorados, resultando na seguinte equação que representa a variação do campo magnético do R/V Joides Resolution com o seu rumo, com um reboque a cerca de 200 m do navio:

$$F_{\text{navio}} = 48.16 - 52.61\cos\theta + 4.45\cos2\theta$$

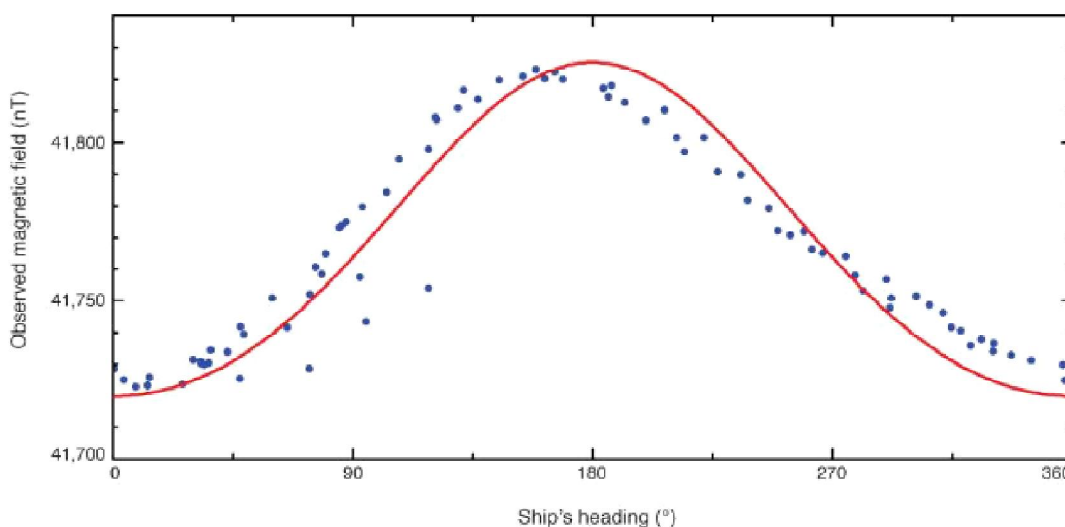


Figura 21 – Gráfico com valores projetados do  $F_{\text{medido}}$  versus o rumo do navio e a curva ajustada aos mesmos. Retirado de Kang et al. [2010].

### IV.3 Aplicação nas lanchas hidrográficas classe Andrómeda

As lanchas hidrográficas da classe Andrómeda pertencentes à Marinha Portuguesa, A5203 NRP Andrómeda e A5205 NRP Auriga, são utilizadas, entre outros trabalhos, para a realização de levantamentos para a medição do CM no mar. Estas lanchas têm cerca de 32 metros de comprimento, 245 toneladas de deslocamento e casco em ferro. Na deteção de objetos é importante quantificar a sua influência magnética.

Foram realizados ensaios em março e dezembro de 2012, ao largo península de Tróia e a noroeste do Cabo Espichel, a bordo do NRP Andrómeda e em maio de 2012, ao largo da península de Tróia, a bordo do NRP Auriga seguindo um planeamento circular e um planeamento radial. A área escolhida para estes ensaios, embora limitada por questões logísticas, teve em conta a mínima variação da geologia do local (consultando a carta de sedimentos superficiais da plataforma continental, SEPLAT) e a mínima variação da

profundidade (consultando as cartas náuticas de aproximação aos portos de Lisboa e de Setúbal). A variação do CE foi registada em terra por um magnetómetro montado em estação.

Os resultados apresentados a seguir, encontram-se corrigidos da variação do CE, através do seu registo por um magnetómetro montado numa estação em terra, e do CP através da correção do valor calculado pelo modelo IGRF de 2011, para uma posição média da área de levantamento, considerando que a sua variação, dentro de cada área, é da ordem de alguns nT. Assim sendo, os valores projetados corresponderão à anomalia magnética do navio e à contribuição do CC, este último será à partida constante. Estes valores, de anomalia magnética, foram projetados em relação ao rumo do navio. O rumo do navio foi calculado com base das posições da antena de GPS que se encontrava montado junto ao ponto de reboque do magnetómetro.

Os dados foram processados através de rotinas cujo código simplificado se encontra no Apêndice B (rotinas B.3 a B.6). No planeamento radial os dados *raw* foram selecionados tendo em conta uma área de 50 m em volta de um ponto médio de interseção das várias fiadas. Para os dados selecionados de cada fiada, foi calculado um valor médio da anomalia magnética e um valor médio do rumo do navio. Por fim, para cada planeamento e para cada distância ao navio, foi ajustada uma curva calculada com base na equação (2) utilizando uma ferramenta do Matlab, denominada por *Curve Fitting Tool*, determinando-se assim os seus coeficientes.

Nos ensaios de março de 2012, a bordo do NRP Andrómeda, foi realizado um planeamento radial, cada fiada com um comprimento de cerca de 1000 m e com um ângulo de 30° entre elas, e um planeamento circular com um diâmetro de 1000 m. Ambos os planeamentos foram realizados com o magnetómetro rebocado a ré do navio a uma distância de 100 e de 150 m. Este levantamento foi realizado ao largo da península de Tróia e o magnetómetro, para registo da variação do CE, foi colocado em terra a uma distância de cerca de 30 Km.

Nos ensaios de dezembro de 2012, a bordo do NRP Andrómeda, foi realizado um planeamento circular com um diâmetro de cerca de 2000 m, com o magnetómetro rebocado a ré do navio a uma distância de cerca de 250 m. Esta é a máxima distância permitida pelo seu cabo leve. Este levantamento foi realizado no canhão de Lisboa e o magnetómetro, para registo da variação do CE, foi colocado em terra a uma distância de cerca de 15 Km.

Para os ensaios realizados a bordo do NRP Andrómeda obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na figura 22.

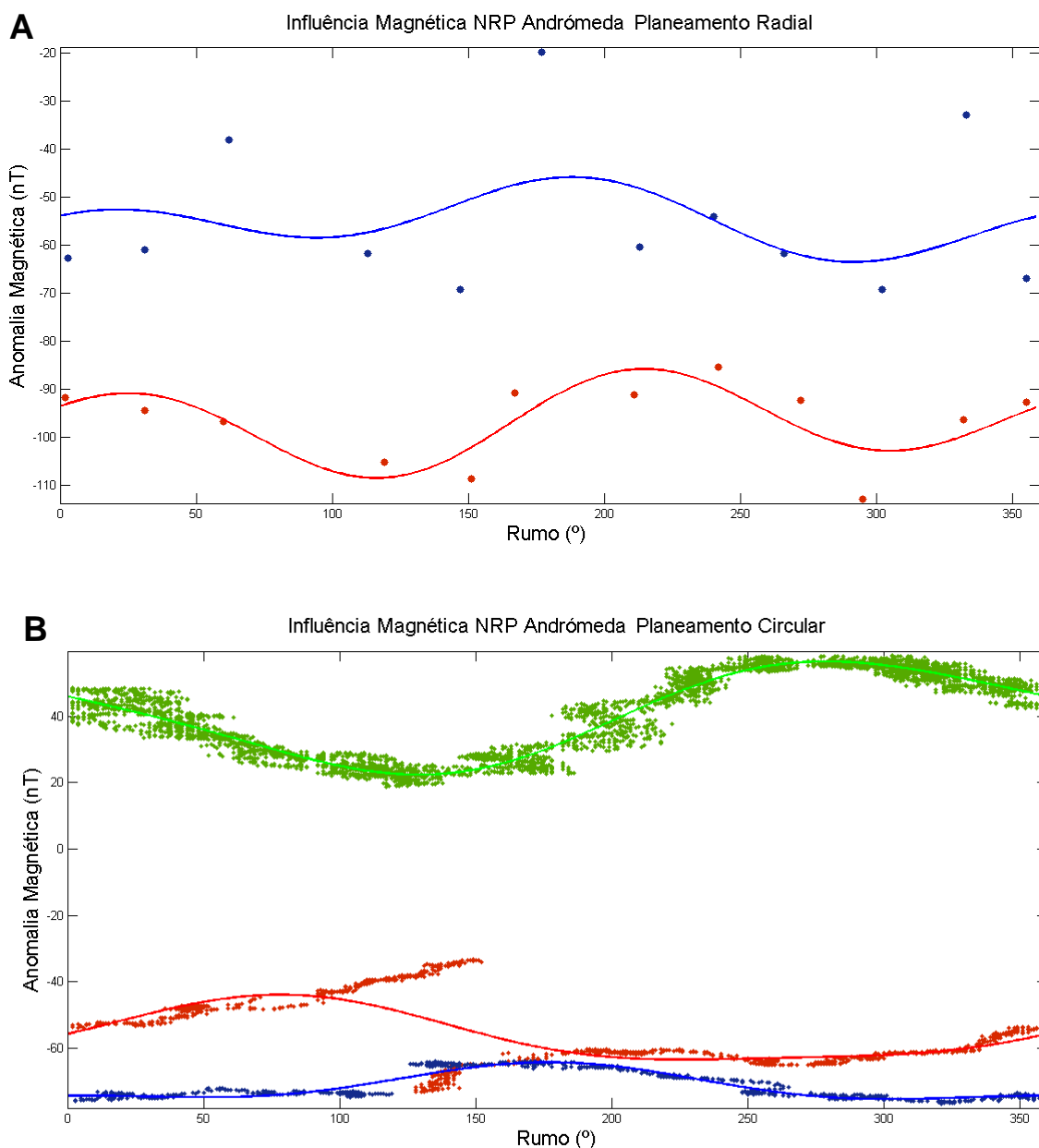


Figura 22 – Projeção dos resultados obtidos com o magnetómetro rebocado a uma distância de 100 m do navio, a vermelho, de 150 m, a azul e a 250 m a verde. Nas mesmas cores encontram-se projetadas as curvas que melhor se ajustam. A) planeamento radial B) planeamento circular.

Nos ensaios de maio de 2012, a bordo do NRP Auriga, foi realizado um planeamento radial, cada fiada com um comprimento de cerca de 500 m e com um ângulo de 45° entre elas, e um planeamento circular com um diâmetro de 500 m. Ambos os planeamentos foram realizados com o magnetómetro rebocado a ré do navio a uma distância de 80, 120 e de 200 m. Este levantamento foi realizado ao largo da península de Tróia e o magnetómetro, para registo da variação do CE, foi colocado em terra a uma distância de cerca de 15 Km.

Para os ensaios realizados a bordo do NRP Auriga obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na figura 23.

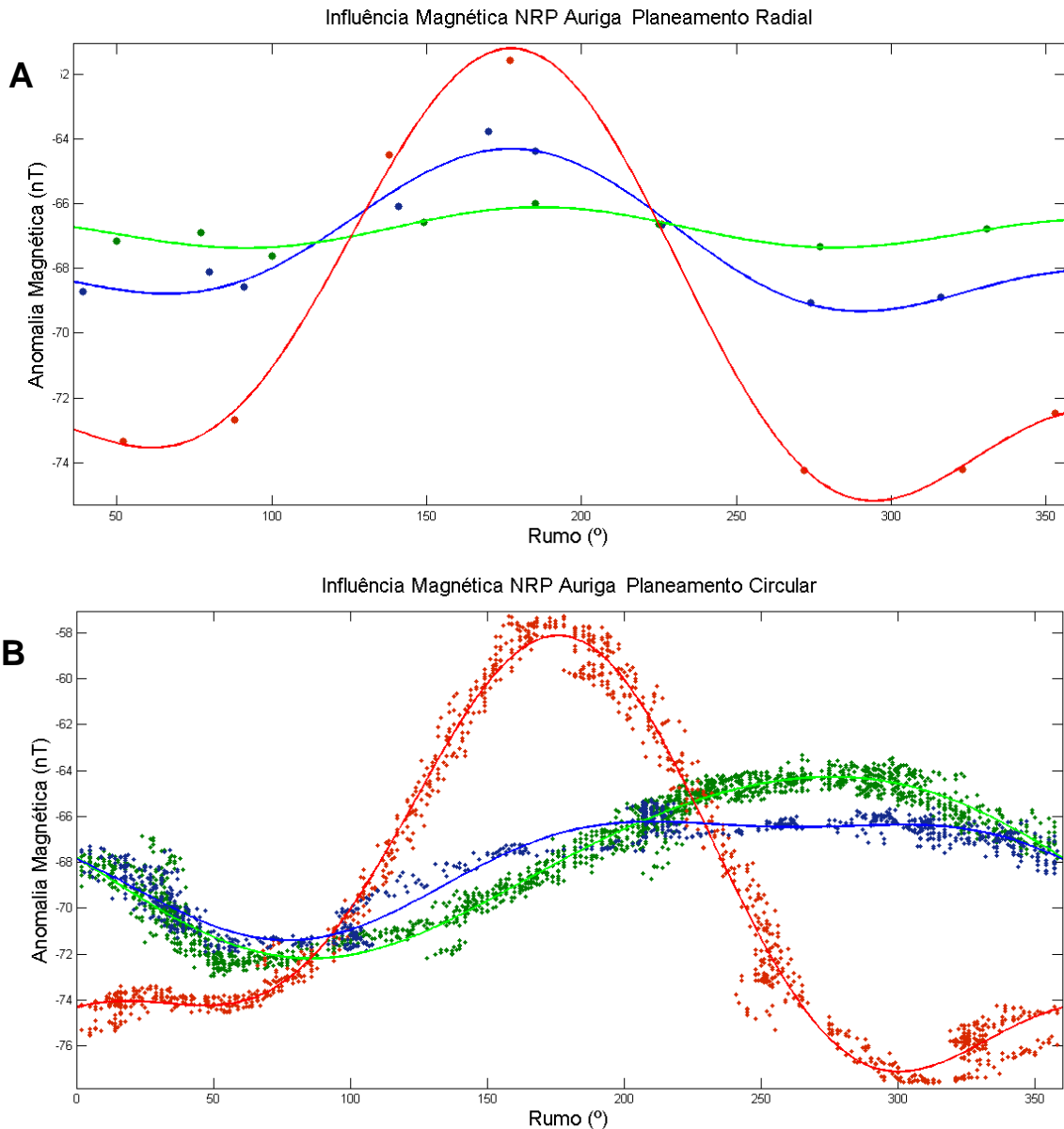


Figura 23 - Projeção dos resultados obtidos com o magnetómetro rebocado a uma distância de 80 m do navio, a vermelho, de 120 m, a azul e a 200 m a verde. Nas mesmas cores encontram-se projetadas as curvas que melhor se ajustam. A) planeamento radial B) planeamento circular.

Os coeficientes resultantes do ajuste da equação,

$$F_{navio} = C_0 + C_1 \cos\theta + C_2 \cos 2\theta + S_1 \sin\theta + S_2 \sin 2\theta \quad (3)$$

baseada na equação (2), encontram-se na tabela 1 e a sua relação encontra-se representada na figura 24. Para cada curva apresentam-se na mesma tabela os valores de dois parâmetros estatísticos que permitem avaliar a qualidade do ajustamento realizado. Estes dois parâmetros são o coeficiente de determinação (CD) e o erro quadrático médio

**Capítulo IV - Influência magnética de uma embarcação na medição do CM**

(EQM). Ambos medem o grau de ajustamento entre os valores reais e os estimados, ou seja, o quão bem sucedido foi o ajuste da curva à variabilidade dos dados. No primeiro parâmetro quanto mais próximo estiver o valor de um, melhor o ajuste, enquanto que no segundo parâmetro quanto mais próximo estiver o valor de zero, melhor será o ajuste [Murteira, et al. 2002; MathWorks].

Tabela 5 – Coeficientes e principais parâmetros estatísticos resultantes do ajustamento da equação (2), para cada ensaio realizado.

Navio	Planeamento	Distância ao navio (m)	Coeficientes da equação de Bullard e Mason [1961]					Parâmetros estatísticos do ajuste da equação	
			C0	C1	C2	S1	S2	CD	EQM
NRP Andrómeda	Radial	100	-97.06	-0.78	4.25	-3.77	7.44	0.58	6.60
		150	-55.06	-3.91	5.05	1.68	2.64	0.09	18.93
	Circular	100	-55.84	2.5	-2.36	9.23	0.72	0.42	7.84
		150	-71.42	-4.99	2.16	0.50	-0.14	0.89	1.33
		250	40.15	-7.26	-1.44	-14.68	2.14	0.94	2.91
NRP Auriga	Radial	80	-69.97	-5.59	3.16	0.90	0.02	0.997	0.39
		120	-67.45	-1.88	1.26	0.30	-0.01	0.97	0.53
		200	-66.83	-0.19	0.52	-0.03	-0.12	0.83	0.31
	Circular	80	-69.79	-8.07	3.54	1.71	0.05	0.98	0.88
		120	-68.05	-0.61	0.81	-2.40	-0.36	0.91	0.58
		200	-68	-0.03	0.23	-3.94	-0.18	0.95	0.64

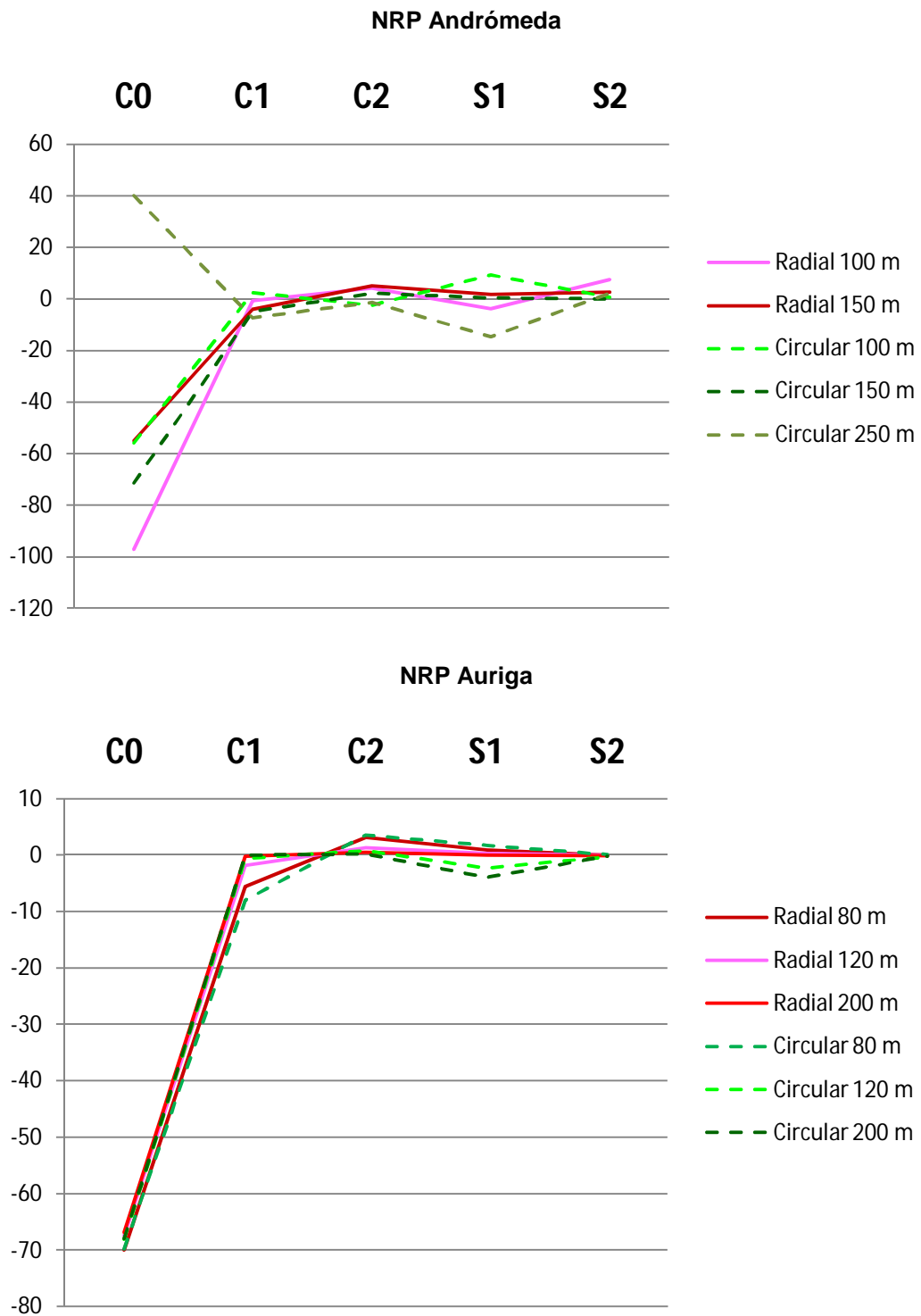


Figura 24 – Representação gráfica dos coeficientes resultantes do ajustamento da equação (2), para cada ensaio realizado. De cima para baixo: Gráfico para medições realizadas no NRP Andrómeda e gráfico para as medições realizadas para NRP Auriga

#### **IV.4 Discussão**

De acordo com os exemplos da bibliografia dos resultados da quantificação da influência magnética de um navio e com os resultados dos ensaios realizados, verifica-se que a melhor quantificação foi obtida para o NRP Auriga com planeamento radial.

Nos resultados para o NRP Andrómeda verifica-se que possivelmente o local onde foi realizado o levantamento, nos ensaios em março, ao contrário do que se seria esperar, possui uma variação do CC. Isto verifica-se nitidamente nos resultados do planeamento circular onde há um salto abrupto no valor da anomalia. Em ambos os planeamentos os parâmetros estatísticos do ajuste da curva estão muito longe do aceitável, ou seja, os valores estimados exibem uma elevada incerteza. No entanto, e como seria expectável, verifica-se uma redução da amplitude da influência magnética com o aumento do comprimento do cabo. No que diz respeito ao ensaio realizado em dezembro, realizado num outro local, mais uma vez se verifica que estamos perante um valor de CC que apresenta uma grande influência nos resultados. Neste levantamento existe uma diferença entre o valor máximo e mínimo de cerca de 66 nT, muito superior aos valores no levantamento anterior, diferenças entre o valor máximo e mínimo de 40 nT, para uma distância de 100 m, e de 10 nT, para uma distância de 150 m. Seria ainda de se esperar que quanto mais afastado estivesse o magnetómetro do navio menor seria a sua influência, logo a amplitude seria menor, o que não aconteceu. É possível que neste último ensaio, a proximidade ao maciço sub-vulcânico de Sintra, um conhecido corpo intrusivo cuja anomalia magnética se encontra bem representada na carta de anomalias magnéticas de Portugal Continental, produzida após a realização de um levantamento aeromagnético em Portugal Continental em 1978 e em 1981 [Miranda, 1989], tenha tido alguma influência. De acordo com Miranda [1989] este maciço sub-vulcânico, embora não tenha tido uma cobertura total no levantamento aeromagnético, apresenta uma anomalia máxima de cerca de 100 nT. Esta anomalia justifica os valores elevados registados neste último ensaio.

