

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE DEFESA**

**CLÁUDIA REIS DE ARAUJO**

**METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA ALINHAMENTO DOS SENSORES  
DE ARMAS DE UM NAVIO DE GUERRA**

**Rio de Janeiro**

**2011**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**CLÁUDIA REIS DE ARAUJO**

**METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA ALINHAMENTO DOS SENSORES DE  
ARMAS DE UM NAVIO DE GUERRA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Defesa.

Orientadores: Prof. Luiz Felipe Coutinho Ferreira da  
Silva, D.E. USP  
Prof. Roberto Ades, Dr. PUC-Rio

Rio de Janeiro  
2011

c2011

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

623.8225 A663m	Araujo, Cláudia Reis de Metodologia Alternativa para Alinhamento dos Sensores de Armas de um Navio de Guerra / Cláudia Reis de Araujo. – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2011. 103 p.: il.  Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2011.  1. Engenharia de defesa – teses, dissertações. 2. Tilt Test (teste de inclinação das bases). 3. navio de guerra. I. Título. II. Instituto Militar de Engenharia.
-------------------	--

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**CLÁUDIA REIS DE ARAUJO**

**METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA ALINHAMENTO DOS SENSORES DE  
ARMAS DE UM NAVIO DE GUERRA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Defesa.

Orientadores: Prof. Luiz Felipe Coutinho Ferreira da Silva, D.E. USP do IME  
Prof. Roberto Ades, Dr. PUC-Rio do IME

Aprovada em 30 de junho de 2011 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof. Luiz Felipe Coutinho Ferreira da Silva, D.E. USP do IME – Presidente

---

Prof. Roberto Ades, Dr. PUC-Rio do IME

---

Prof. Leonardo Castro de Oliveira, D.E. USP do IME

---

Prof. Flávio Luis de Mello, D.Sc. COPPE/UFRJ da UFRJ

Rio de Janeiro  
2011

*Ao meu pai José Onildo de Araujo (in memoriam) e a minha mãe Darly Reis de Araujo (in memoriam), pelo amor, carinho, atenção e dedicação, e em especial à minha querida e amada irmã Carla Reis de Araujo pelos sábios conselhos, pelo amor, atenção, carinho e paciência.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela força divina em todos os momentos do curso de mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Felipe Coutinho Ferreira da Silva, em especial, pela orientação, atenção, apoio, companheirismo, dedicação, otimismo, perseverança, amizade, força, paciência e valiosa experiência profissional. E, também, ao grande ser humano que é. Sempre com sábias palavras e ideais que muito me estimularam a seguir o meu caminho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. TC Roberto Ades, pela orientação, atenção, amizade, força e otimismo, que muito me ajudaram a seguir em frente.

Ao meu co-orientador, pela Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha (DSAM), CC (EN) Fernando Antonio Almeida Coelho, pela orientação, atenção e pelas ideias e sugestões.

À Marinha do Brasil e à Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha (DSAM), pela oportunidade concedida para a realização desse curso, que muito contribuiu para o meu crescimento como profissional.

Ao VA José Geraldo Fernandes Nunes pela oportunidade e por ter acreditado em mim.

Ao CMG (Rm1) Péricles, pelo apoio e força para a realização desse curso.

À CMG (Rm1) Ana Maria e ao CC (EN) Luiz Carlos pela amizade e incentivo para a realização do curso.

Ao CMG Valicente pela amizade e valiosa sugestão para o tema dessa pesquisa. Agradeço, também, ao CT André pelas sugestões para a realização desse trabalho.

À minha querida e amada irmã, de coração, Prof. Dra. Carla Reis de Araujo, pelo carinho, dedicação, atenção, amizade, companheirismo, força e orientação ao longo de todo o curso. Sempre com ideias e sugestões muito pertinentes. Agradeço por todo tempo dedicado a me ouvir, a me dar conselhos que muito me estimularam sempre a seguir em frente com muita perseverança para atingir meus objetivos.

Ao Prof. Dr. Leonardo Castro de Oliveira e ao Prof. M.Sc. Capitão Francisco Roberto da Rocha Gomes pela atenção dedicada, sempre com opiniões e sugestões muito proveitosas.

Ao Prof. Dr. Luciano Luporini Menegaldo e ao Laboratório de Projetos Mecânicos do IME pelo apoio no empréstimo dos equipamentos para a realização dos experimentos dessa dissertação.

Ao Prof. Dr