Os resultados apresentados referentes ao NRP Auriga mostram-nos, no planeamento radial, um resultado mais coerente com o esperado e parâmetros estatísticos do ajuste das curvas muito mais aceitáveis. Verifica-se a diminuição da influência magnética ao diminuir a distância do magnetómetro ao navio como era esperado, e o máximo da sua influência ocorre quando o navio se encontra perto do rumo 180. Os mínimos, no entanto, variam com os rumos 060 a 090 repetindo-se entre os rumos 300 a 280 conforme a distância do magnetómetro ao navio vai aumentando. No planeamento radial verifica-se que para os 80 m de distância ao navio, a forma da curva de ajuste aos dados é muito idêntica à curva de

ajuste aos resultados do planeamento circular, no entanto é superior em amplitude. À medida que se aumenta a distância, os resultados do planeamento circular afastam-se dos resultados obtidos com o planeamento radial. A razão apontada para este resultado é a diferença entre o rumo do magnetómetro e do rumo do navio. Quanto maior o afastamento do magnetómetro ao navio mais difícil será garantir que o magnetómetro se encontre no mesmo rumo que o navio. Esta última condição é essencial para a quantificação da influência magnética do navio nos registos de medição do CMT no mar. Por fim, verifica-se que ao contrário dos exemplos apresentados na bibliografia, que o 4º e 5º parâmetro da equação (2) (associadas a seno) não podem ser desprezados, logo, partindo do método apresentado por Bullard e Mason [1961], este navio não pode ser considerado simétrico.

Conclui-se assim, que o planeamento radial, embora seja um levantamento mais demorado, é o que garante que o magnetómetro siga o mesmo rumo da embarcação, rumo este que fará variar a influência magnética que se pretende medir. O planeamento circular é um levantamento mais rápido, no entanto, não garante que o rumo do magnetómetro, aquando a medição, seja o mesmo que a da embarcação o que é importante para garantir a quantificação da anomalia do mesmo. Para garantir que o rumo do magnetómetro é igual ao da embarcação aquando da sua medição, o diâmetro do planeamento terá de ser da ordem de alguns milhares de metros. Será também necessário manter as mesmas condições de manobra, como aplicar o mesmo grau de leme, de modo a que a manobra afete o menos possível o reboque do magnetómetro. Esta condição leva a que a área percorrida seja maior, logo a probabilidade de variação do CC nesta mesma também será maior.

A escolha do local para a realização de qualquer um dos planeamentos propostos é determinante na qualidade dos resultados. Assim sendo, e para garantir que não haja nenhuma interferência do campo local, o levantamento deve ser realizado longe de costa e com a maior coluna de água possível de modo a que, o magnetómetro ao ser rebocado à superfície, não tenha influência do CC. Quanto à correção do CE, ficou aqui provado que desde que haja uma medição do mesmo em estação a sua correção é possível. No entanto, a distância do magnetómetro, montado em estação, à área de levantamento, entre outros condicionantes, terá de ser tida em conta. No que diz respeito à distância e considerando que o levantamento para a quantificação da influência magnética de uma embarcação terá de ser preferencialmente realizado numa zona longe de costa, a montagem da estação para a aquisição de dados teria de ser fundeada próxima da área de levantamento. O fundeamento da estação leva a que não haja um grande controlo de uma possível influência de campos magnéticos de origem que não a do CE, como por exemplo o movimento de

massas de água devido à existência de correntes, e a uma logística mais elaborada. Esta problemática será abordada mais à frente no capítulo VI.

De modo a que a influência magnética no NRP Auriga seja mínima ter-se-á de rebocar o magnetómetro a uma distância superior a 200 m, no entanto, para uma distância de 80, 120 ou 200 m as curvas de ajuste calculadas poderão ser utilizadas para a correção necessária de modo a retirar a sua influência magnética. No caso do NRP Andrómeda, embora seja estruturalmente idêntico ao NRP Auriga, será aconselhado repetir os ensaios, agora de forma mais eficiente após as conclusões retiradas.

Em qualquer outra embarcação utilizada deve-se realizar um planeamento para quantificação da possível influência para posteriormente corrigir os dados adquiridos. A razão entre a distância de reboque em relação ao comprimento da embarcação é defendida como sendo no mínimo de 3 vezes o comprimento. No entanto, para o exemplo prático das lanchas hidrográficas classe Andrómeda, ficou provado que o comprimento de reboque terá de ser superior a cerca de 6 vezes o comprimento do navio.

Para além da necessidade de cálculo desta influência magnética é importante definir de quanto em quanto tempo esta quantificação deve ser feita. Como a variação da influência magnética de uma embarcação varia com o valor do CMT do local, e o CP possui uma variação secular, ela própria também irá ter uma variação secular. Sendo que um novo modelo IGRF para o CP é apresentado de 5 em 5 anos, seria importante quantificar a influência magnética de qualquer embarcação entre o mesmo intervalo de tempo.

## Capítulo V – Posicionamento dos dados

Posicionar rigorosamente os dados resultantes da medição do campo magnético é extremamente importante quando se pretende detetar e localizar objetos. A solução ideal para o posicionamento dos dados seria a combinação de um sistema global de posicionamento por satélite com correção diferencial para o posicionamento da plataforma de reboque, com sensores de atitude para determinação da inclinação e proa da plataforma, com um sistema de posicionamento acústico que posicione o magnetómetro relativamente à plataforma de reboque. No entanto, e como já abordado no capítulo II, a logística e os custos de utilização de sistemas de posicionamento acústico e de atitude, impedem muitas vezes a sua utilização, pelo que a posição é normalmente obtida com recurso ao posicionamento global por satélite com correção diferencial da plataforma, ao comprimento de cabo de reboque e a informação de outros sensores, como o sensor de pressão.

Considerando a utilização de um sistema constituído por um magnetómetro rebocável e um sistema DGPS cuja antena de receção, da posição e respetiva correção, se encontra montada na plataforma de reboque, o posicionamento do magnetómetro pode ser decomposto em dois planos: um plano vertical, onde a distância do magnetómetro à antena de receção, fixa na plataforma, e a profundidade do magnetómetro são os principais componentes a determinar, e um plano horizontal, em que o ângulo entre o magnetómetro e a plataforma, e a distância do magnetómetro à plataforma são os principais componentes a determinar.

A posição do magnetómetro irá ser afetada por vários condicionantes, alguns já abordados no capítulo II e III. As características físicas do cabo e do magnetómetro, a velocidade de reboque do magnetómetro e a influência do movimento da embarcação de reboque são os principais condicionantes.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos alguns exemplos, encontrados na bibliografia, de cálculo da posição de equipamentos rebocados. No fim do capítulo é apresentada a aplicação de alguns métodos num dos ensaios realizados e a discussão dos resultados obtidos.

### V.1. Plano vertical

Em qualquer sistema de posicionamento primeiro há que definir um referencial e um ponto de referência, para que todas as medições e cálculos realizados sejam devidamente referenciados. O ponto de referência poderá ser um qualquer desde que todas as medidas e cálculos realizados, no plano vertical ou horizontal, sejam sempre referenciadas ao mesmo

ponto. Normalmente para facilitar os cálculos este ponto é assumido como sendo o ponto de reboque do magnetómetro que poderá ser uma patesca, uma roldana, o próprio guincho, o ponto de lançamento do cabo, etc.

Na utilização de um sistema DGPS, ter-se-á de ter em conta a localização da sua antena recetora. No caso da antena ser da própria embarcação, esta encontra-se normalmente colocada no topo da sua estrutura mais alta, acima da ponte. Este ponto embora garanta uma boa receção do sinal de GPS e da correção da sua posição, é o que sofre uma maior oscilação resultante do movimento da embarcação. Numa situação em que a embarcação possua um sistema de correção do seu movimento, através do *output* de sensores de atitude, à sua posição o erro associado será inferior. Caso contrário, a colocação de uma antena num local de boa receção e a ré da embarcação, onde embora sofra uma oscilação (resultante do movimento da embarcação) será sentido com uma menor amplitude, é a melhor opção de modo a obter a posição com um maior rigor possível. Esta última configuração é a mais utilizada.

Considerando esta configuração, a figura 25 resume as distâncias fundamentais para o cálculo do posicionamento do magnetómetro, no seu plano vertical.

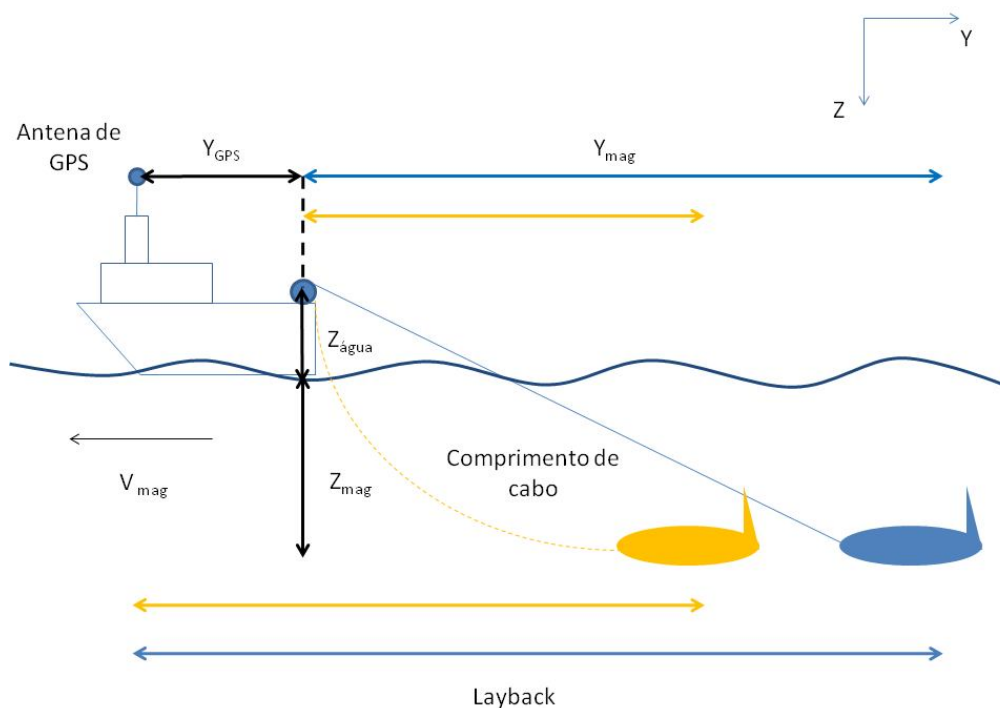


Figura 25 – Plano vertical do cálculo do posicionamento do magnetómetro. Magnetómetro rebocado, a partir de uma patesca colocada a ré da embarcação, a uma velocidade  $V_{mag}$ .

Neste exemplo o ponto de referência é o ponto de reboque do magnetômetro e a antena de recepção do sinal DGPS encontra-se no topo da superestrutura da embarcação.

Como se pode verificar na figura 25, tem-se no eixo Y, a distância da antena de GPS ao ponto de reboque do magnetômetro,  $Y_{GPS}$ , e a distância do ponto de reboque ao magnetômetro,  $Y_{mag}$ . A soma destas duas distâncias é o valor de *layback*. No eixo Z tem-se a distância do ponto de reboque à superfície da água,  $Z_{água}$ , e a distância do magnetômetro à superfície da água,  $Z_{mag}$ .

As distâncias  $Y_{GPS}$  e  $Z_{água}$  podem ser facilmente medidas. A distância  $Z_{mag}$  pode ser obtida por um sensor de pressão colocado no equipamento, ou através de um sensor de altitude e conhecendo a profundidade local, ou ainda estimada através do comprimento de cabo, desde o ponto de reboque, e da velocidade de reboque. O comprimento de cabo pode ser obtido por um “conta metros” colocado numa patesca ou mais simples ainda, pela marcação prévia do cabo com uma fita resistente à água, de metro a metro por exemplo. Este último método de cálculo de  $Z_{mag}$  é o menos preciso sendo que a existência de um sensor de profundidade e/ou sensor de altitude, combinado com o valor da profundidade do local (dado pela sonda da embarcação), irá reduzir significativamente o erro de cálculo de  $Z_{mag}$ .

A distância  $Y_{mag}$ , e conseqüentemente o *layback*, é o valor mais difícil de calcular pois este dependerá diretamente da forma de como o cabo se estende ao longo da coluna de água. Ainda na figura 25, considerando que o reboque é feito pelo nariz do magnetômetro, estão representados dois modelos: um modelo em que o cabo se encontra totalmente esticado, representado pelo magnetômetro azul, e um modelo em que o cabo forma uma catenária, representado pelo magnetômetro amarelo. Esta última situação é a mais comum devido à existência de uma resistência que o cabo de reboque e o próprio magnetômetro estão sujeitos ao serem deslocados na coluna de água, denominada por força de arrasto [Breiner, 1975], ou de resistência.

A velocidade de reboque do magnetômetro,  $V_{mag}$ , segundo o eixo Y é variável ao longo do tempo e dependerá da soma da força de reboque da embarcação, que resultará da interferência da corrente, ventos, etc., interferindo na manobra da embarcação como já abordado no capítulo III, e das forças de resistência oferecidas ao cabo e ao magnetômetro. A variação da  $V_{mag}$  é difícil de ser calculada, pelo que normalmente é assumida como sendo uma média da velocidade da embarcação no decorrer de uma fiada.

Uma força de resistência, ou de arrasto, determina a força a que é sujeito um objeto ao atravessar um certo fluido e é definida pela seguinte equação,

$$FA = CA * \rho * A * \frac{\rho * V^2}{2}$$

onde  $CA$  é o coeficiente de resistência ou de arrasto, que depende da forma do objeto, da sua orientação e do seu número de Reynolds,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $V$  a velocidade do objeto em relação ao fluido e  $A$  a área de referência [Giles, 1976].

O número de Reynolds é uma grandeza adimensional que representa a razão das forças de inércia pelas forças de viscosidade. Para tubos circulares, forma que mais se assemelha à forma do cabo de reboque e de um magnetómetro, o número de Reynolds é descrito pela seguinte equação:

$$RE = \frac{V * d * \rho}{\mu}$$

Onde  $V$  é a velocidade média,  $d$  é o diâmetro do tubo,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica [Giles, 1976].

Como se depreende da equação que descreve a força de arrasto, esta força dependerá das características físicas do cabo e do magnetómetro, como a sua dimensão e a sua forma, e dependerá da massa volúmica do fluido, que irá variar se for água do mar ou salobra, e por fim da velocidade de reboque do magnetómetro.

É de referir que, a força de arrasto exercida no cabo de reboque e no magnetómetro pode ser simplificada decompondo-a numa força tangencial ao cabo, no eixo Y, e normal ao cabo, no eixo Z.

Uma das características físicas mais importantes no cabo será o seu diâmetro. Este é projetado para responder a determinadas características mecânicas e elétricas, e o seu valor irá variar consoante a quantidade de dados a transmitir, o comprimento total necessário para rebocar o equipamento à velocidade e profundidade desejável, o peso do equipamento, a existência de possíveis dispositivos auxiliares de controlo da profundidade, etc. Aumentando o diâmetro do cabo, o seu peso irá aumentar, logo, quanto maior o comprimento de cabo na água maior será a resistência oferecida no seu deslocamento pela água e uma maior proximidade deste último ao fundo [Breiner, 1975]. Porém, para o mesmo comprimento de cabo também se verifica que a tensão exercida no ponto de reboque e a profundidade do magnetómetro também irão variar consoante a velocidade do reboque (figura 26).

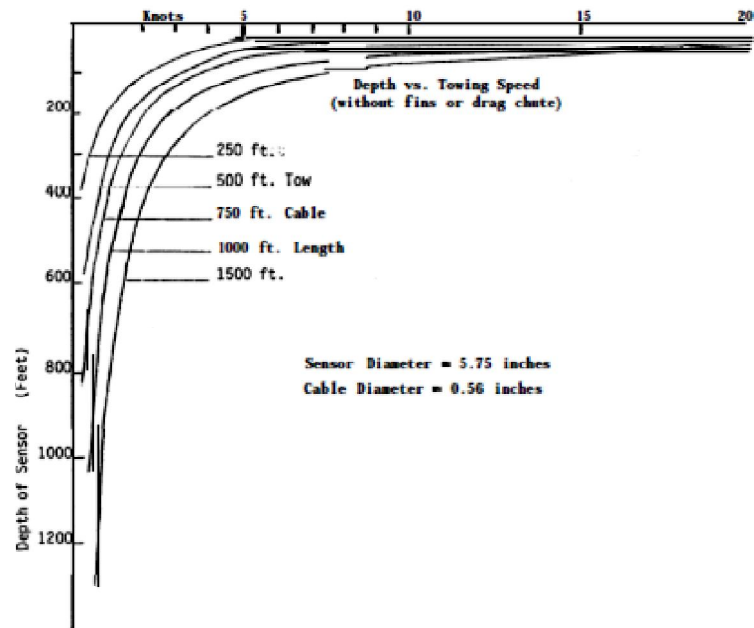


Figura 26 – Variação da profundidade do magnetómetro em função da velocidade de reboque e comprimento de cabo. Retirado de Breiner [1975].

## V.2. Plano horizontal

Assumindo a mesma configuração descrita anteriormente, considera-se o referencial apresentado na figura 27 para a representação do plano horizontal do posicionamento.

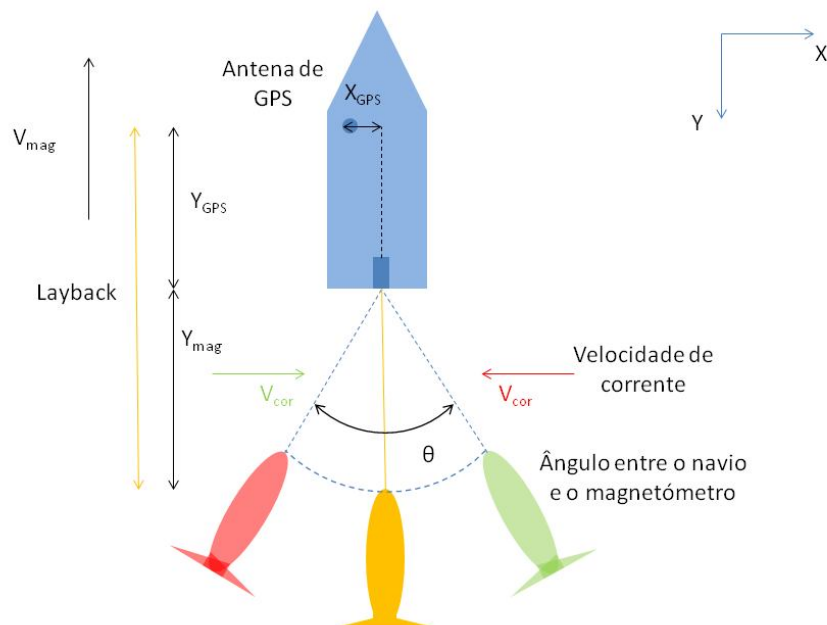


Figura 27 – Plano horizontal do cálculo do posicionamento do magnetómetro. Magnetómetro rebocado, a partir de uma patesca colocada a ré da embarcação, a uma velocidade  $V_{mag}$ .

Como se pode verificar, no eixo X considera-se a distância da antena de GPS ao ponto de reboque,  $X_{GPS}$ , e no eixo Y a distância do magnetómetro à antena de GPS, *layback*, como sendo a soma das distâncias  $Y_{mag}$  e  $Y_{GPS}$ , como já referido no plano vertical. A possível existência de uma componente de velocidade de corrente,  $V_{cor}$ , no eixo X, irá afetar nomeadamente o rumo do magnetómetro em relação ao rumo da embarcação como se pode ver pelas duas situações representadas pelos magnetómetros a vermelho e a verde na figura 27. A embarcação numa situação de existência de corrente, ir-se-á reposicionar contra a mesma, podendo garantindo assim o rumo da fiada. No entanto a figura 27 pretende demonstrar somente o comportamento do magnetómetro e não da embarcação perante esta situação. Se a componente em X for nula, e o rumo for constante, o magnetómetro tenderá a seguir o rumo da embarcação como é exemplificado pelo magnetómetro a amarelo.

O ângulo entre o rumo da embarcação e o rumo do magnetómetro, se existir, é difícil de quantificar. A existência de uma variação do ângulo entre o magnetómetro e a embarcação também poder-se-á dever à variação do rumo da embarcação, por razões já apontadas no capítulo III. Este movimento será transportado pelo cabo de reboque ao magnetómetro, embora sendo amortecido ao longo do cabo. Uma das soluções apontadas para reduzir este efeito será a aplicação de uma média móvel aos dados de posicionamento de modo a representar da melhor forma esta influência, como será demonstrado mais à frente.

### **V.3. Exemplos na bibliografia de cálculo e aplicação do valor de *layback***

Existem alguns exemplos na bibliografia de como realizar cálculos do valor de *layback* em sistemas rebocáveis, desde os mais simples, que demonstram que o erro associado a esta simplificação é quase desprezável, até cálculos que podem levar algum tempo de processamento e que tentam aproximar-se cada vez mais da realidade, ou seja, do movimento real do equipamento rebocável.

Hansen [1985], sugere uma abordagem simples para obtenção de um modelo do sistema de reboque de dois magnetómetros, configuração em gradiómetro longitudinal, considerando-o como um sistema estático. De acordo com a figura 28, tem-se que o rumo da fiada faz um ângulo  $\alpha$  com o vetor que representa a corrente, um ângulo  $\beta$  com o rumo da embarcação e um ângulo  $\beta'$  com o rumo do sistema rebocado. Considerando que  $v$  é a velocidade da embarcação ao longo da fiada, com referência ao fundo, tem-se que a velocidade real com referência à superfície do mar será,

$$v_w = v - v_c$$

onde  $v_c$  é a velocidade da corrente sentida durante o reboque. Como o sistema está a ser modelado como sendo um sistema estático, a velocidade  $v_w$ , também será a velocidade de reboque do sistema.

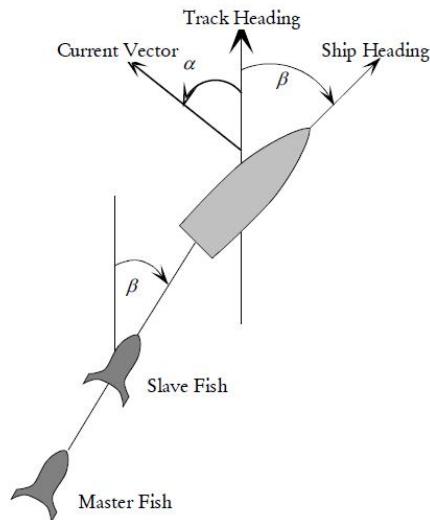


Figura 28 – Esquema exemplificativo de reboque de um sistema de dois magnetómetros, configuração em gradiómetro longitudinal. Retirado de Hansen [1985].

Assumindo que o sistema rebocado é uma massa concentrada no fim de um cabo sem massa, sem resistência, e que o atrito causado pelo mesmo obedece à Lei de Stokes, isto é, a velocidade é proporcional ao longo do meio que oferece resistência, tem-se que:

$$T = \sigma_L v_w \cos(\beta - \beta')$$

$$0 = \sigma_T v_w \sin(\beta - \beta')$$

Onde  $T$  é a tensão da embarcação exercida no sistema rebocado, ao longo do eixo de reboque, e  $\sigma_L$  é o coeficiente de atrito ao longo do eixo. Como o sistema está a ser analisado como sendo estático, esta tensão é equilibrada pela tensão de atrito criada pelo sistema rebocado e  $\beta'$  é o resultado entre estas duas forças. Considerando que o ângulo de arraste do sistema de reboque é o mesmo que o da embarcação, simplifica o cálculo do erro do rumo, visto que todo o sistema poder ser tratado como um corpo rígido. Porém, este pressuposto irá implicar que este erro dependa da existência ou não de correntes, logo irá por sua vez variar consoante o rumo da fiada para além de outros condicionantes que irão contribuir para o erro.

Considerando um perfil vertical e seguindo os mesmos pressupostos mencionados anteriormente (um sistema estático que obedece à lei de Stokes), tem-se resumido na figura 29 um sistema de forças.

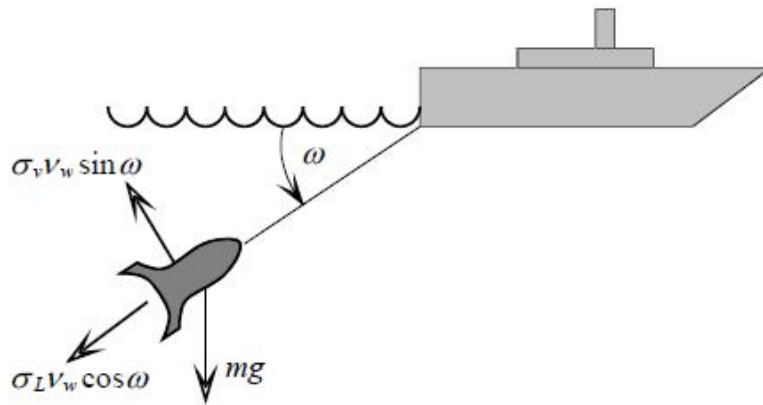


Figura 29 – Esquema exemplificativo de um sistema rebocado em profundidade, retirado de Hansen [1985].

O ângulo de mergulho do sistema é dado por  $\omega$ ,  $\sigma_v$  é o coeficiente de atrito na direção vertical e  $m$  é a massa do sistema rebocado. As forças de tensão ao longo do eixo de reboque e perpendicular a este são, respectivamente, dadas pelas seguintes equações:

$$T = \sigma_L v_w \cos \omega + mg \sin \omega$$

$$\sigma_v v_w \sin \omega = mg \cos \omega$$

Desta última equação retira-se que,

$$\tan \omega = \frac{mg}{\sigma_v v_w}$$

Embora sendo uma aproximação simples à realidade podem-se retirar algumas conclusões importantes que são facilmente comprovadas na prática, nomeadamente que o ângulo de mergulho ( $\omega$ ) decresce com o aumento da velocidade de reboque e que o magnetómetro irá afundar mais com a diminuição da velocidade (figura 30).

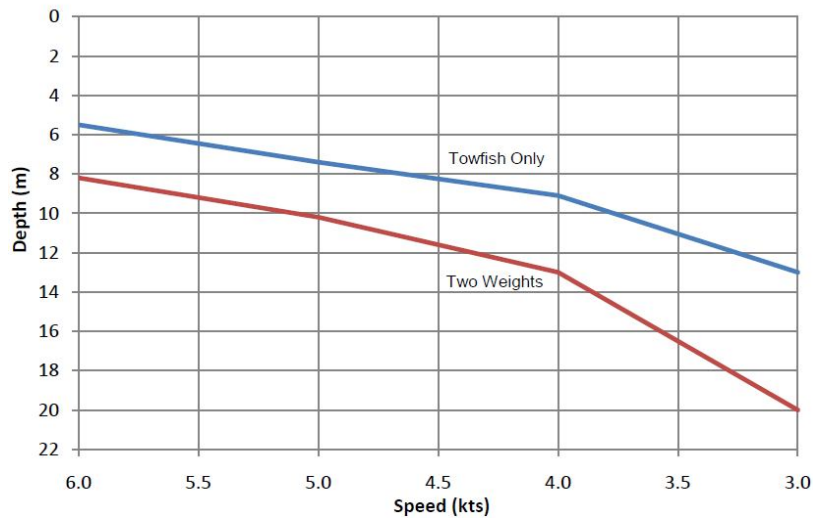
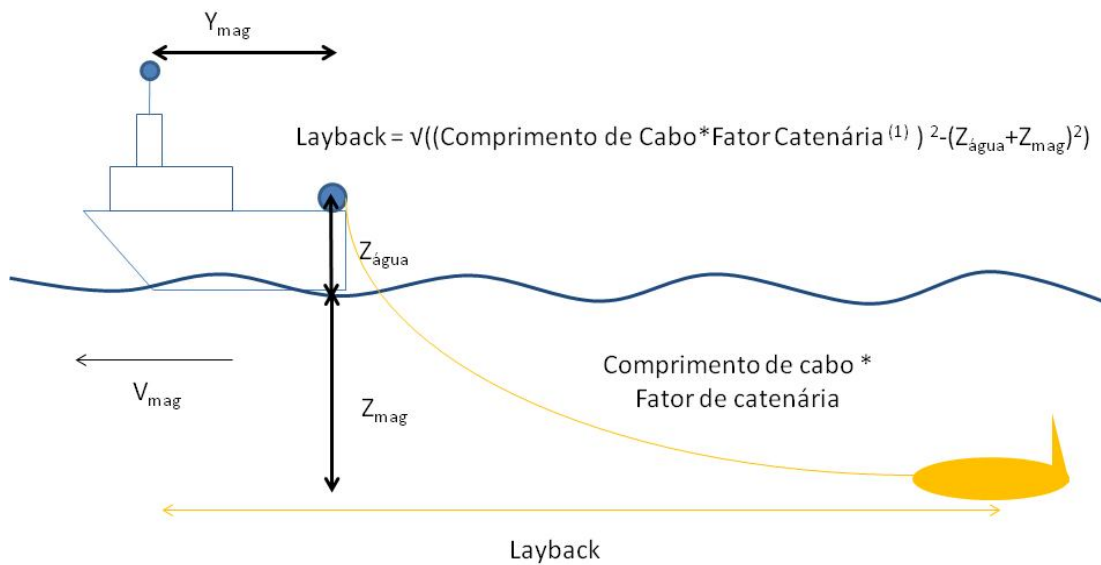


Figura 30 – Variação da profundidade em função da velocidade de reboque para o magnetômetro SeaSpy, com 120 m de cabo fora. A reta a azul representa um magnetômetro sem pesos adicionados e a reta a vermelho um magnetômetro com um total de peso adicionado de 5,442 kg. Retirado de Marine Magnetics Corp.

O *software* HYPACK, INC., utilizado para levantamentos hidrográficos, permite a aquisição de sinal de vários sistemas rebocados nomeadamente, de magnetômetros. Este *software* inclui uma aplicação que possibilita o cálculo do valor de *layback* considerando diferentes métodos. O comprimento de cabo utilizado pode ser introduzido manualmente ou automaticamente, através de qualquer contador de cabo, colocado por exemplo numa patesca. Também é possível a introdução dos *offsets* principais entre a antena de GPS e o ponto de reboque. Um dos modelos apresentados determina o valor de *layback* como sendo o produto entre o comprimento de cabo e um fator de catenária. Outro modelo apresentado determina o valor de *layback* através do teorema de Pitágoras, utilizando os valores de profundidade do equipamento, a altura do ponto de reboque à água e o comprimento de cabo aplicando um fator de catenária (figura 31).



<sup>(1)</sup>0.81 para baixas profundidades e 0.63 para grandes profundidades

Figura 31 – Cálculo do valor de *layback* através do teorema de Pitágoras e um fator de catenária, sugerido pelo software HYPACK, INC.

Em ambos os modelos, o fator de catenária, é assumido como sendo de 0.81 para um reboque a pequenas profundidades e 0.63 para grandes profundidades. A informação da profundidade do equipamento pode ser dada por um sensor de altitude (e com a informação da profundidade do local), sensor de profundidade ou assumindo que este se encontra a uma profundidade constante.

A L-3 Klein Associates, Inc., que é uma empresa que para além de outros produtos manufaturam sistemas de sonar rebocáveis, propõem um modelo de cálculo do valor de *layback* através do teorema de Pitágoras, à semelhança do caso anterior, no entanto não consideram qualquer fator de catenária (figura 32). Os autores defendem de que se trata de um método bastante rigoroso e preciso.

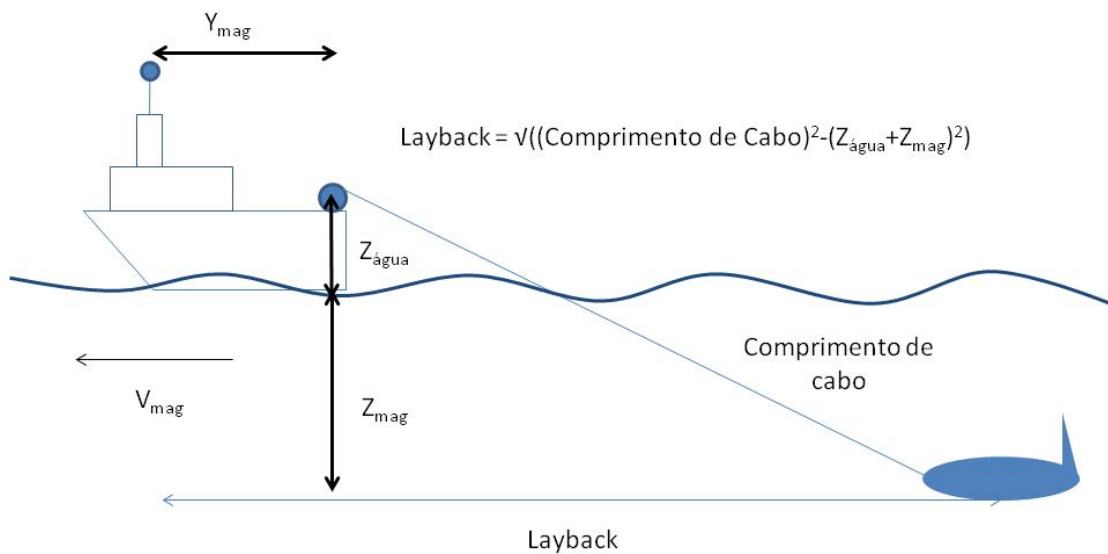


Figura 32 - Cálculo do valor de *layback* através do teorema de Pitágoras, sugerido pela L3 Klein Associates, Inc.

Trahan et al. [1993] apresentam um modelo de cálculo do valor de *layback* para cabos marinhos rebocáveis partindo do conhecimento do comprimento de cabo e da profundidade do equipamento rebocado. Este modelo parte de valores pré-definidos dos coeficientes de arrasto, para o equipamento e para o cabo, e da velocidade do navio para calcular um valor da profundidade a que se encontra o equipamento. Os cálculos são feitos de modo a que a profundidade resultante seja o mais próxima possível da profundidade real, que é conhecida. Quando esse valor for encontrado, os valores dos coeficientes de arrasto e da velocidade de reboque serão os que respeitam a condição conhecida inicialmente, isto é, o comprimento de cabo utilizado e a profundidade do equipamento, valores que são conhecidos.

Os cálculos realizados partem de um conjunto de equações estabelecidas a partir da análise das forças, normais e tangenciais, que são exercidas num dado segmento de cabo, assumindo alguns pressupostos: uma resistência hidrodinâmica constante, coeficientes normais e tangenciais constantes ao longo do cabo, a inexistência de quaisquer outras forças hidrodinâmicas a atuar sobre o cabo, o conhecimento dos valores de tensão inicial e ângulo no equipamento, e conseqüentemente o conhecimento do coeficiente de arrasto do equipamento, a altura do ponto de reboque à água é constante, e a quantidade de cabo no ar, antes de entrar na água, não possui qualquer folga. Desta forma Trahan et al. [1993] conseguem determinar o valor da velocidade e do coeficiente de arrasto, através do desenvolvimento da otimização de um problema não linear, que corresponderão aos valores

conhecidos de comprimento de cabo e da profundidade do equipamento. Consequentemente o valor de *layback* é calculado a partir dos valores determinados.

Trahan et al. [1993] defendem que o seu método apresenta um melhoramento do cálculo do valor de *layback*, e poderá ser utilizado em situações em que um maior rigor de cálculo deste valor seja necessário.

Helmond [2001], afirma que veículos rebocados sem controlo ativo da sua profundidade exercem uma força de depressão devido ao seu peso, e que estes mantêm uma profundidade constante para um determinado comprimento de cabo e velocidade de reboque. O seu cabo de reboque, por sua vez, também irá exercer uma força de arrasto devido a um fluxo tangencial e normal ao cabo. A força de arrasto devido a um fluxo normal é resultante da soma da força de resistência, ou de arrasto, devido à forma do equipamento rebocado e devido à fricção existente. O coeficiente de arrasto, como descrito anteriormente, depende do número de Reynolds. Helmond [2001] afirma que o número de Reynolds é inferior a  $10^5$  para a maioria dos cabos utilizados para reboque de equipamentos.

Para que um equipamento mergulhe, segundo Helmond [2001], a força de arrasto normal ao cabo terá de se sobrepor às forças de depressão e de impulsão, que variam, por sua vez, com o peso do cabo, o peso do equipamento e as forças hidrodinâmicas produzidas pelo equipamento. Helmond [2001] afirma ainda, que a força de arrasto tangencial contribui pouco para a tensão do cabo mas terá alguma influência na variação da profundidade enquanto que a força de arrasto normal não contribui diretamente para a tensão do cabo mas ao influenciar o ângulo de incidência do cabo na água determina o peso de cabo que contribui para a tensão. A figura 33 mostra a variação do coeficiente de arrasto, normal e tangencial, em relação aos números de Reynolds para um cabo típico de reboque.

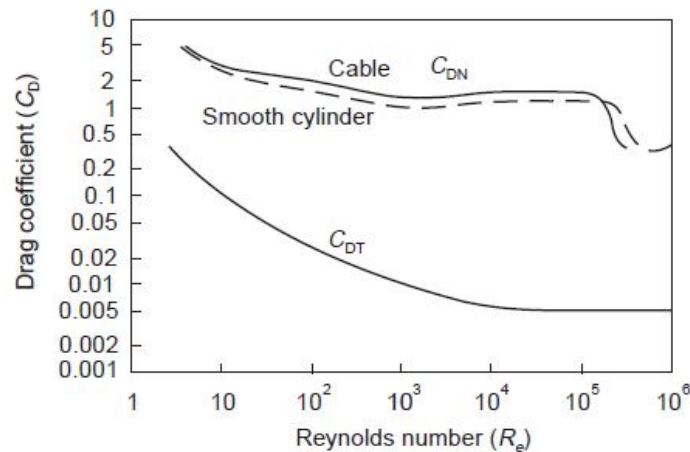


Figura 33 – Coeficientes normal e tangencial de arraste para um cabo típico de reboque, retirado de Helmond [2001].

Quando um cabo é rebocado na água ele assume um ângulo de equilíbrio que é a razão entre o peso do cabo e a força de arrasto. Se as propriedades do cabo forem iguais ao longo dele, este ângulo de equilíbrio ir-se-á manter. Quando um equipamento é colocado na extremidade desse cabo irá perturbar o seu ângulo de equilíbrio somando as suas forças de peso e de impulsão podendo levar a que o conjunto cabo e equipamento aumente a profundidade quando mergulhar e diminua a profundidade quando este ascender. Na figura 34 pode-se verificar que a trajetória do cabo se inicia com um ângulo entre o cabo e o equipamento ( $\Phi_1$ ), onde o equipamento se encontra à sua profundidade de equilíbrio, e vai-se aproximando do ângulo final no ponto de reboque ao logo do seu comprimento ( $\Phi_0$ ). A tangente do ângulo de equilíbrio entre o cabo e o equipamento é dada pela razão entre a soma do seu peso e da sua força de impulsão pela força de arrasto do equipamento.

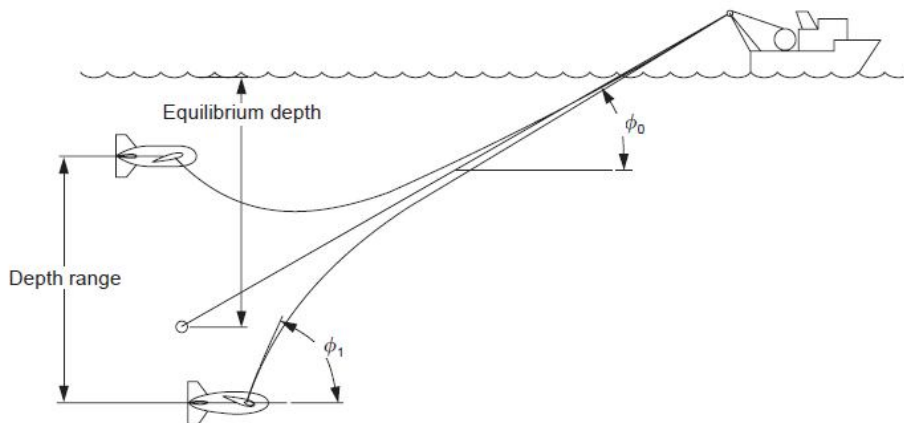


Figura 34 – Variação de profundidade de um sistema rebocado: ângulo de equilíbrio do cabo ( $\phi_0$ ) e ângulo entre o cabo e o veículo ( $\phi_1$ ). Retirado de Helmond [2001].

O conhecimento do comportamento de reboque de um equipamento ajuda no cálculo do valor de *layback*. No entanto o mais difícil de prever, e que afeta o comportamento do sistema de reboque, é o efeito da ondulação, correntes, etc. que se propaga ao longo do cabo de reboque até ao equipamento. O movimento normal ao cabo é logo atenuado, no entanto, o movimento tangencial do cabo é ligeiramente atenuado e a amplitude desta perturbação no veículo é aproximadamente a mesma sentida pela embarcação. Esta perturbação causa uma variação do ângulo de mergulho e da profundidade do equipamento que poderá influenciar o sinal que está a ser adquirido como se abordou no capítulo III. Um dos possíveis métodos a aplicar para minimizar a influência do movimento da embarcação, abordado no capítulo II, é a utilização de um depressor a vante do veículo, desacoplado, de modo a que a influência do movimento seja amortizada e o equipamento siga a ré deste. Neste caso, o cabo de ligação entre o depressor e o equipamento estará praticamente na horizontal (Helmond, 2001).

Obtendo o valor de *layback*, por qualquer um dos métodos mencionados anteriormente ou outro, resta saber como aplica-lo à posição de GPS para se obter a posição do magnetómetro e consequentemente, dos dados adquiridos. Para se aplicar o valor de *layback* é necessário definir o rumo do magnetómetro. Existem essencialmente duas possibilidades: considerar o rumo do magnetómetro como sendo o rumo da embarcação de reboque ou calcular o rumo do magnetómetro em relação à embarcação.

Ao assumir que o magnetómetro segue em linha reta atrás da embarcação, e considerando o que foi descrito até aqui, sabe-se que este pressuposto irá levar à introdução de um erro, a amplificação do movimento real do magnetómetro. A segunda hipótese apresentada é a

que melhor representa o movimento do magnetómetro, como sendo uma suavização do movimento da embarcação como se verá na discussão.

Geometrics Inc. sugere a aplicação do método apresentado na figura 35.

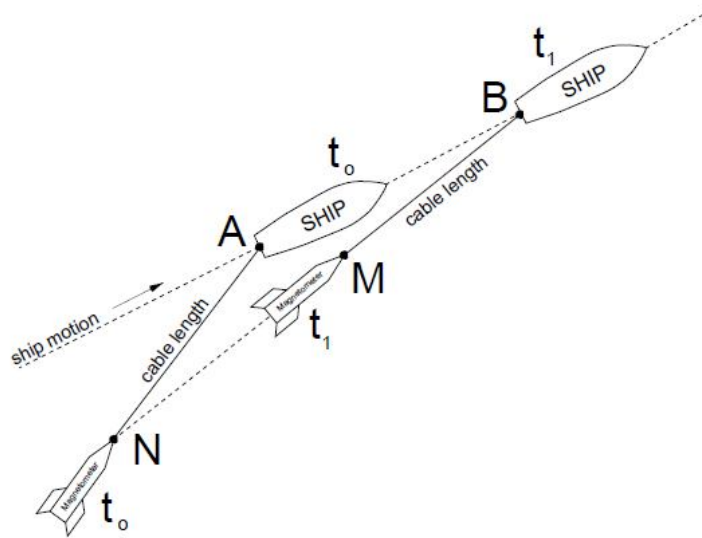


Figura 35 – Aplicação do valor de *layback*. Retirado de Geometrics Inc.

Considerando a posição conhecida da embarcação, A, e a posição do magnetómetro, N, no instante  $t_0$ , também ela conhecida, pretende-se saber a posição do magnetómetro em M, no instante  $t_1$ . No instante  $t_1$  a embarcação navio encontra-se na posição B, que é conhecida, para determinar a posição M do magnetómetro, traça-se uma linha reta entre as posições B e N e aplica-se o comprimento de cabo sobre esta mesma reta. Este método é defendido pela Geometrics Inc. como sendo aplicável a todas as situações exceto quando não existem curvas bastante acentuadas, ou seja, em que a distância entre as posições B e M não seja superior que a distâncias entre as posições B e N.

#### **V.4. Discussão**

Considerando um sistema rebocável, um posicionamento por satélite, um comprimento de cabo fixo e conhecendo-se as distâncias entre o ponto de referência à antena de GPS e a profundidade do magnetómetro, o primeiro passo para se conhecer a posição do magnetómetro, é determinar a distância deste último à antena de GPS, ou seja, o valor de *layback*. O segundo passo será determinar como aplicar o valor de *layback* às posições obtidas pela antena de GPS.

Para alguns valores de comprimento de cabo e valores de profundidade do magnetómetro calculou-se o valor de *layback* através de três métodos: teorema de Pitágoras, teorema de Pitágoras com a aplicação de um fator de catenária e pela análise simplificada das forças de resistência aplicadas no magnetómetro e cabo de reboque. Os dois primeiros métodos foram apresentados anteriormente, o último método tem por base os exemplos de cálculo apresentados por Hansen [1985], Helmond [2001] e por Trahan et al. [1993] assumindo alguns pressupostos. Este método tem por princípio a análise simplificada das forças, normais e tangenciais, existentes desde o magnetómetro até ao ponto de reboque.

Estas forças analisadas de 1 em 1 metro, permitem calcular o ângulo incidente do cabo e conseqüentemente calcular a respetiva distância horizontal e vertical. Somando estas distâncias obtém-se a distância total, horizontal e vertical, do magnetómetro à embarcação. Partindo de algumas condições com o comprimento de cabo na água, ângulo de incidência da velocidade no cabo, velocidade inicial e a profundidade a que se encontra o magnetómetro, é possível calcular a velocidade que melhor se ajusta a estas condições. Conseqüentemente é possível calcular o ângulo de incidência do cabo e as distâncias, horizontal e vertical, do cabo.

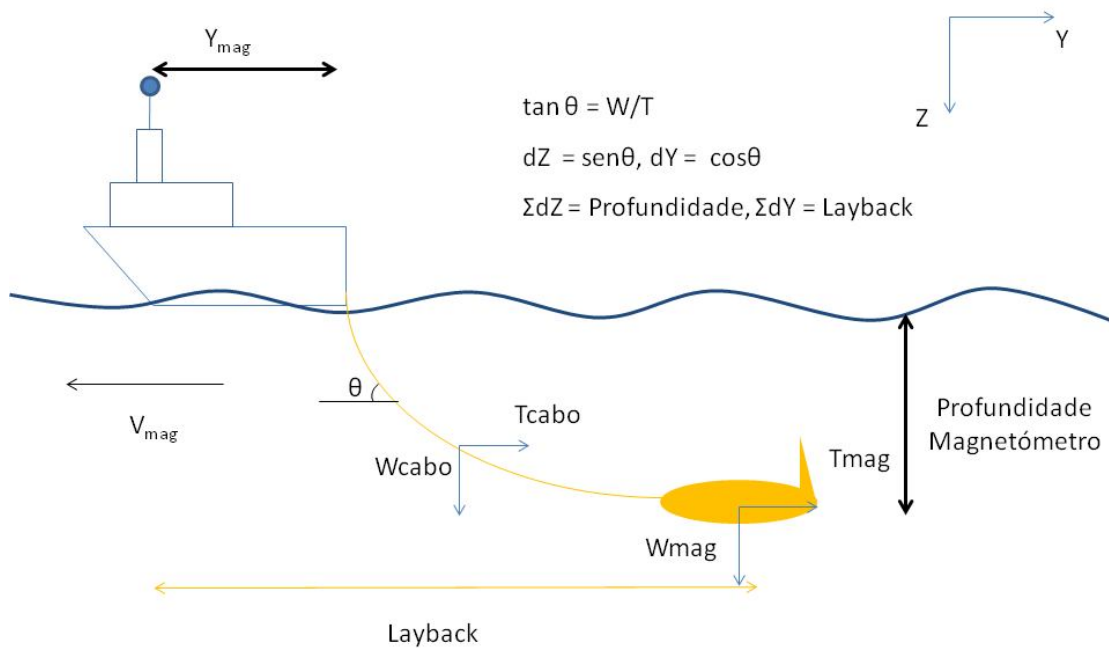


Figura 36 – Cálculo do valor de *layback* a partir das forças de peso ( $W$ ) e forças de arrasto ( $T$ ).

De seguida são apresentados os resultados de cálculo do valor de *layback*, para diferentes valores de cabo e de profundidades do magnetómetro, de acordo com os três métodos apresentados, considerando uma velocidade inicial de 5 nós: Os parâmetros físicos do magnetómetro e do cabo considerados foram os do sistema utilizado nos ensaios, fornecidos pelos fabricantes. Para o cálculo do peso do magnetómetro e do cabo foram considerados os valores das suas massas dentro de água. Desta forma não foi necessário entrar em conta com as suas forças de impulsão. A rotina desenvolvida para este cálculo encontra-se no Apêndice B (rotina B.7).

Legenda:

—◆— Teorema Pitágoras    —■— T. Pitágoras e Fator Catenária 0.81    —×— Forças de Arrasto

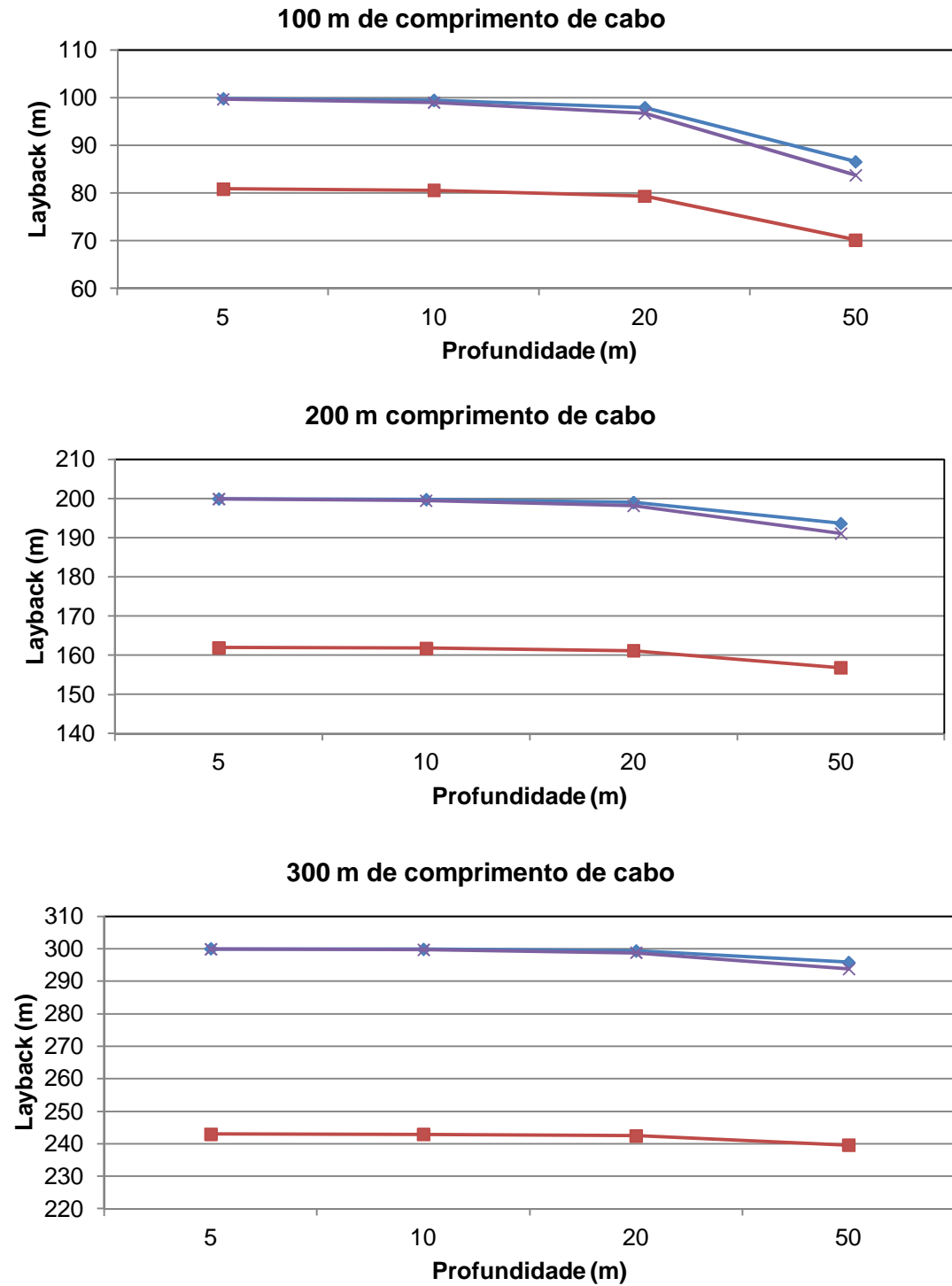


Figura 37 – Gráficos de comparação do cálculo do valor de *layback* a partir dos três métodos apresentados, para diferentes comprimentos de cabo e diferentes profundidades.

Como se pode verificar o método de aplicação do teorema de Pitágoras com um fator de catenária é o que mais difere dos outros dois métodos. Entre a aplicação do teorema de Pitágoras e o método de forças de arrasto, a diferença é mínima. Até aos 20 metros de profundidade os dois modelos apresentam uma diferença máxima de 1.2 m para um comprimento de cabo de 100 m e uma profundidade de 20 m. Este valor é ligeiramente superior ao dobro do erro de precisão do sistema DGPS utilizado nos ensaios. Quanto maior a profundidade maior a diferença entre os valores de *layback* calculados, chegando a uma diferença de 2.8 m para um comprimento de cabo de 100 m e a uma profundidade de 50 m. No entanto, o cálculo do valor de *layback* pelo método das forças entra em conta com um conjunto de condicionantes que variando poderá levar a diferenças maiores entre os dois métodos.

Considerando uma profundidade de 50 m e um comprimento de cabo de 100 m calculou-se, segundo o método das forças de arrasto, o valor de *layback* para cinco cabos com o mesmo diâmetro, 0.01 m, mas com diferentes pesos (peso de um m de cabo) (figura 38).

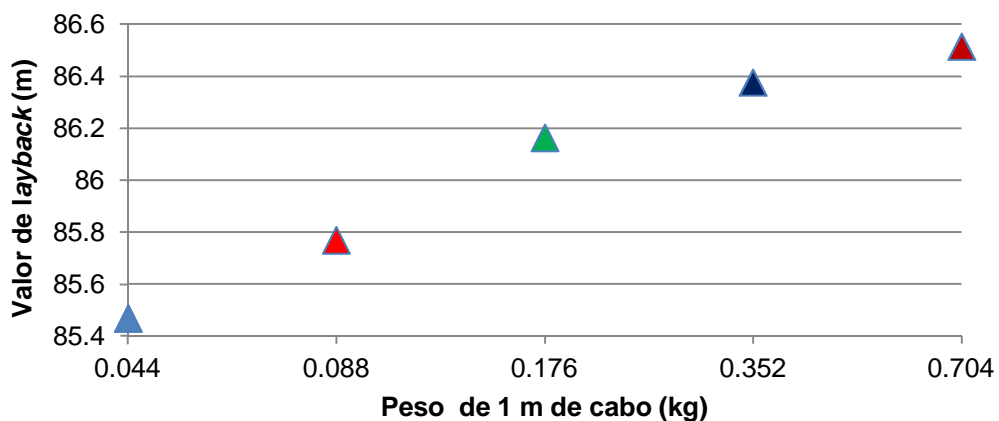


Figura 38 – Valor de *layback* calculado através do método das forças para um equipamento rebocado, a 50 m de profundidade e com 100 m de comprimento de cabo, para cinco cabos com o mesmo diâmetro, 0.01 m, mas com diferentes pesos.

Sabendo que o valor de *layback* calculado pelo teorema de Pitágoras é de 86.6 m verifica-se que o aumento do peso do cabo faz com que o magnetómetro afunde mais e o cabo de reboque se aproxime mais de uma reta, diminuindo o seu valor de catenária. Conclui-se deste modo que a forma do cálculo do valor de *layback* poderá ser adaptada a cada situação e características físicas do sistema utilizado.

Após o cálculo de valor de *layback* ter-se-á de definir de que forma se poderá aplicá-lo. Como referido anteriormente existem dois métodos principais: considerando que o rumo da

embarcação é o mesmo do magnetómetro ou tentar calcular o rumo do magnetómetro em relação à embarcação. O primeiro método parte da aplicação direta do valor de *layback* à posição do ponto de reboque no rumo a que se encontra a embarcação, por deslocamento, e o segundo método tenta definir o rumo do magnetómetro em relação à embarcação e aplicar o valor de *layback* com esse rumo, por arraste. Considerando que a antena de receção se encontra no ponto de reboque, não existindo assim *offsets* a considerar, aplicaram-se os dois métodos a uma fiada de um dos ensaios realizados e obteve-se o resultado apresentado na figura 39. Na aplicação do método de cálculo de *layback* por deslocamento foi considerado o rumo médio da embarcação durante a fiada.

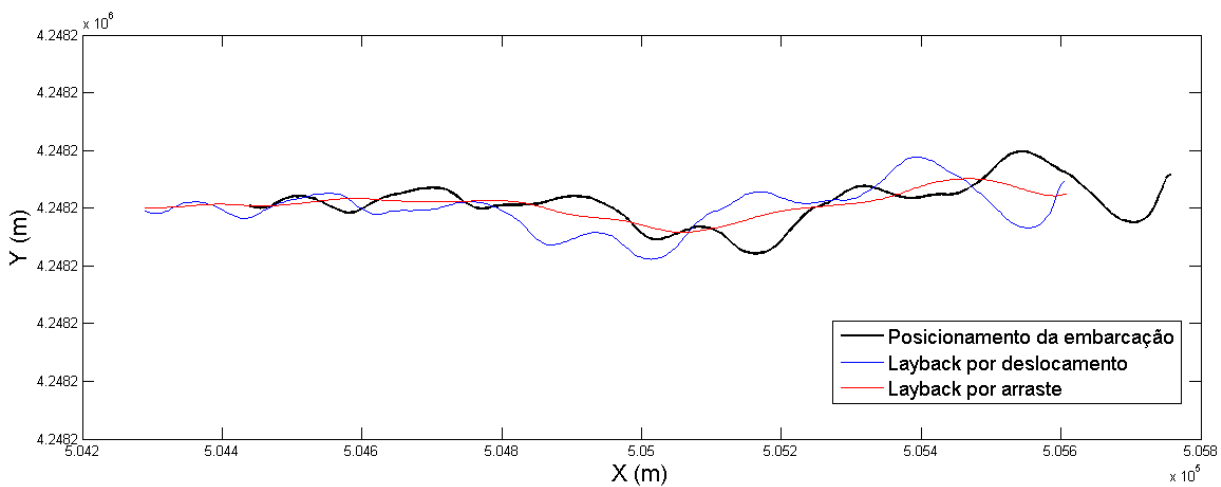


Figura 39 – Representação do posicionamento da embarcação e do resultado de posicionamento do magnetómetro por dois métodos, deslocamento e arraste.

Embora o comportamento da embarcação se faça sentir no magnetómetro sabe-se que este irá dar origem a um movimento de menor amplitude no magnetómetro. A aplicação do valor de *layback*, calculado de acordo com o método por arraste parece representar melhor o comportamento real do magnetómetro ao ser rebocado. No entanto, estes métodos não consideram possíveis correntes laterais que possam existir, situação bastante provável em ambientes portuários e estuarinos. Nestes ambientes as correntes de maré podem criar uma maior instabilidade no reboque do magnetómetro, logo, um maior desvio lateral deste mesmo ao rumo calculado por base de um comportamento influenciado somente pelo movimento da plataforma de reboque. Porém, num ambiente portuário ou estuarino, normalmente com um canal de pequenas dimensões, o levantamento é normalmente realizado na direção da corrente de maré. Desta forma o desvio lateral não é considerado.

Para verificar a precisão destes métodos, terão de ser realizados mais ensaios com diferentes cabos e em diferentes ambientes.

## Capítulo VI – Medição do campo externo

O CE, como referido no capítulo II, resulta de uma interação dinâmica entre o campo magnético da Terra e do Sol. Desta interação resultam variações temporais, periódicas e não periódicas, do CMT. Estas variações surgem nos registos de CM, respetivamente como variações de alta e baixa frequência. Para a análise dos valores de campo total medidos, com o objetivo de deteção de objetos, a variação do CE tem de ser corrigida. No entanto, existem algumas formas de fazer o seu registo e a sua correção.

Neste capítulo apresenta-se uma descrição do que é o CE e as suas principais componentes, demonstram-se as principais formas do seu registo, da sua correção e principais condicionantes. No fim faz-se uma breve discussão sobre a melhor forma de realizar a correção do CE e principais considerações a ter em conta.

### VI.1 O CE

O CE resulta da complexa interação entre os campos magnéticos solar e terrestre e de processos físicos que ocorrem na parte superior da atmosfera [Regan e Rodriguez, 1981]. A interação entre o vento solar, que é um plasma completamente ionizado composto essencialmente por eletrões e prótons, e o CMT, gera correntes que se irão fazer sentir no registo do CM como sendo variações temporais, periódicas ou não periódicas.

As variações periódicas, ou também designadas por calmas, são variações previsíveis e estáveis. A variação diurna é uma variação periódica, com uma amplitude na ordem das dezenas de nT, que resulta da ionização da alta atmosfera pela radiação solar e pelas forças gravitacionais do Sol e da Lua que forçam as correntes da ionosfera num movimento de maré. A componente associada à força solar é denominada por Sq (*Solar Quiet*) e depende do ciclo do Sol, a componente lunar, denominada por L (*Lunar*), depende do ciclo da Lua, sendo no entanto difícil de separar a contribuição de cada uma. A intensidade da variação diurna é máxima durante o dia e mínima durante a noite e a sua amplitude varia consoante a latitude (figura 40), devido à variação da condutividade da atmosfera e à própria variação do CP [Regan e Rodriguez, 1981].

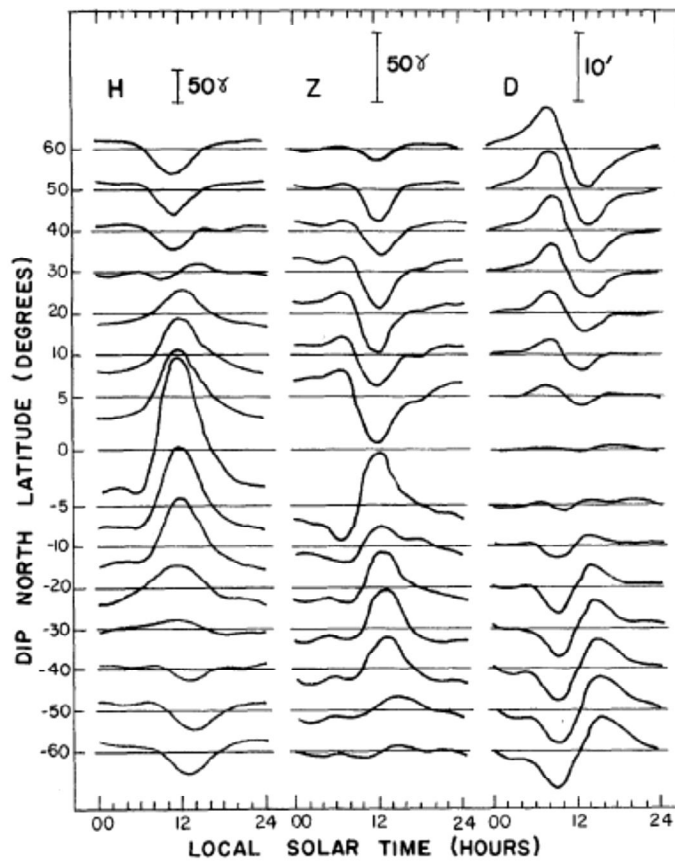


Figura 40 – Variação da componente  $Sq$  ao longo de várias latitudes para a componente vertical, horizontal e para a declinação do CMT, retirado de Regan e Rodriguez, [1981].

Este tipo de variações previsíveis do CE, variações diurnas, apresentam-se com uma variação de baixa frequência. No entanto, existem outro tipo de variações não previsíveis, ou não periódicas, de alta frequência. Estas variações resultam da interação direta entre a energia solar e as linhas de força do campo magnético terrestre, a magnetosfera. Exemplos deste tipo de variações são as tempestades magnéticas e as micropulsações [Regan e Rodriguez, 1981].

A amplitude de uma tempestade magnética poderá atingir centenas de nT e durar dias. Iniciam-se com uma elevação brusca da intensidade do campo seguida, alguns minutos depois, por uma descida igualmente abrupta e por fim por uma fase de recuperação que pode durar alguns dias e que apresenta algumas oscilações no entanto, de menor amplitude [Miranda et al., 2010], (figura 41).

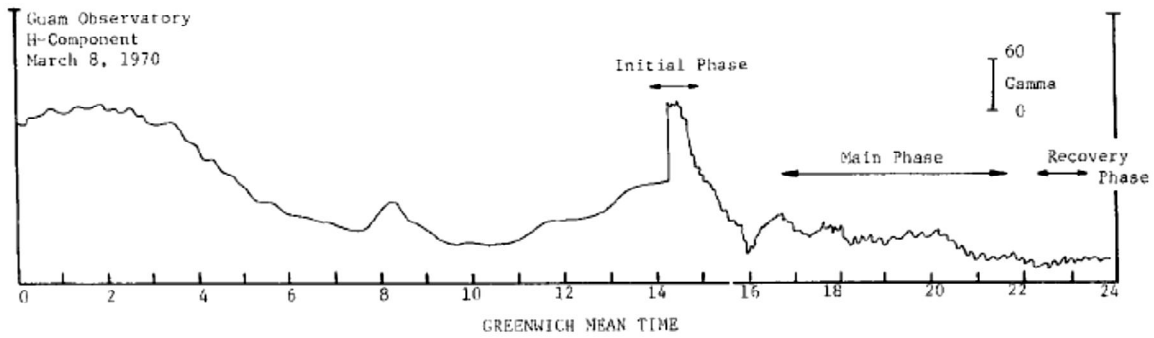


Figura 41 – Registo de uma tempestade magnética pelo observatório geomagnético de Guam, ilha situada no Oceano Pacífico. Retirado de Regan e Rodriguez, [1981].

As micropulsações são flutuações de curto período, na ordem de segundos a dezenas de minutos e de amplitude até algumas centenas de nT. A IAGA, em 1958, definiu dois tipos de micropulsações de acordo com a sua morfologia: regulares ou contínuas, Pc, e irregulares, Pi. Dentro de cada tipo de micropulsação, são classificadas de acordo com o seu período ou a sua frequência [Zanandrea, 1998], (figura 42).

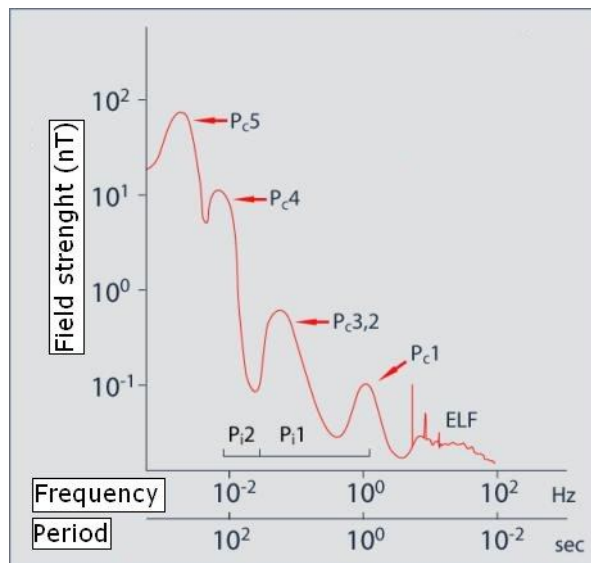


Figura 42 – Espectro de amplitude de pulsações geomagnéticas em relação à sua frequência. Retirado de [http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/22/magnetic\\_pulsations](http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/22/magnetic_pulsations).

Na impossibilidade de modelação destes tipos de variação, existe um índice de atividade magnética, Kp, que permite avaliar possíveis distúrbios do CMT e mesmo antever uma tempestade magnética. Este índice é calculado por uma média de registos de vários observatórios magnéticos do mundo, de 3 em 3 horas, e variam entre 0 e 9, onde  $K_p < 3$  é considerado uma atividade baixa [Regan e Rodriguez, 1981; Miranda, 2009]. A informação deste índice permite decidir qual a melhor altura para a realização de um levantamento

magnético. Existem redes de monitorização da atividade solar que permitem, como que uma previsão meteorológica, escolher dias de baixa atividade solar para que a probabilidade de registo de variações não periódicas seja baixa. Esta consulta permite decidir a melhor altura para a realização do levantamento.

Exemplos destes boletins *online* são o Space Weather Alerts ([http://geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/space\\_weather/alerts.html](http://geomag.bgs.ac.uk/data_service/space_weather/alerts.html)) da British Geological Survey e o projeto TESIS ([http://www.thesis.lebedev.ru/en/about\\_thesis.html](http://www.thesis.lebedev.ru/en/about_thesis.html)) do Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science.

## **VI.2 Correção e registo da variação do CE**

Para a devida correção dos registos do valor do CM, para o objetivo de deteção de objetos, a correção da variação do CE, que é um variação temporal, é necessária para que os dados, adquiridos pelo magnetómetro em movimento, sejam interpretados com referência ao mesmo instante.

Como foi abordado no capítulo II e III esta correção é necessária quando se trata de uma configuração de um só sensor ou no caso de ser mais do que um sensor, querer-se avaliar o registo de campo total individualmente e não o seu gradiente.

Na análise de valor de campo total, a correção do CE pode ser realizada de várias formas: retirando o valor obtido a partir do registo de um magnetómetro montado numa estação fixa; realizar fiadas de confirmação retirando o valor da diferença entre os dois registos na interseção das mesmas; fazer o registo do mesmo ponto, tempos a tempos, para registar a variação e subtrair esta mesma, este método é muito comum em levantamentos magnéticos em terra [Kearey et al. 2002]; ou ainda optar por realizar o levantamento no período noturno considerando que a variação do CE é mínima e não é necessário ser filtrada.

Considerando o registo da variação do CE realizado por um magnetómetro colocado num local fixo, em terra ou no mar como foi apresentado no capítulo II e III, há que considerar as condições do local e a proximidade à área de levantamento. A estação de monitorização terá de ser montada, preferencialmente, num local afastado de possíveis fontes de ruído. No caso de ser colocada em terra deve ser afastada de cabos de alta tensão, edifícios, trânsito local, etc., no caso de ser colocada no mar, deve ser afastada do tráfego marítimo e de zonas de elevada agitação marítima, no entanto em ambas as situações deve ser colocada numa zona próxima à área de levantamento.

A proximidade à área de levantamento deve-se ao facto do CE apresentar uma variação em fase e em amplitude variável com a longitude e latitude do local. Existem vários estudos desta variação, no entanto, a distância máxima de colocação de uma estação de referência não se encontra bem definida, sendo assumida como sendo de poucas dezenas a uma centena de km [Marine Magnetics Corp., 2002; Kearey et al., 2002]. Para estudar a variação do registo em função da distância, realizou-se uma comparação dos registos de variação do CE do observatório magnético do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra (IGUC) e em três observatórios, mais próximos de Portugal Continental, pertencentes a uma rede global de observatórios magnéticos, International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET) que monitorizam o CMT, cujas localizações se encontram na figura 43.

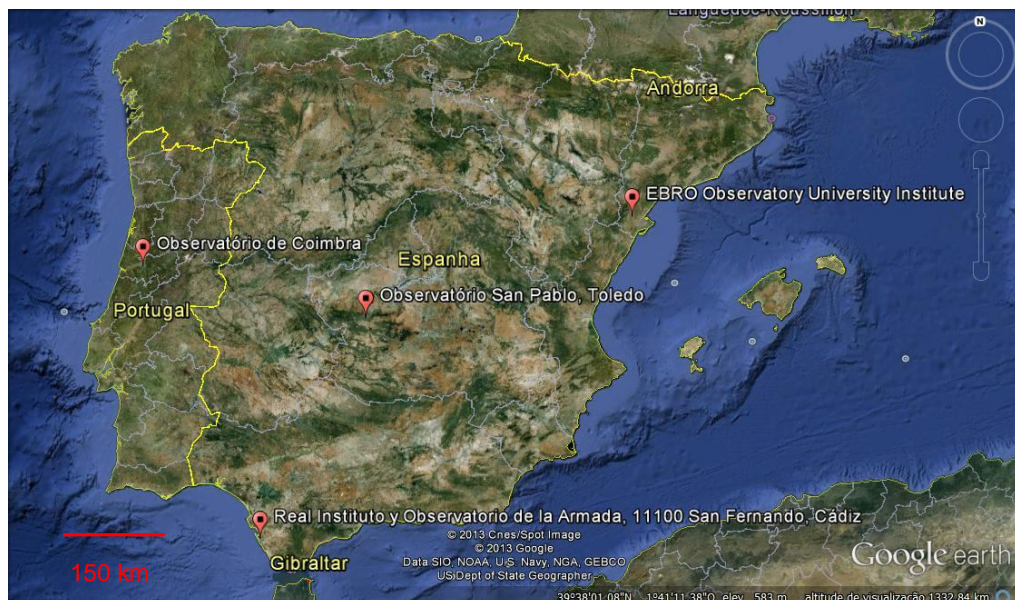


Figura 43 – Localização do Observatório de Coimbra e dos três observatórios magnéticos mais próximos de Portugal continental. Imagem editada e retirada do Google Earth, Google Inc..

A figura 44 apresenta a comparação dos registos dos quatro observatórios num ciclo de 24 horas, num dia de baixo índice de atividade solar.

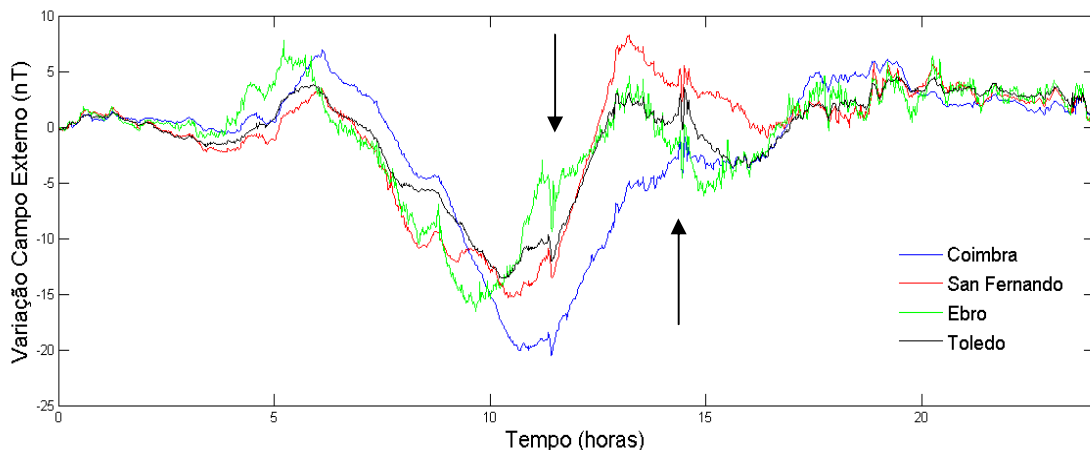


Figura 44 – Variação do CE em 24h dos observatórios de Coimbra, em Portugal, e de San Fernando, Ebro e Toledo em Espanha. As setas indicam episódios de variações não periódicas, micropulsações, registados nos quatro observatórios.

Desta comparação verifica-se que existe uma variação em amplitude e em fase da variação do CE de menor frequência, a variação devida a Sq e a L, sendo que o pico desta variação é atingido primeiro pelo observatório que se encontra mais a Este, Ebro em Espanha. Também é visível que a maioria das variações não periódicas, variações de maior frequência e na ordem das dezenas de minutos de comprimento de onda, são registadas nos quatro observatórios variando ligeiramente em amplitude, mas não variam em fase.

Na figura 45 encontra-se o registo de um magnetómetro montado na Nazaré, num local próximo da área de um levantamento magnético a uma taxa de amostragem de 1 seg, e o registo do mesmo dia e no mesmo período, obtida pela estação do observatório de Coimbra, a uma taxa de amostragem de 1 min.

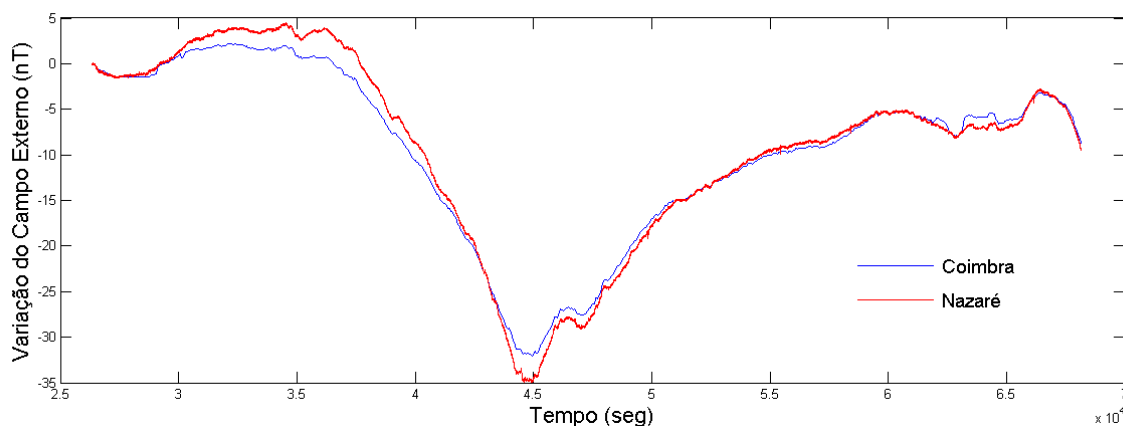


Figura 45 - Variação do CE da estação do observatório de Coimbra e de uma estação colocada na Nazaré para a correção de um levantamento.

Pode-se verificar que os registos se encontram em fase, no entanto, diferem ligeiramente em amplitude a um máximo de cerca de 4 nT. As duas estações estão distanciadas entre si cerca de 80 km, 1° em latitude e 0.5° em longitude.

O registo das variações não periódicas, de alta frequência e baixo comprimento de onda, na ordem dos ms, dependerá da taxa máxima de amostragem do magnetómetro que regista a variação do CE. Sendo que este registo será utilizado para realizar a correção dos dados adquiridos no mar, a taxa máxima de amostragem do magnetómetro que está a fazer a aquisição no mar também irá definir que tipo de variações serão amostradas.

### **VI.3 Discussão**

A correção da variação do CE é importante no processamento de registos dos valores de campo total do CM para a deteção de objetos como já foi referido. As variações periódicas, ou previsíveis, do CE, nomeadamente as variações diurnas, apresentam-se como uma variação de baixa frequência e são mais facilmente corrigidas no registo do CM. Esta correção para levantamentos no mar é normalmente feita através da correção do registo obtido por um magnetómetro montado numa estação fixa. A realização de fiadas de confirmação ou a passagem de tempo a tempo no mesmo ponto para ir registando a variação do CE são métodos logisticamente mais demorados no mar.

O local de colocação de um magnetómetro para registo da variação do CE terá ser longe de possíveis interferências de outros campos eletromagnéticos de fontes antropogénicas. Numa montagem da estação no mar as possíveis fontes de ruído, derivadas do movimento de massas de água, são muito mais difíceis de controlar do que em terra. A distância entre o local de colocação da estação e do local de levantamento tem ser considerada para que a variação do CE tenha um desfasamento aceitável em amplitude e fase.

Da comparação entre os quatro observatórios mais próximos das possíveis áreas de levantamento na costa de Portugal Continental, verifica-se uma variação quer em fase quer em amplitude do CE, registado no mesmo dia. No entanto, entre duas estações mais próximas, distanciadas cerca de 80 km, verifica-se somente uma variação de amplitude na ordem dos 4 nT. A correção do CE com os registos da estação mais distante da área de levantamento levaria à aplicação de um declive inexistente nos dados processados, no entanto, esta variação de baixa amplitude e baixa frequência dificilmente se iria confundir com a anomalia proveniente de um objeto.

No que diz respeito às variações não periódicas devido à sua alta frequência, baixo período e amplitude, podem muitas vezes levar a erros na deteção de um possível objeto. No que diz respeito a tempestades magnéticas, alturas em que o índice de atividade solar se encontra mais elevado, a sua monitorização poderá levar a que o técnico possa optar por realizar o levantamento numa altura de baixo índice Kp (figura 46).

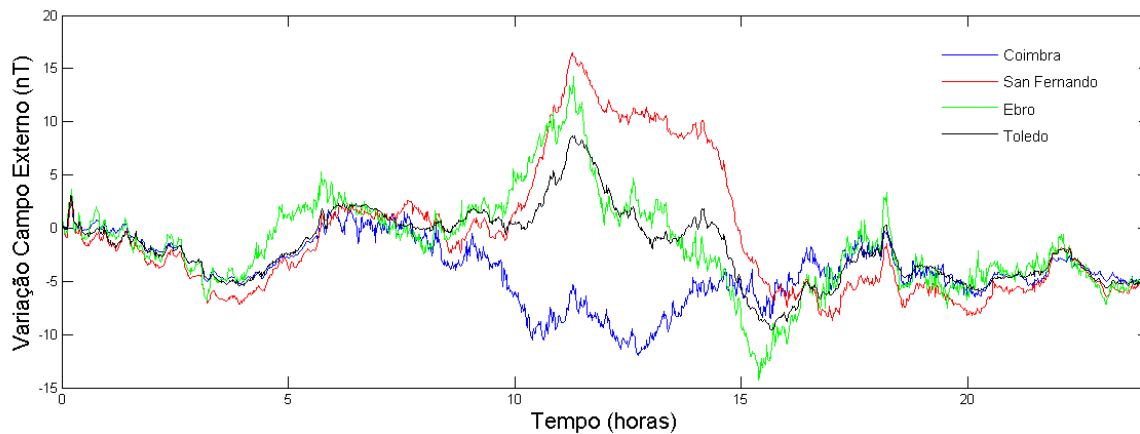


Figura 46 – Exemplo de registo da variação do CE em 4 observatórios, num dia de elevada atividade solar ( $K_p > 3$ ).

No entanto, mesmo em dias de baixa atividade solar, poderá haver um registo de micropulsações cujo sinal poder-se-á sobrepor ao sinal de uma anomalia magnética proveniente de um objeto. Neste caso o registo diário do CMT numa estação fixa, de modo a obter a variação do CE, é importante para a posterior correção dos dados do levantamento.

As micropulsações embora sejam distintas pela sua alta frequência (curto comprimento de onda), variam entre um período de minutos a microsegundos. As pulsações com um período na ordem de segundos poderão não ser registadas em simultâneo numa estação de referência e na aquisição em movimento no mar. Porém se este registo ocorrer, e embora o seu sinal tenha uma forma distinta de um objeto como que um impulso súbito, é possível que este possa ser confundido com o sinal proveniente de uma anomalia de um objeto.

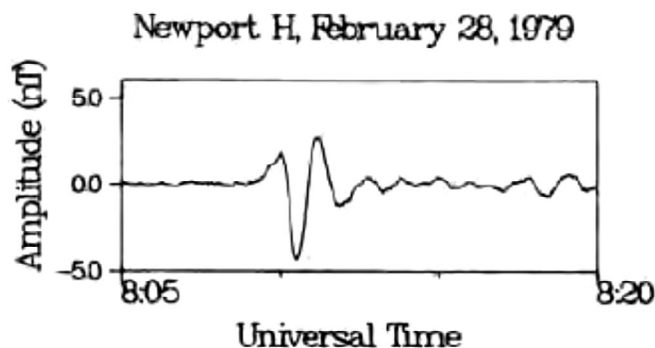


Figura 46 – Micropulsção do tipo Pi2, impulsiva, registada numa estação, com uma amplitude máxima de cerca de 6 nT. Retirado de Samson, [1991].

As micropulsções do tipo Pi, como o exemplo da figura 46, são o tipo de pulsações que podem ser confundidas com o sinal de anomalia de um objeto devido ao seu período e amplitude baixas. Nestas situações e em caso de dúvida, não haverá outra solução senão repetir o levantamento no mesmo local suspeito e confirmar a existência ou não de uma anomalia originada por um objeto.

A taxa de amostragem dos magnetómetros que estão a ser utilizados é determinante para definir que tipo de micropulsções podem ser registadas. No exemplo prático da estação de referência Sentinel a sua taxa máxima de amostragem é de 0.5 Hz, o que leva a que só seja possível amostrar eventos com uma frequência de pelo 1 Hz e nunca superior (frequência de Nyquist). De acordo com a figura 42, só seria possível registar todas as micropulsções exceto parte das do tipo Pi1 e Pc1. Porém, estas últimas possuem uma amplitude que é inferior à resolução operacional determinada para o magnetómetro SeaSpy no capítulo III, de 3 nT.



## Capítulo VII – Conclusões e trabalhos futuros

O CM medido num determinado local resulta da soma do valor do CMT com o valor da CA. O CMT resulta da sobreposição de três campos magnéticos: CP, com origem no núcleo externo; CC, resultante da soma das propriedades magnéticas de todo o material geológico existente na crosta terrestre; e o CE, que tem a sua origem na interação dinâmica entre os campos magnéticos da Terra e do Sol. A CA é definida por todos os objetos de origem humana com propriedades magnéticas, existentes na superfície terrestre e/ou enterrados a poucos metros de profundidade.

A medição do fluxo magnético de um CM é feita por um sensor denominado por magnetómetro. Para a medição do CM no mar, para a deteção de objetos, e de acordo com os meios e a disponibilidade financeira, existem várias configurações pelas quais se podem optar em relação: ao tipo de sensor, ao número de sensores, à utilização de sensores auxiliares, à sua colocação num veículo rebocado ou num veículo autónomo, ao tipo de posicionamento utilizado, entre outros.

No que diz respeito ao tipo de sensor, os magnetómetros de precessão protónica de efeito *Overhauser* e os de excitação ótica são os sensores mais utilizados para este tipo de levantamentos. Os primeiros apresentam uma melhor razão entre custo e qualidade. São sensores omnidirecionais ou isotrópicos, e que não possuem zonas mortas, e são fabricados há muito tempo e utilizados para a deteção de objetos. No entanto, uma taxa de amostragem maior seria fundamental, esta necessidade é melhor respondida pelos magnetómetros de excitação ótica, no entanto, estes sensores, devido ao seu princípio físico de medição, possuem zonas mortas e erros de rumo que podem levar a um valor medido não credível, além de que são sensores mais dispendiosos. Também existem os sensores do tipo *fluxgate*, mas não são adequados para situações de elevada oscilação, como é o caso de reboque no mar, pois a direção do campo que estaria a ser medida seria muito difícil de determinar, para além da sua baixa sensibilidade e baixa resolução.

Num magnetómetro marinho os sensores são montados em estruturas cilíndricas, estanques e de material não magnético, normalmente PVC, podendo ser utilizado juntamente com outros tipos de sensores auxiliares como sensores de pressão e de altitude, ou ele próprio ser um sensor auxiliar montado num veículo remotamente operado ou autónomo, juntamente a outros sensores, como multifeixe, sonar, camaras, etc. Esta ultima configuração torna-se uma boa ferramenta para a deteção de objetos, visto ser possível colocar vários sensores que possibilitam a deteção do objeto e, se este se encontrar junto ao fundo, utilizar camaras que permitam identificá-lo de imediato.

Para a realização de medições do CM no mar, o sensor é geralmente rebocado através de um cabo eletromecânico, devido à possível influência da embarcação. No entanto, este reboque pode ser realizado segundo várias configurações. A primeira opção entende-se pela escolha de um ou mais sensores. Para a detecção de pequenos objetos a escolha de mais do que um sensor, normalmente dois, é mais usual. As medições realizadas por um sistema em gradiómetro, dois sensores, são obtidas em simultâneo e entre distâncias inferiores ao comprimento de onda de muitos dos fenómenos que contribuem para a variação do CE e do CC, cujas componentes de curto comprimento de onda pequeno podem-se sobrepor a sinais com as mesmas características, mas provenientes de objetos. O valor do gradiente pode ser usado quantitativamente por si só mas poderá também ser utilizado para a determinação da direção do seu vetor, para determinar a profundidade, momento magnético e mesmo a forma do objeto [Breiner, 1999]. A utilização de um sistema em gradiómetro permite obter uma resolução espacial superior, porém condicionando um espaçamento mais reduzido entre fiadas, aumentando o tempo de execução do levantamento. A utilização de uma estrutura mais complexa com dois ou mais magnetómetros, trará um maior perigo durante o seu reboque, pois poderá ficar preso em redes de pesca ou em qualquer objeto junto ao fundo ou mesmo na coluna de água. Numa configuração de um só sensor é necessário o registo da variação do CE, normalmente obtido por uma estação de referência montada num local mais próximo possível da área de levantamento.

A proximidade ao fundo do magnetómetro é importante para a detecção de objetos e para isso é necessário por vezes aumentar o seu peso. A primeira solução é a utilização de um cabo eletromecânico em aço, cujo peso irá fazer com que o magnetómetro afunde mais. Porém, existem algumas hipóteses como a carenagem do cabo, colocação de pesos (depressores ou lastros) no próprio magnetómetro ou a vante deste mesmo, ou ainda o ponte de reboque do equipamento (nariz ou pelo centro de gravidade), que podem juntamente contribuir para um aumento de profundidade do magnetómetro. Embora todas estas soluções ajudem na redução do comprimento de cabo na água, e consequentemente o magnetómetro seja rebocado mais junto ao fundo, reduz drasticamente a resposta aquando da recolha do magnetómetro por qualquer situação de emergência, como por exemplo, a necessidade de diminuir a sua profundidade numa zona de redes de pesca. Estes riscos têm de ser tidos em conta e podem ser minimizados conhecendo as condições da área de interesse, nomeadamente a sua batimetria, existência de tráfego marítimo e de atividade pesqueira, antes de ser realizado o levantamento.

No que diz respeito aos sistemas de posicionamento, a solução ideal é a combinação de um sistema de posicionamento global por satélite com correção diferencial, para o posicionamento da plataforma de reboque, com sensores de atitude, para determinação da inclinação e proa da plataforma, com um sistema de posicionamento acústico, que posiciona o magnetómetro relativamente à plataforma de reboque. No entanto, a logística e os custos de utilização de sistemas de posicionamento acústico e de sensores de atitude impedem muitas vezes a sua utilização, pelo que a posição é obtida com recurso ao posicionamento por satélite da plataforma (preferencialmente com correção diferencial para um melhor rigor), ao conhecimento do comprimento de cabo de reboque e à informação de outros sensores, como o sensor de pressão, que regista a profundidade a que está o sensor. De forma a reduzir o erro de cálculo da posição, ter-se-á de ter em consideração o local de colocação da antena de GPS, de modo a que não se encontre numa zona de sombra (reduzindo a receção da informação da correção e consequentemente reduzir o seu rigor) e que as distâncias desta ao ponto de reboque sejam bem conhecidas.

Na definição de um planeamento para deteção de objetos primeiro ter-se-á de definir qual o objeto a detetar e determinar as suas principais características físicas de modo a que se consiga estimar a sua massa e a sua suscetibilidade magnética. Conhecendo estas características e assumindo que o objeto só possui uma magnetização induzida, embora sobrestimando a magnetização total do objeto, é possível estimar uma distância ao objeto e a amplitude da sua anomalia magnética.

A segunda etapa para a definição de um planeamento, será a definição do valor da anomalia mínima que o magnetómetro poderá detetar. Este valor dependerá não só da resolução do magnetómetro, valor este que deve incluir o valor do seu ruído eletrónico, mas também do ruído proveniente de vários condicionantes, cuja amplitude e período se aproximam do registo do objeto a detetar, podendo impedir a sua deteção. Exemplos destes condicionantes são: a variação dos campos que compõem o CMT, a variação da altitude, a influência magnética da embarcação, a influência magnética ambiente, que é devida a deslocamentos de massas de água e influência magnética ambiente de fontes antropogénicas, que não as de interesse.

Assumindo um fundo plano, que as componentes do CMT e a influência magnética da embarcação são possíveis de serem corrigidas, resta a influência magnética ambiente. Esta influência pode ser devida à proximidade a terra, a pontes, a estradas ou a proximidade a uma zona de elevado tráfego marítimo, ou ainda devido ao ruído proveniente do deslocamento de massas de água. Sendo que a água é constituída por iões o seu deslocamento, provocado quer pela agitação marítima, quer, no caso em estudo, pelo

movimento do magnetômetro na coluna de água ou da embarcação que o reboca, leva à geração de correntes elétricas e conseqüentemente a um campo magnético. Este campo criado introduz ruído no sinal medido. A magnitude deste ruído irá variar com as condições de mar e com o próprio reboque do magnetômetro, porém, a definição de um valor mínimo para o ruído das massas de água e de outras fontes de ruído, se existirem, é importante para calcular o valor da anomalia mínima detetável pelo magnetômetro. Este valor somado à resolução do sensor será nada mais do que a resolução operacional. Assumido este último valor e as características físicas do objeto, é definida a distância mínima a estabelecer do sensor ao objeto através da equação (1), assumindo os pressupostos definidos.

$$B_{objeto} = \frac{B_{CMT} \cdot X_{objeto} \cdot m_{objeto}}{r^3} \quad (1)$$

Sabendo a distância mínima ao sensor e definindo a distância ao fundo desejada é possível através da simples aplicação do teorema de Pitágoras determinar a distância entre fiadas. Por fim, a esta distância deve ser somado o erro associado ao afastamento médio da embarcação à fiada planeada e o erro do sistema de posicionamento utilizado. O afastamento irá variar de acordo com o movimento da embarcação e o erro de precisão do sistema de posicionamento e sensores utilizados para o cálculo da posição. O movimento da embarcação depende essencialmente da relação hidrodinâmica, resultante da interação de ventos, ondulação, correntes, marés, etc., com as características físicas da própria embarcação. Quanto ao tipo de posicionamento e sensores utilizados, estes dependerão da sua precisão.

No que diz respeito à orientação do levantamento, este dependerá essencialmente da forma da área a ser levantada e da morfologia do terreno. Sendo que a distância ao fundo é determinante para a eficácia do levantamento, será importante garantir que esta não varie muito no decorrer de uma fiada. Porém existirá sempre uma variação que pode ser minimizada variando o comprimento de cabo na água ou variando a velocidade de reboque do equipamento durante a execução da fiada. Em qualquer destas duas situações, há uma elevada probabilidade de introdução de um erro no posicionamento, principalmente quando este é calculado através da posição da embarcação.

Por fim para a realização de um planeamento restar definir os últimos dois parâmetros, a taxa de amostragem e a velocidade de modo a garantir que a anomalia de um objeto seja devidamente amostrada. No que diz respeito à taxa de amostragem, definiu-se que quatro amostras seriam o suficiente para reconstituir a amplitude e comprimento de onda do sinal proveniente de um dipolo magnético. No entanto, como o magnetômetro se encontra em movimento o número mínimo de amostras podem não ser os valores necessários à

reconstituição da anomalia. Desta forma deve ser utilizada a taxa máxima de amostragem do sensor e garantir a resolução espacial necessária definindo uma velocidade máxima de levantamento. No que diz respeito à velocidade esta deve ter em conta, para além da resolução espacial determinada, o controlo da embarcação e a eficiência do levantamento.

Conclui-se assim que para a definição de um planeamento ter-se-á de entrar em conta com alguns dos fatores mencionados, no entanto, será quase impossível quantificá-los todos com o mesmo rigor. Dever-se-á ter alguma sensibilidade, baseada na experiência do operador, relativamente ao comportamento do reboque do magnetómetro e da manobrabilidade da embarcação. Um reconhecimento prévio da área, nomeadamente da sua batimetria, e a existência de um *software* que possa em tempo real registar, sob o planeamento traçado, a posição da embarcação ou mesmo do próprio magnetómetro, poderá ajudar a ajustar o planeamento durante o próprio levantamento de forma a garantir que os objetivos inicialmente propostos sejam atingidos.

O reboque do magnetómetro é feito através de uma embarcação cujos materiais de construção, sistemas de propulsão e geradores poderão influenciar a medição do campo. Estes materiais, normalmente de natureza magnética, determinam uma maior ou menor influência consoante a sua magnetização total relativamente ao CMT, a sua distância ao sensor e com o CMT local da área de levantamento [Bullard e Mason, 1961]. A forma mais eficiente de tentar minimizar a influência da embarcação será rebocando o magnetómetro a uma maior distância da embarcação. No entanto, dado que aquela distância será sempre finita e não muito grande, existirá sempre alguma influência que deverá ser quantificada para realizar a devida correção dos registos.

Esta quantificação é obtida pela realização de um levantamento que leva a que a embarcação reboque o magnetómetro a uma determinada distância e segundo diferentes rumos, segundo um planeamento circular ou radial. De acordo com os exemplos na bibliografia dos resultados da quantificação da influência magnética de uma embarcação e os resultados dos ensaios realizados, verifica-se que a melhor quantificação é obtida realizando um planeamento radial. Este planeamento consiste na realização de fiadas com um ângulo entre si, cruzando-se no mesmo ponto médio. Embora este seja um levantamento mais demorado, é o que garante que o magnetómetro siga o mesmo rumo da embarcação, rumo este que fará variar a influência magnética que se pretende medir. O planeamento circular é um levantamento mais rápido, no entanto, para garantir que o rumo do magnetómetro é igual ao da embarcação aquando da sua medição, o diâmetro do planeamento terá de ser da ordem de alguns milhares de metros. Será também necessário manter as mesmas condições de manobra, como aplicar o mesmo grau de leme, de modo a

que a manobra afete o menos possível o reboque do magnetómetro. Esta condição leva a que a área percorrida seja maior, logo a probabilidade de variação do CC nesta mesma também será maior. A escolha do local para a realização de qualquer dos planeamentos propostos, para a quantificar a influência magnética de uma embarcação, é determinante na qualidade dos resultados. Assim sendo, e para garantir que não haja nenhuma interferência do campo local, o levantamento deve ser realizado longe de costa e com uma grande coluna de água, na ordem das centenas de metros, de modo a que, o magnetómetro ao ser rebocado à superfície, não registre a possível variação do CC. Quanto à variação do CE, ficou aqui provado que desde que haja o seu registo numa estação fixa e próxima da área de levantamento, a sua correção é possível.

O posicionamento dos dados resultantes da medição do campo magnético é extremamente importante quando se pretende detetar objetos. As características físicas do cabo e do magnetómetro, a velocidade de reboque do magnetómetro e a influência do movimento da embarcação de reboque são os principais condicionantes na definição da posição do magnetómetro. Considerando um sistema rebocável, um posicionamento global por satélite com correção diferencial, um comprimento de cabo fixo e conhecendo-se as distâncias entre o ponto de referência à antena de GPS e a profundidade do magnetómetro, o primeiro passo, para se conhecer a posição do magnetómetro, é determinar a distância deste último à antena de GPS, ou seja, o valor de *layback*. O segundo passo será determinar como aplicar o valor de *layback* às posições obtidas pela antena de GPS.

Partindo-se do valor de cabo na água, da profundidade do magnetómetro e das distâncias à antena de GPS testaram-se três métodos de cálculo do valor de *layback*: utilizando o teorema de Pitágoras, utilizando o teorema de Pitágoras e um fator de catenária e um método simplificado de forças de arrasto. Dos testes realizados pode-se verificar que a aplicação do método do teorema de Pitágoras com um fator de catenária é o que mais difere dos outros dois métodos. Entre a aplicação do teorema de Pitágoras e o método de forças de arrasto, a diferença é muito baixa. Até aos 20 metros de profundidade os dois modelos apresentam uma diferença máxima de 1.2 m para um comprimento de cabo de 100 m e uma profundidade de 20 m. Este valor é ligeiramente superior ao dobro do erro de precisão do sistema DGPS utilizado nos ensaios. Quanto maior a profundidade maior a diferença entre os valores de *layback* calculados, chegando a uma diferença de 2.8 m para um comprimento de cabo de 100 m e a uma profundidade de 50 m. No entanto, o cálculo do valor de *layback* pelo método das forças entra em conta com um conjunto de condicionantes que variando poderá levar a diferenças maiores entre os dois métodos. Verificou-se ainda que aumentando o peso do cabo, considerando um sistema à mesma profundidade, mesmo

comprimento de cabo e o mesmo diâmetro, faz com que o valor de *layback* calculado segundo o método de forças se aproxime mais do valor calculado segundo o método do Teorema de Pitágoras, ou seja, a sua catenária diminui. Conclui-se deste modo que o método de cálculo e aplicação do valor de *layback* poderá ser adaptado, ou mesmo necessário ser adaptado, a cada situação e sistema utilizado.

Após o cálculo de valor de *layback* ter-se-á de definir de que forma se poderá aplicá-lo. Existem essencialmente dois métodos: considerar que o rumo da embarcação é o mesmo do magnetómetro ou tentar calcular o rumo do magnetómetro em relação da embarcação. O primeiro método parte da aplicação direta do valor de *layback* à posição do ponto de reboque no rumo a que se encontra a embarcação, denominado por método à embarcação por deslocamento, e o segundo método tenta definir o rumo do magnetómetro em relação à embarcação e aplicar o valor de *layback* com esse rumo, método por arraste.

Embora o comportamento da embarcação se faça sentir no magnetómetro sabe-se que este irá dar origem a um movimento de menor amplitude no magnetómetro. A aplicação do valor de *layback*, calculado de acordo com o método por arraste parece representar melhor o comportamento real do magnetómetro ao ser rebocado. No entanto, estes métodos não consideram possíveis correntes laterais que possa haver, situação esta bastante provável em ambientes portuários e estuarinos. Nestes ambientes a corrente de maré pode criar uma maior instabilidade no reboque do magnetómetro, logo, um maior desvio lateral deste mesmo ao rumo calculado, tendo por base de um comportamento derivado somente pelo movimento da plataforma de reboque sem a existência de qualquer corrente.

A variação do CE consiste essencialmente em variações periódicas, ou previsíveis, nomeadamente as variações diurnas, que se apresentam como uma variação de baixa frequência, e variações não periódicas, nomeadamente tempestades magnéticas e micropulsões, que se apresentam como uma variação de alta frequência. Dada a existência desta variação e como o magnetómetro adquire em movimento, a correção dos dados é necessária para retirar sua variação temporal e analisar os dados relativos ao mesmo instante. As variações periódicas são facilmente corrigidas, quer por análise da variação do CM nos registos ao longo de um dia de levantamento ou subtração direta do valor da variação diurna registada num magnetómetro montado numa estação fixa. Porém, as variações não periódicas podem muitas vezes levar a erros na deteção de um possível objeto. As tempestades magnéticas ocorrem em alturas em que o índice de atividade solar se encontra mais elevado. A monitorização da variação do CMT e campo magnético solar levou à criação de índices de atividade solar que permite prever uma tempestade magnética e consequentemente alturas de maior probabilidade de instabilidade do CMT. A consulta

deste índice permite definir a realização de um levantamento magnético numa altura de baixa atividade. No entanto, mesmo em dias de baixa atividade solar, poderá haver registo de micropulsões que pode levar a uma sobreposição do seu sinal ao sinal de uma anomalia magnética proveniente de um objeto. Neste caso a correção da variação do CE é importante para a posterior interpretação dos dados.

A correção do CE para levantamentos no mar é normalmente feita através da correção do registo obtido por um magnetómetro montado numa estação fixa. A realização de fiadas de confirmação ou a passagem de tempo a tempo no mesmo ponto para ir registando a variação do CE são métodos demorados e que logisticamente no mar são complicadas.

A estação terá de ser montada o mais longe possível de estradas, cabos de alta tensão, tráfego marítimo, etc. No entanto, a distância à área de levantamento também terá de ser tida em conta, de modo a que a variação do CE se faça sentir em igual amplitude e fase. Da comparação entre o registo de duas estações distanciadas cerca de 80 km, verificou-se uma variação de amplitude máxima do sinal de cerca de 4 nT. A correção dos dados com estes dois registos leva à introdução de uma variação inexistente no registo, no entanto devido à sua alta frequência nunca iria ser atribuída a um objeto.

As micropulsões podem ser classificadas de acordo com a sua morfologia em micropulsões regulares,  $P_c$ , e irregulares,  $P_i$ . As micropulsões com um período na ordem de segundos, como as do tipo  $P_i$ , podem levar a que o seu registo não ocorra em simultâneo numa estação fixa e no levantamento no mar, aquisição em movimento. Embora uma micropulsão tenha uma forma distinta de um objeto, como que um impulso súbito, poder-se-á levar em erro ao avaliar o mesmo sinal como tendo origem num objeto. Nestas situações de dúvida, não haverá outra solução do que repetir o levantamento no mesmo local suspeito e confirmar a existência ou não de uma anomalia causada por um objeto.

A taxa de amostragem dos magnetómetros que está a ser utilizada no registo da variação do CE ou no levantamento no mar, também irá ser determinante nos tipos de variações não periódicas do CE que poderão ser amostradas.

### **VII.1 Considerações finais e trabalhos futuros**

O trabalho apresentado permite definir uma metodologia que entre em conta com os vários condicionantes a considerar na realização de um levantamento magnético no mar para a deteção de objetos, e as principais correções a aplicar, apresentada no Apêndice C.

Embora os exemplos apresentados tenham sido com base numa configuração de um só sensor, considera-se que os condicionantes apresentados terão de ser tidos em conta em qualquer configuração escolhida, exceto aqueles cujo ruído resultante tenha um comprimento de onda inferior ao espaçamento entre sensores. A definição do espaçamento entre fiadas terá de ser calculado de forma diferente no caso de ser uma configuração em gradiómetro, devido ao cálculo de um gradiente e não um valor de campo magnético total, a razão entre o valor medido e a distância do sensor ao objeto será diferente.

Na execução deste trabalho surgiram também novas questões e a necessidade de realizar novos ensaios para as responder:

- Realizar um mesmo ensaio com os dois tipos principais de sensores para medição de CM no mar.
- Realizar ensaios com objetos conhecidos e posições conhecidas de modo a testar o cálculo de posicionamento com várias configurações de cabos e pesos e determinar o número de registos necessários para amostrar devidamente uma anomalia.
- Realizar o cálculo de uma média de afastamento da fiada planeada para vários tipos de embarcações utilizadas para este tipo de levantamentos e para diferentes condições de mar para estabelecer uma zona de sobreposição mais real na determinação do espaçamento entre fiadas.
- Realizar a quantificação da influência magnética de mais algumas embarcações de modo a obter uma razão entre a dimensão, o tipo e a distância de reboque necessária de modo a que a influência seja mínima ou mesmo nula.
- Realizar a quantificação da influência magnética de uma embarcação com uma frequência de tempo igual à apresentação de um novo modelo IGRF para o CP. Esse ensaio irá permitir definir a frequência com que é necessário quantificar este condicionante.
- Realizar novos ensaios de registo da variação do CE, nomeadamente a aquisição em simultâneo e num ciclo mínimo de 24h, com uma estação de referência montada em terra e uma fundeada.

## ***Capítulo VII – Conclusões e trabalhos futuros***

O próximo passo será realizar um procedimento de processamento de modo a identificar os objetos, a sua forma e orientação, nos registos de deteção. A realização deste procedimento também levará certamente a uma melhoria no procedimento de execução do levantamento.

## **APÊNDICES**



## Apêndice A – Principais unidades na medição do campo magnético

Nome	Unidades Sistema Internacional (SI)	Unidades Sistema comprimento massa segundo (cgs)	Conversão entre SI e cgs
Força do CM (H)	Amperes/metro (A/m)	Oersted (Oe)	$1\text{A/m}=4\pi\cdot 10^{-3}\text{Oe}$
Fluxo do CM (B)	Tesla (T)	Gauss (G)	$1\text{T}=10^4\text{G}=10^{-9}\text{nT}=1\gamma$
Magnetização (M)	Amperes/metro (A/m)	$\text{cm}^{-3}\text{emu}^{(*)}$	$1\text{A/m}=10^3\text{emu}^{(*)}$
Momento Magnético (m)	Amperes*metro <sup>2</sup> (A.m <sup>2</sup> )	$\text{emu}^{(*)}$	$1\text{A.m}^2=1\text{emu}^{(*)}$
Permeabilidade magnética no espaço vazio ( $\mu_0$ )	Henry/metro (H/m) <u>ou</u> Tesla.metro/Ampere (T.m/A)	1	$4\pi\cdot 10^{-7}\text{H/m}=1$
Permeabilidade magnética ( $\mu$ )	Henry/metro (H/m) <u>ou</u> Tesla.metro/Ampere (T.m/A)	1	
Suscetibilidade Magnética (X)	Adimensional	$\text{emu}^{(*)}/\text{cm}^3$	$4\pi= \text{emu}^{(*)}/\text{cm}^3$
Suscetibilidade Magnética Massa (Xm)	$\text{m}^3/\text{kg}$	$\text{emu}^{(*)}/\text{g}$	$4\pi\cdot 10^{-3}= \text{emu}^{(*)}/\text{g}$

(\*) unidade eletromagnética

Adaptado de Butler [2004] e Jankowsky e Sucksdorff [1996]



## Apêndice B – Rotinas MATLAB

Foram realizadas uma série de pequenas rotinas para fazer uma primeira seleção dos dados adquiridos, quer do magnetómetro rebocado quer do magnetómetro estação de referência. Para ambos os magnetómetros existem uma série de parâmetros codificados anexados a cada linha de amostragem no ficheiro output, em ASCII, que determinam a qualidade e força do sinal. Estes códigos são próprios de cada fabricante.

Posteriormente, foram criadas rotinas que tiveram por objetivo filtrar os dados adquiridos no que diz respeito à análise da qualidade do seu sinal e posteriormente, após serem analisados graficamente, limpar possíveis registos anómalos, como *busters* e *spikes*. Outro fator a ter em conta é de que o ficheiro output possa incluir registos das manobras da embarcação de enfiamento à fiada, ou desvio de qualquer objeto (embarcação, boias, etc.), isto no caso do magnetómetro rebocado, ou registo de uma anomalia que pode ser causada por passagem de uma pessoa, automóvel, etc., junto ao sensor, isto no caso do magnetómetro estação de referência. Esta primeira filtragem, realizada essencialmente por uma aplicação de uma média móvel e em último caso corte do registo, é importante para uma melhor análise dos dados para responder às questões colocadas. No entanto não é considerado relevante colocar aqui o código dessas rotinas.

Neste apêndice são apresentados os códigos simplificados das principais rotinas utilizadas para a apresentação deste trabalho, separadas por capítulos.

Devido à extensão e possível utilização em outros projetos, as rotinas foram também colocadas no endereço eletrónico <http://www.idl.ul.pt/>.

## Capítulo III

### B.1 Cálculo do afastamento médio da fiada planeada e fiada realizada

```

%Esta rotina permite calcular a média de afastamento entre a fiada
%planeada e a fiada executada

clear all;
close all;
clc;

dir_entrada_mag = 'Diretório de entrada'; % leitura dos ficheiros RAW do
magnetometro de reboque
cd(dir_entrada_mag);

ficheiro=fopen('ficheiro'); % nome do ficheiro que pretende ler

LineInfo = textscan(ficheiro, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores'); % leitura de cada linha de informação do ficheiro
fclose(ficheiro);
LineInfo = cell2mat(LineInfo);

[s,o] = size(LineInfo);

LineId = regexprep('ficheiro','.extensão do ficheiro',''); % reescreva o
nome do ficheiro que pretende ler

LineNameInfo = textscan(LineId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
LineNameInfo = cell2mat(LineNameInfo);

LineYear = LineNameInfo(1,1);
LineMonth = LineNameInfo(1,2);
LineDay = LineNameInfo(1,3);
LineName = LineNameInfo(1,4);

Ping=LineInfo(:,1);
Field=LineInfo(:,2);
Altitude=LineInfo(:,3);
Profundidade=LineInfo(:,4);
X=LineInfo(:,5); %sem correção do posicionamento
Y=LineInfo(:,6); %sem correção do posicionamento
X_lay = LineInfo(:,7); %com correção do posicionamento
Y_lay = LineInfo(:,8); %com correção do posicionamento
Hour = LineInfo(:,9);
Minute = LineInfo(:,10);
Second = LineInfo(:,11);
Cable = LineInfo(:,12);

plot (X,Y,'r')
hold on

dx=(X(s)-X(1))/s;
dy=(Y(s)-Y(1))/s;

for i=1:s;

```

```

x(1)=X(1);
y(1)=Y(1);
x(s)=X(s);
y(s)=Y(s);
x(i+1)=x(i)+dx;
y(i+1)=y(i)+dy;
end

plot(x,y)

for i=1:s
    dX(i)=abs(x(i)-X(i));
    dY(i)=abs(y(i)-Y(i));
end

medDX=mean(dX);
medDY=mean(dY);
medDIS=sqrt(medDX^2+medDY^2)

```

## B.2 Cálculo da distância entre fiadas e a resolução espacial do levantamento

```

%Esta rotina permite definir o espaçamento entre fiadas por introdução
%das principais características físicas do objeto a
%detetar, resolução operacional do magnetómetro e
%afastamento máximo da embarcação, devido à sua manobrabilidade.
%Permite também calcular a resolução espacial da amostragem expectável

%1 - Cálculo da distância máxima ao objeto

%suscetibilidade magnética adimensional
X=100;
%densidade do objeto, em kg/m3
D=78600;
%suscetibilidade magnética massa, em m^3/kg
Xm=X/D %ou se souber o valor de Xm substituir
%massa do objeto, em kg
m=100
%densidade do fluxo do CMP local
%pode ser calculado através do modelo IGRF ou WMM em
%http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm introduzindo a latitude
%e longitude do local de levantamento, e dia da execução do mesmo,
%valor dado em nT
BCMT=43000
%anomalia mínima detetável, em nT, isto é a resolução
%operacional considerando o magnetómetro utilizado
Bobj=3

%Distância ao objeto, em m
robj=((BCMT*Xm*m)/Bobj)^(1/3)

%2 - Cálculo do espaçamento entre fiadas

%afastamento máximo da embarcação a considerar, em m
rnavio=5;
%distância máxima ao fundo que se consegue garantir, em m
rfundo=8;
%profundidade de enterramento do objeto a considerar, em m

```

```

rent=0;
%distância do sensor ao objeto, em m
rt=rfundo+rent; %esta soma tem de ser sempre inferior ao robj

%distância max entre fiadas
rfiada=2*sqrt(robj^2-rt^2)

%3 - Cálculo da resolução espacial

%velocidade de levantamento milhas/horas, nós
vnos=5;
%velocidade de levantamento, em m/s
vms=(vnos*1852)/3600;
%taxa de amostragem em número de ciclos/segundo, Hz
tam=1;
%resolução espacial, em m
amos=vms/tam

```

## Capítulo IV

### B.3 Cálculo da variação diurna

```

%rotina para cálculo da variação diurna o ficheiro a utilizar já foi
%filtrado e selecionado de acordo com o grupo datas hora, GDH, do
%início e fim do levantamento que se pretende analisar
clear all;
close all;
clc;

dir_entrada_magref = 'Diretório de entrada'; % ficheiros do magnetómetro
estação de referência após primeira filtragem
cd(dir_entrada_magref);

ficheiro=fopen('ficheiro'); % nome do ficheiro que pretende ler

MagrefInfo = textscan(ficheiro,'definição dos caracteres de leitura e
separadores'); % leitura de cada linha de informação do ficheiro
fclose(ficheiro);
MagrefInfo = cell2mat(MagrefInfo);

[t,o] = size(MagrefInfo);

MagRefId = regexp('ficheiro','.extensão do ficheiro',''); % reescreva o
nome do ficheiro da estação de referência que pretende ler

MagRefNameInfo = textscan(MagRefId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
MagRefNameInfo = cell2mat(MagRefNameInfo);

MagRefYear = MagRefNameInfo(1,1);
MagRefMonth = MagRefNameInfo(1,2);
MagRefDay = MagRefNameInfo(1,3);
MagRefName = MagRefNameInfo(1,4);

Year = MagrefInfo(:,1);
Day = MagrefInfo(:,2);

```

```

HourRef = MagrefInfo(:,3);
MinuteRef = MagrefInfo(:,4);
SecondRef = fix(MagrefInfo(:,5));
FieldRef=MagrefInfo(:,6);
FieldRefFilt = MagrefInfo(:,7);

%cálculo da variação diurna, considerando como zero o início do
%levantamento

for d=1:t-1;
    a(d)=FieldRefFilt(d+1)-FieldRefFilt(d);
    Diurna(1)=0;
    Diurna(d+1)=Diurna(d)+a(d);
end

dir_saida = 'Diretório de saída';
cd(dir_saida);
mod_raw = fopen(strcat('nome do ficheiro','.extensão do ficheiro'), 'wt');
%criação de um novo ficheiro, mantendo o mesmo nome, com a
%informação do valor de campo de referencia e variação diurna entre o
%GDH de início e fim de levantamento.

fprintf(mod_raw, 'YEAR", "DAY", "HOUR", "MINUTE", "SECOND", "FIELD", "FIELD_FILT"
, "VDIURNA"\n');

for k=1:t;

    fprintf(mod_raw, '%04.0f', Year(k,1));
    fprintf(mod_raw, ', %02.0f', Day(k,1));
    fprintf(mod_raw, ', %02.0f', HourRef(k,1));
    fprintf(mod_raw, ', %02.0f', MinuteRef(k,1));
    fprintf(mod_raw, ', %02.0f', SecondRef(k,1));
    fprintf(mod_raw, ', %06.2f', FieldRef(k,1));
    fprintf(mod_raw, ', %06.2f', FieldRefFilt(k,1));
    fprintf(mod_raw, ', %02.2f\n', Diurna(k,1));

end

```

#### B.4 Aplicação da correção da variação diurna

```

%aplicação da correção da variação diurna a cada fiada do magnetómetro
%marinho rebocado
clear all;
close all;
clc;

dir_entrada_magref = 'Diretório de entrada'; % ficheiros do
%magnetómetro estação de referencia com o valor da variação diurna
%calculada
cd(dir_entrada_magref);

listaficheiros = dir(dir_entrada_magref);
[m,n] = size (listaficheiros);
listaficheiros =(struct2cell(listaficheiros))';

listaficheiros=listaficheiros(1:(m))';
[m,n] = size (listaficheiros);

```

```

dir_entrada_line = 'Diretório de entrada'; % ficheiros do magnetómetro de
reboque após primeira filtragem
cd(dir_entrada_line);

nficheiros = dir(dir_entrada_line);
[q,r] = size (nficheiros);
nficheiros =(struct2cell(nficheiros))';

ficheiros=nficheiros(1:(q))';
[q,r] = size (ficheiros);

for z=3:m

cd(dir_entrada_magref);
%leitura do ficheiro magnetómetro estação de referência
nome_ficheiro=cell2mat(listaficheiros(z,1));
ficheiro=fopen(nome_ficheiro);

MagrefInfo = textscan(ficheiro,'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
fclose(ficheiro);
MagrefInfo = cell2mat(MagrefInfo);

[s,o] = size(MagrefInfo);

MagrefId = regexprep(nome_ficheiro, '.extensão do ficheiro', '');

MagrefNameInfo = textscan(MagrefId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
MagrefNameInfo = cell2mat(MagrefNameInfo);

MagrefYear = MagrefNameInfo(1,1);
MagrefMonth = MagrefNameInfo(1,2);
MagrefDay = MagrefNameInfo(1,3);
MagrefName = MagrefNameInfo(1,4);

HourRef = MagrefInfo(:,3);
MinuteRef = MagrefInfo(:,4);
SecondRef = MagrefInfo(:,5);
FieldRef=MagrefInfo(:,6);
FieldRefFilt=MagrefInfo(:,7);
Diurna=MagrefInfo(:,8);

for a=3:q

cd(dir_entrada_line);%leitura do ficheiro magnetómetro rebocado
name_ficheiro = cell2mat(nficheiros(a,1));
file=fopen(name_ficheiro);

LineInfo = textscan(file, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
fclose(file);
LineInfo = cell2mat(LineInfo);

[p,t] = size(LineInfo);

```

```

LinkId = regexp(name_ficheiro, '.extensão do ficheiro', '');

LineNameInfo = textscan(LinkId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
LineNameInfo = cell2mat(LineNameInfo);

LineYear = LineNameInfo(1,1);
LineMonth = LineNameInfo(1,2);
LineDay = LineNameInfo(1,3);
LineName = LineNameInfo(1,4);

Ping=LineInfo(:,1);
Field=LineInfo(:,2);
Altitude=LineInfo(:,3);
Profundidade=LineInfo(:,4);
X=LineInfo(:,5); %sem correção do posicionamento
Y=LineInfo(:,6); %sem correção do posicionamento
X_lay = LineInfo(:,7); %com correção do posicionamento
Y_lay = LineInfo(:,8); %com correção do posicionamento
Hour = LineInfo(:,9);
Minute = LineInfo(:,10);
Second = LineInfo(:,11);
Cable=LineInfo(:,12);

if (MagrefYear==LineYear) && (MagrefMonth==LineMonth) &&
(MagrefDay==LineDay)

dir_saida = 'Diretório de saída';
cd(dir_saida);
mod_raw = fopen(strcat(LinkId, '.txt'), 'wt'); %criação de um novo
%ficheiro com a informação do valor de campo de referencia

fprintf(mod_raw, "LINE_ID", "PING", "FIELD", "FIELD_REF", "DIURNA", "ALTITUDE", "
PROFUNDIDADE", "X", "Y", "X_LAY", "Y_LAY", "HH:MM:SS", "CABLE"\n");

for j=1:s-1;
for k=1:p-1;
    if (HourRef(j)== Hour(k)) && (MinuteRef(j)==Minute(k)) &&
(SecondRef(j)==Second(k))

        FieldCorr(k)=Field(k)-Diurna(j); %aplicação da correção da
%variação diurna

        fprintf(mod_raw, "%s", LineId);
        fprintf(mod_raw, ",%.0f", Ping(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.3f', Field(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.3f', FieldRef(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.3f', FieldCorr(k));
        fprintf(mod_raw, ',%.2f', Altitude(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.1f', Profundidade(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.3f', X(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.3f', Y(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.3f', X_lay(k,1));
        fprintf(mod_raw, ',%.3f', Y_lay(k,1));

        fprintf(mod_raw, ',%02.0f', Hour(k,1));
        fprintf(mod_raw, ':%02.0f', Minute(k,1));

```

```

fprintf(mod_raw, '%02.0f', Second(k,1));

fprintf(mod_raw, '%.0f\n', Cable(k,1));

    end

end

end

end
fclose(mod_raw);
end

```

## B.5 Cálculo do valor de rumo (*heading*) e correção do CP para o planeamento circular

```

clear all;
close all;
clc;

dir_entrada_line = 'Diretório de entrada'; %ficheiros do magnetómetro
%de reboque com a correção da variação diurna

nficheiros = dir(dir_entrada_line);
[q,r] = size (nficheiros);
nficheiros =(struct2cell(nficheiros))';

ficheiros=nficheiros(1:(q))';
[q,r] = size (ficheiros);

for j=1:q;

cd(dir_entrada_line);

nome_ficheiro=cell2mat(ficheiros(j,1));
ficheiro=fopen(nome_ficheiro);

LineInfo = textscan(ficheiro, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
fclose(ficheiro);
LineInfo = cell2mat(LineInfo);

[l,o] =size(LineInfo);

LineId = regexprep(nome_ficheiro, '.extensão do ficheiro', '');

LineNameInfo = textscan(LineId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
LineNameInfo = cell2mat(LineNameInfo);

LineYear = LineNameInfo(1,1);
LineMonth = LineNameInfo(1,2);
LineDay = LineNameInfo(1,3);

```

```

Ping= LineInfo(:,1);
Field=LineInfo(:,2);
FieldRef=LineInfo(:,3);
Diurna=LineInfo(:,4);
Altitude=LineInfo(:,5);
Profundidade=LineInfo(:,6);
X=LineInfo(:,7);
Y=LineInfo(:,8);
X_lay = LineInfo(:,9);
Y_lay = LineInfo(:,10);
Hour = LineInfo(:,11);
Minute = LineInfo(:,12);
Second = LineInfo(:,13);
Cable= LineInfo(:,14);

dXmm=X_lay(1)-X_lay(1);
dYmm=Y_lay(1)-Y_lay(1);

%cálculo do rumo do navio a partir de X e Y sem correção do
%posicionamento

for f=1:l-1;
if dXmm>0 & dYmm>0
    dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
    dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
    head(f)=90-atand(dYm(f)/dXm(f));
else
if dXmm>0 & dYmm<0
    dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
    dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
    head(f)=90+atand(dYm(f)/dXm(f));
else
if dXmm<0 & dYmm<0
    dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
    dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
    head(f)=180+atand(dXm(f)/dYm(f));
else
if dXmm<0 & dYmm>0
    dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
    dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
    head(f)=270+atand(dYm(f)/dXm(f));
end
end
end
end
end

headingnav=ones(1,l);
headingnav(1:(l-1))=head;
headingnav(l)=head(l-1);
headingnav=headingnav';

FieldIGRF11=xxxx.xxx; %valor do CP calculado pelo modelo IGRF11 para o
valor da posição média da área

dir_saida = 'Diretório de saída';
cd(dir_saida);
mod_raw = fopen(strcat(LineId,'.extensão do ficheiro'), 'wt');

```

```
fprintf(mod_raw, 'LINE_ID", "PING", "FIELD", "FIELDREF", "DIURNA", "ALTITUDE", "P
ROFUNDIDADE", "X", "Y", X_lay", "Y_lay", "HH:MM:SS", "HEADING_NAV", "CABLE"\n');

for i = 1:l

Anomalia(i)=Diurna(i)-FieldIGRF11; %aplicação da correção do CP

    fprintf(mod_raw, '%s', LineId);
    fprintf(mod_raw, ', %.0f', Ping(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.3f', Field(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.3f', FieldRef(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.3f', Diurna(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.3f', Anomalia(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.2f', Altitude(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.1f', Profundidade(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', X(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', Y(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', X_lay(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', Y_lay(i,1));

    fprintf(mod_raw, ', %02.0f', Hour(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %02.0f', Minute(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %02.0f', Second(i,1));

    fprintf(mod_raw, ', %03.f', headingnav(i,1));

    fprintf(mod_raw, ', %.0f\n', Cable(i,1));
end
end
```

## B.6 Cálculo do valor do rumo e correção do CP para o planeamento radial

### a. Cálculo do rumo e seleção dos valores da zona de interseção entre as fiadas

```
clear all;
close all;
clc;

dir_entrada_line = 'Diretório de entrada'; %ficheiros do magnetómetro de
reboque com a correção da variação diurna

nficheiros = dir(dir_entrada_line);
[q,r] = size (nficheiros);
nficheiros =(struct2cell(nficheiros))';

ficheiros=nficheiros(1:(q))';
[q,r] = size (ficheiros);

for j=1:q;

cd(dir_entrada_line);
```

```

nome_ficheiro=cell2mat(ficheiros(j,1));
ficheiro=fopen(nome_ficheiro);

LineInfo = textscan(ficheiro, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
fclose(ficheiro);
LineInfo = cell2mat(LineInfo);

[1,o] =size(LineInfo);

LineId = regexprep(nome_ficheiro, '.extensão do ficheiro', '');

LineNameInfo = textscan(LineId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
LineNameInfo = cell2mat(LineNameInfo);

LineYear = LineNameInfo(1,1);
LineMonth = LineNameInfo(1,2);
LineDay = LineNameInfo(1,3);

Ping= LineInfo(:,1);
Field=LineInfo(:,2);
FieldRef=LineInfo(:,3);
Diurna=LineInfo(:,4);
Altitude=LineInfo(:,5);
Profundidade=LineInfo(:,6);
X=LineInfo(:,7);
Y=LineInfo(:,8);
X_lay = LineInfo(:,9);
Y_lay = LineInfo(:,10);
Hour = LineInfo(:,11);
Minute = LineInfo(:,12);
Second = LineInfo(:,13);
Cable=LineInfo(:,14);

dXmm=X_lay(1)-X_lay(1);
dYmm=Y_lay(1)-Y_lay(1);

%cálculo do rumo do navio a partir de X e Y sem correção do
%posicionamento

for f=1:l-1;
if dXmm>0 & dYmm>0
    dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
    dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
    head(f)=atand(dYm(f)/dXm(f));
else
if dXmm>0 & dYmm<0
    dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
    dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
    head(f)=90+atand(dYm(f)/dXm(f));
else
if dXmm<0 & dYmm<0
    dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
    dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
    head(f)=180+atand(dXm(f)/dYm(f));

```

```

        else
    if dXmm<0 & dYmm>0
        dXm(f)=abs(X(f+1)-X(f));
        dYm(f)=abs(Y(f+1)-Y(f));
        head(f)=270+atand(dYm(f)/dXm(f));
    end
    end
    end
end
end

headingnav=ones(1,1);
headingnav(1:(l-1))=head;
headingnav(1)=head(l-1);
headingnav=headingnav';

%a partir de um ponto médio da área de interseção entre as fiadas,
%Xmed e Y med, definir os pontos com um afastamento de 50 m.

for i=1:l;
    A(i)=sqrt(abs(Xmed-X_lay(i))^2+abs(Ymed-Y_lay(i))^2);
end

B=find (A<50);
b=length(B);
sol=B(1);
eol=B(b);

dir_saida = 'Diretório de saída';
cd(dir_saida);
mod_raw = fopen(strcat(LineId,'.extensão do ficheiro'),'wt');
fprintf(mod_raw, 'LINE_ID", "PING", "FIELD", "FIELDREF", "DIURNA", "ALTITUDE", "P
ROFUNDIDADE", "X", "Y", X_lay", "Y_lay", "HH:MM:SS", "HEADING_NAV", "CABLE"\n');

for i = sol:eol;
    fprintf(mod_raw, '%s', LineId);
    fprintf(mod_raw, ', %.0f', Ping(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.3f', Field(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.3f', FieldRef(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.3f', Diurna(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.2f', Altitude(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.1f', Profundidade(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', X(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', Y(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', X_lay(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.4f', Y_lay(i,1));

    fprintf(mod_raw, ', %.02.0f', Hour(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.02.0f', Minute(i,1));
    fprintf(mod_raw, ', %.02.0f', Second(i,1));

    fprintf(mod_raw, ', %.03.f', HeadingNAV(i,1));

    fprintf(mod_raw, ', %.0f\n', Cable(i,1));
end
end

```

## b. Cálculo da média do valor do rumo e correção do CP para o planeamento radial

```

clear all;
close all;
clc;

dir_entrada_line = 'Diretório de entrada';

nficheiros = dir(dir_entrada_line);
[q,r] = size (nficheiros);
nficheiros =(struct2cell(nficheiros))';

ficheiros=nficheiros(1:(q))';
[q,r] = size (ficheiros);

dir_saida = 'Diretório de saída'
cd(dir_saida);

mod_raw = fopen('media.txt', 'wt'); %criação de um novo ficheiro com a
média
fprintf(mod_raw, "LINE_ID", "DIURNA", "HEADING_NAV", "CABLE"\n");

for j=3:q;

cd(dir_entrada_line);

nome_ficheiro=cell2mat(ficheiros(j,1));
ficheiro=fopen(nome_ficheiro);

LineInfo = textscan(ficheiro, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
fclose(ficheiro);
LineInfo = cell2mat(LineInfo);

[l,o] =size(LineInfo);

LineId = regexprep(nome_ficheiro, '.txt', '');

LineNameInfo = textscan(LineId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores');
LineNameInfo = cell2mat(LineNameInfo);

LineYear = LineNameInfo(1,1);
LineMonth = LineNameInfo(1,2);
LineDay = LineNameInfo(1,3);

Ping=LineInfo(:,1);
Field=LineInfo(:,2);
FieldRef=LineInfo(:,3);
Diurna=LineInfo(:,4);
Altitude=LineInfo(:,5);
Profundidade=LineInfo(:,6);
X=LineInfo(:,7);
Y=LineInfo(:,8);
X_lay = LineInfo(:,9);

```

```

Y_lay = LineInfo(:,10);
Hour = LineInfo(:,11);
Minute = LineInfo(:,12);
Second = LineInfo(:,13);
HeadingNAV=LineInfo(:,14);
Cable=LineInfo(:,15);

MedDiurna=mean(Diurna);
Medheadg=mean(HeadingNAV);
FieldIGRF11=xxxxx.xxx; %valor do CP calculado pelo modelo IGRF11 para
%uma posição média da área
Anomalia(j)=Diurna(j)-FieldIGRF11; %aplicação da correção do CMP
C=Cable(1);

fprintf(mod_raw,'%s',LineId);
fprintf(mod_raw,',%.3f',MedDiurna);
fprintf(mod_raw,'%03.f',Medheadg);
fprintf(mod_raw,'%03.f',Anomalia);
fprintf(mod_raw,'%03.f\n',C);

end

```

## Capítulo IV

### B.7 Cálculo do valor de *layback* pelo modelo simplificado de forças.

```

clear all;
close all;
clc;

%Cálculo expedito do valor de layback:

%*Tem por principio a análise simplificada das forças (normal e
%tangencial) existentes desde o magnetômetro até ao ponto de reboque,
%somadas de 1 em 1 metro, de forma a calcular o angulo incidente do
%cabo, e conseqüentemente a sua distância na horizontal e na vertical,
%partindo das características físicas do sistema e da profundidade do
%magnetômetro
%*No fim a soma destas distâncias (calculadas para cada 1 m de cabo)
%vão dar um cálculo aproximado do valor de layback a aplicar para uma dada
profundidade.
%*A velocidade normal e tangencial ao cabo é desconhecida, pois não se
%conhece o ângulo inicial de incidência. Foi considerado um ângulo de
%incidência de 25 graus.
%*Atribuindo o valor da profundidade real (sensor de pressão) e uma
%velocidade inicial, ele ira calcular a velocidade real que melhor se
%ajusta à realidade considerando propriedades físicas da água e do sistema
%cabo e magnetômetro.
%*É considerado que todo o cabo se encontra na água.

%Dados

Vo=5*1852/3600; %velocidade média, em m/s (nós*1852m/3600s)
ROagua=1030; %densidade da água, em kg/m3
VD=1.08*10^-3; %viscosidade dinâmica da água, em kg/(m.s)
Wmag=2*9.8; %peso do magnetômetro na água,(kg)*g(m/s2)=força(N);

```

```

Cmag=0.3; %coeficiente de arraste do magnetômetro;
Amag=0.012; %área de referência em m^3, é assumida como sendo a área
%frontal do magnetômetro, Acone=pi*r*(r+s), s=sqrt(r^2+h^2); r=0.0635m e
%h=0.25m

Wcabo=0.044; %peso de 1m de cabo na água, em kg
Dcabo=0.01; %diâmetro exterior do cabo, em m
Lcabo=100; %quantidade de cabo desde o ponto de reboque, em m
Zofs=00; %distância do ponto de reboque à linha de água, em m

Re=(ROagua*Vo*Dcabo)/VD; %Número de Reynolds do cabo (adimensional);
%razão entre as forças inerciais e de escoamento
Can=1.5; %coeficiente de arraste normal ao cabo;
Cat=0.005; %coeficiente de arraste tangencial ao cabo;

Pmag=50; %profundidade do magnetômetro, em m;
prof=Pmag+Zofs; %profundidade do peixe, valor dado pelo sensor de pressão ,
%mais o offset em z ao ponto de reboque, em m

%Condição inicial: cálculo das forças de arrasto, peso do magnetômetro
%e do ângulo de incidência

ARmag=Cmag*(1/2)*ROagua*Vo^2*Amag; %Força de arrasto do Magnetômetro,
situação inicial considerando que não há cabo na água, considerando a
velocidade;
To=ARmag; % a tensão tangencial inicial será a força de arrasto do
magnetômetro
Wo=Wmag; % a tensão normal inicial será o peso do magnetômetro
PHIo=atand(Wo/To); %ângulo inicial resultante;

%Cálculo do valor de layback

Z=1;%valor inicial para o primeiro cálculo, Y é a soma de todas as
distâncias em profundidade para cada cálculo
o=5; %valor inicial da velocidade para o primeiro cálculo, em nós

while Z<=prof; % executar até que Y seja igual à profundidade real do
magnetômetro
    o=o-0.01; %contador da velocidade
    v=(o*1852)/3600; %cálculo da velocidade em m/s
    for i=2:Lcabo+1; %contador da quantidade de cabo;
        Atotal(1)=To;
        Ttotal(1)=Wo;
        PHI(1)=PHIo;

        ARan(i)=Can*(1/2)*ROagua*(v*sind(25))^2*Dcabo*(i);%cálculo da força de
arrasto normal ao cabo
        ARat(i)=Cat*(1/2)*ROagua*(v*cosd(25))^2*pi*Dcabo*(i);%cálculo da força
de arrasto tangencial ao cabo
        Atotal(i)=sqrt(ARan(i)^2+ARat(i)^2);%cálculo da força total de arrasto
no cabo
        Ttotal(i)=To+Atotal(i);%total da força de arrasto (magnetômetro mais a
quantidade de cabo)

        Wtcabo(i)=(Wcabo*(i))*9.8; %total peso do cabo
        Wtotal(i)=Wo+Wtcabo(i);%total peso (magnetômetro mais a quantidade de
cabo)
    end
end

```

```

    PHI(i)=atand(Wtotal(i)/Ttotal(i));%cálculo do angulo da catenária a
cada 1 m do cabo

    dy(i)=cosd (PHI(i)); %distância na horizontal a cada m de cabo
    dz(i)=sind (PHI(i)); %distância na vertical a cada m de cabo
end
Z=sum(dz); %profundidade
L=sum(dy); %layback
end

Profundidade=Z
Lay=L

```

## B.8 Aplicação do valor de *layback* à posição GPS

```

clear all;
close all;
clc;

dir_entrada_mag = ('Diretório de entrada'); % leitura dos ficheiros RAW do
magnetometro de reboque

cd(dir_entrada_mag);

ficheiro=fopen('ficheiro'); % nome do ficheiro que pretende ler

LineInfo = textscan(ficheiro,'definição dos caracteres de leitura e
separadores'); % leitura de cada linha de informação do ficheiro
fclose(ficheiro);
LineInfo = cell2mat(LineInfo);

[s,o] = size(LineInfo);

LineId = regexprep('ficheiro','.extensão do ficheiro',''); % reescreva o
nome do ficheiro que pretende ler

LineNameInfo = textscan(LineId, 'definição dos caracteres de leitura e
separadores'); % leitura de cada linha de informação do ficheiro
LineNameInfo = cell2mat(LineNameInfo);

LineYear = LineNameInfo(1,1);
LineMonth = LineNameInfo(1,2);
LineDay = LineNameInfo(1,3);
LineName = LineNameInfo(1,4);

Ping=(1:s)';
X_lay = LineInfo(:,11);
Y_lay = LineInfo(:,12);
Hour = LineInfo(:,2);
xx=LineInfo(:,15); %valores de posição já filtrados
yy=LineInfo(:,16); %valores de posição já filtrados
Minute = LineInfo(:,3);
Second = LineInfo(:,4);
Field=LineInfo(:,5);
Altitude=LineInfo(:,8);
Profundidade=LineInfo(:,7);

```

```

Cable=(valor do cabo.*ones(1,s))'; %introduzir o valor de comprimento de
%cabo

%cálculo de layback pelo Teorema de Pitágoras

for i=1:s;
    Layback(i)=sqrt((Cable(i))^2-(Profundidade(i))^2);
end

%aplicação do valor de layback pelo método de deslocamento

dXm=xx(s)-xx(1);
dYm=yy(s)-yy(1);

alfa=abs(atan(dYm/dXm));%cálculo da direção geral da fiada
Dist=sqrt(dXm^2+dYm^2);%cálculo da distância total da fiada
Velc=(Dist/s);%cálculo da velocidade média da fiada

%cálculo
for i=1:s-1;

deltaX=xx(i+1)-xx(1);
deltaY=yy(i+1)-yy(1);

deltax(i)=abs(cosd(alfa(1)).*Layback(i));
deltay(i)=abs(sind(alfa(1)).*Layback(i));

if deltaX(1)<=0 ;
    XX(i)=xx(i)+deltax(i);
else
    XX(i)=xx(i)-deltax(i);
end

if deltaY(1)<=0 ;
    YY(i)=yy(i)+deltay(i);
else
    YY(i)=yy(i)-deltay(i);
end

end

plot(xx,yy,'o')
hold on
plot(XX,YY,'r')
hold on

%aplicação do valor de layback pelo método de arraste

dXm=xx(s)-xx(1);
dYm=yy(s)-yy(1);

angle=abs(atan(dYm/dXm)); %cálculo da direção geral da fiada
Dist=sqrt(dXm^2+dYm^2);%cálculo da distância total da fiada
Velc=(Dist/s);%cálculo da velocidade média da fiada

%determinar a direção do início da fiada segundo uma distância de X* o
comprimento de cabo inicial (fator X depende do valor de Dist)

```

```

if Dist>12*Cable(1)
deltaX(1)=xx(floor(((10*Cable(1)))/3))-xx(1);
deltaY(1)=yy(floor(((10*Cable(1)))/3))-yy(1);
else
if Dist<12*Cable(1) & Dist>8*Cable(1)
deltaX(1)=xx(floor(((6*Cable(1)))/3))-xx(1);
deltaY(1)=yy(floor(((6*Cable(1)))/3))-yy(1);
else
if Dist<8*Cable(1)
deltaX(1)=xx(floor(((2*Cable(1)))/3))-xx(1);
deltaY(1)=yy(floor(((2*Cable(1)))/3))-yy(1);
end
end
end

%posição nº1 do magnetómetro

alfa(1)=atand(deltaY(1)/deltaX(1));

deltax(1)=abs(cosd(alfa(1)).*Cable(1));
deltay(1)=abs(sind(alfa(1)).*Cable(1));

if deltax(1)<=0 ;
    x(1)=xx(1)+deltax(1);
else
    x(1)=xx(1)-deltax(1);
end

if deltaY(1)<=0 ;
    y(1)=yy(1)+deltay(1);
else
    y(1)=yy(1)-deltay(1);
end

%restantes posições

for i=1:s-1;

deltaX(i+1)=xx(i+1)-x(i);
deltaY(i+1)=yy(i+1)-y(i);

alfa(i+1)=atand(deltaY(i+1)/deltaX(i+1));

% Fiada no sentido E-W
if angle<45 & dXm<0
    deltax(i+1)=cosd(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    deltay(i+1)=sind(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    x(i+1)=xx(i+1)+deltax(i+1);
    y(i+1)=yy(i+1)+deltay(i+1);

% Fiada no sentido W-E
else
if angle<45 & dXm>0
    deltax(i+1)=cosd(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    deltay(i+1)=sind(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    x(i+1)=xx(i+1)-deltax(i+1);
    y(i+1)=yy(i+1)-deltay(i+1);
else

```

```

% Fiada no sentido N-S
if angle>45 & dYm<0
    deltax(i+1)=cosd(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    deltay(i+1)=sind(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    y(i+1)=yy(i+1)+abs(deltay(i+1));
    if deltaX>0
        x(i+1)=xx(i+1)-deltax(i+1);
    else
        x(i+1)=xx(i+1)+deltax(i+1);
    end
end
else

% Fiada no sentido S-N
if angle>45 & dYm>0
    deltax(i+1)=cosd(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    deltay(i+1)=sind(alfa(i+1))*Layback(i+1);
    y(i+1)=yy(i+1)-abs(deltay(i+1));
    if deltaX>0
        x(i+1)=xx(i+1)-deltax(i+1);
    else
        x(i+1)=xx(i+1)+deltax(i+1);
    end
end

end
end
end
end

plot(x,y)

```



## **Apêndice C – Metodologia para a realização de levantamentos magnéticos marinhos para detecção de objetos**

### **Configuração**

1. Definir o tipo de sensor a utilizar (Capítulo II – II.3).
2. Definir o número de sensores, sensores auxiliares e a sua montagem (Capítulo II – II.4 e II.5).
3. Definir o tipo de posicionamento a utilizar (Capítulo II – II.6).

### **Planeamento**

4. Definir o que se pretende detetar: características dos objetos a detetar e saber se estes se encontram à superfície ou se encontram enterrados (Capítulo III – III.2).
5. Informações da zona de levantamento: batimetria, dados de sonar, correntes, proximidade a terra, tráfego marítimo, etc. (Capítulo III – III.5).
6. Determinar anomalia mínima detetável definindo uma resolução operacional com base no ruído do sensor, ruído ambiente e outras possíveis fontes de ruído avaliando área de levantamento (Capítulo III – III.4).
7. Calcular o valor médio do CP do local de levantamento (Capítulo III – III.4).
8. Determinar a distância máxima ao objeto e espaçamento entre fiadas considerando o afastamento médio da embarcação e erro do sistema de posicionamento utilizado e de possíveis sensores de altitude e/ou pressão (Apêndice B – rotina B.2).
9. Definir uma taxa de amostragem, altitude e velocidade ideal de levantamento de forma a garantir a resolução espacial desejada e a detecção do/dos objeto/os. (Apêndice B – rotina B.2).
10. Definir o planeamento de acordo com a área de levantamento (Capítulo III – III.5).

### **Execução**

11. Consultar o Índice Kp para os dias de levantamento (Capítulo VI – VI.1).

**Apêndice C – Metodologia para a realização de levantamentos magnéticos marinhos para detecção de objetos**

12. De acordo com as condições do local, no que diz respeito a agitação marítima e/ou possíveis correntes, definir o sentido da realização das fiadas e se necessário alterar a sua orientação.
13. Definir o comprimento de cabo necessário para realizar o levantamento tendo em conta a parametrização definida e a distância à embarcação.
14. Caso necessário, realizar um levantamento, com o comprimento de cabo utilizado, para definir a influência magnética da embarcação (Capítulo IV – IV.5).

**Correção**

15. Correção do posicionamento dos dados (Capítulo V).
16. Cálculo da influência magnética da embarcação de reboque do sistema para o comprimento de cabo a utilizar e devida correção da mesma nos dados (Apêndice B – rotinas B.3, B.4 e B.6).
17. Correção da variação do CE nos dados (Apêndice B – rotinas B.3 e B.4).

## Referências Bibliográficas

- Akbar S., M. Thakkar, D. Jones, K. Adom, e N. Rashidi (2008), GPS Satellite Precision Global Surveying.", *Proceedings of the 2008 IAJC-IJME International Conference, Paper 174, IT 304*. Disponível em: [http://www.ijme.us/cd\\_08/PDF/174%20it%20304.pdf](http://www.ijme.us/cd_08/PDF/174%20it%20304.pdf) [Consult. Janeiro 2013].
- AMS (2006), *Vessel Maneuverability Guide*, American Bureau of Shipping, Houston.
- Bearman, G (1995), *Seawater: its composition, properties and behaviour*, Open University Course Team, UK.
- Breiner, S. (1975), *Magnetics search in marine environment*, Geometrics, Inc. Disponível em: <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/magnetometer-information-and-case-studies/> [Consult. Janeiro 2013].
- Breiner S. (1999), *Applications Manual for Portable Magnetometers*, Geometrics, Inc. Disponível em: <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/magnetometer-information-and-case-studies/> [Consult. Janeiro 2013].
- Brito, Lucilia, M. Fiolhais e C. Providência (1999), *Campo electromagnético*, McGraw-Hill, Lisboa.
- Buchanan S. K., R. A. Scrutton, R. A. Edwards e R. B. Whitmarsh (1996), "Marine magnetic data processing in equatorial regions off Ghana." *Geophysical Journal International*, Vol. 125, p. 123-131.
- Bullard, E. C. e R. G. Mason (1961), "The magnetic field astern of a ship." *Deep Sea Research*, Vol. 8, p. 20 a 27.
- Butler, Robert F. (2004), *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes*, Department of Chemistry and Physics, University of Portland, Oregon, US.
- Christ R. e R. Wernli Sr. (2007), *The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles*, Elsevier Ltd., Oxford
- Farro, N. W., L. Veleva e P. Aguilat, Mild Steel Marine Corrosion Rates in Atmospheric and Seawater Environments of a Peruvian Port, *215<sup>th</sup> ECS Meeting Abstract #645*, San Francisco, EUA Disponível em: <http://ma.ecsdl.org/content/MA2009-01/14/645.full.pdf>. [Consult. Agosto de 2013].
- Fiolhais, C., José, L. M., Orlando O. (2000), *Campos e Ondas Electromagnéticos*, Serviço de Educação, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- GEM Systems Inc., *Advantages of Magnetic Gradiometers*, Gem Systems Inc., Disponível em: <http://www.gemsys.ca/technology/technology-paper/> [Consult. Janeiro 2013].

- GEM Systems Inc. (1998), *Magnetometers and gradiometers as ferrous ordnance locators and search tools*, Texto não publicado, GEM Systems Inc.
- Geometrics Inc., MAGPICK – magnetic map & profile processing, California
- Geometrics Inc. (2000), *Total field magnetometer performance, published specifications and what they mean*, Technical Report TR-120, Disponível em: <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/magnetometer-information-and-case-studies/> [Consult. Janeiro 2013].
- Giles, Randal V. (1976), *Mecânica dos fluidos e hidráulica*, Tradução Sérgio dos Santos Borde, McGraw-Hill do Brasil LTDA.
- Hansen, R. O. (1985), Reconstruction of time-variation free total field from marine gradiometer data, Technical Report, EG&G Geometrics
- Helmond, I. (2001), "Towed Vehicles.", *Encyclopedia of Ocean Sciences*, p. 2994-3003.
- Hrvoic I., e G. M. Hollyer, *Brief Review of Quantum Magnetometers*, GEM Systems Inc. Disponível em: <http://www.gemsys.ca/technology/technology-paper/>. [Consult. Janeiro 2013].
- Hypack Inc., Hypack Support Disponível em: <http://support.hypack.com/support/> [Consult. Janeiro 2013]
- International Hydrographic Organization (2005), *Manual of Hydrography*, 1<sup>st</sup> edition, International Hydrographic Bureau, Monaco.
- Jankowsky, J. e C. Sucksdorff (1996), *Guide for magnetic measurements and observatory practice*, International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Varsóvia, Polónia.
- Jones, E. J. W. (1999), *Marine Geophysics*, John Wiley & Sons, West Sussex, Inglaterra.
- Kang, M.-H., Sager, W.W., and the Expedition 324 Scientists (2010), "Data report: underway geophysics. In Sager, W.W., Sano, T., Geldmacher, J., and the Expedition 324 Scientists", *Proc. Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc. (IODP)*, Vol. 324, Tokyo. Disponível em: [http://publications.iodp.org/proceedings/324/EXP\\_REPT/CHAPTERS/324\\_108.PDF](http://publications.iodp.org/proceedings/324/EXP_REPT/CHAPTERS/324_108.PDF) [Consult. Janeiro 2013]
- Kearey P., M. Brooks e I. Hill (2002) *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3<sup>a</sup> Edição, Blackwell Science Ltd., Oxford, Inglaterra.
- L-3 Klein Associates, Inc. Disponível em: [http://www.l-3klein.com/?page\\_id=73](http://www.l-3klein.com/?page_id=73). [Consult. Abril 2013].
- Manual de Manobra do Navios Classe Andrómeda*, Texto não publicado, Ministério da Defesa Nacional, Marinha, Lisboa.
- Marine Magnetics Corp., SeaSpy Operational Manual Revision 5.0, Canada

- Marine Magnetism Corp. (2002), *SeaSpy Technical Application Guide*, revisão 1.4, Disponível em: <http://www.marinemagnetism.com/products/seaspy>. [Consult. Janeiro 2013].
- Marreiros, J. P. (2012), *Kinematic GNSS Precise Point Positioning - Applications to marine platforms*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto.
- MATLAB versão 2012b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- MathWorks Documentation Center, Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html?searchHighlight=Goodness+of+fit>. [Consult. Março 2013].
- Matos, J. L. (2001), *Fundamentos de Informação Geográfica*, 2ª edição, LIDEL Edições Técnicas, Lisboa
- Mendiratta, Sushil Kuma (1985), *Introdução ao electromagnetismo*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Miranda, J. M. (1989), *O levantamento aeromagnético de Portugal – Contribuição para o conhecimento da estrutura geológica do continente português*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.
- Miranda, J. M. (2009) *Introdução ao Geomagnetismo*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Miranda, J. M., Luís J. F., P. T. Costa. e F. A. M. Santos (2010) *Fundamentos de Geofísica*. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Murteira B., C. S. Ribeiro, J. A. Silva e C. Pimenta (2002), *Introdução à Estatística*, Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade Técnica de Lisboa, MacGraw-Hill, Lisboa.
- NAP (2001), *Oceanography and Mine Warfare*, The National Academy Press, Washington D.C. Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog/9773.html> [Consult. Janeiro 2013]
- NAP (2003), *Environmental Information for Naval Warfare*, The National Academy Press, Washington D.C. Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog/10176.html> [Consult. Janeiro 2013]
- Regan, R. e P. Rodriguez (1981), *An overview of the external magnetic field with regards to magnetic surveys*, *Geophysical Surveys*, 4, p. 255-296
- Samson, J. C. (1991), *Geomagnetic Pulsations and Plasma Waves in the Earth's Magnetosphere*, *Geomagnetism Vol. 4*
- Seeber G. (2003), *Satellite Geodesy*, 2<sup>nd</sup> edition, Walter de Gruyter GmbH & Co., Berlin
- Trahan, Russel E., Steven Yeadon and Maurice Thiele (1991), "Optimal Estimation of Layback for Marine Towed Cables", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No 2 p 217-222.

## **Referências Bibliográficas**

- Vickery, K. (1998). "Acoustic Positioning Systems "A practical overview of current systems"", *Dynamic Positioning Conference October 13-14, 1998* Disponível em: <http://www.dynamic-positioning.com/dp1998/svickery.pdf> [Consult. Janeiro 2013]
- Villate, Jaime E. (1999), *Electromagnetismo*, MacGraw-Hill, Lisboa.
- Wessex Archaeology Ltd. Disponível em: [http://www.wessexarch.co.uk/projects/marine/alsf/wrecks\\_seabed/index.html](http://www.wessexarch.co.uk/projects/marine/alsf/wrecks_seabed/index.html). [Consult. Março de 2013].
- Zanandrea, A. (1998), *Estudos de micropulsões geomagnéticas Pc3-5 em latitudes muito baixas no Brasil*, Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São João de Campos, Brasil.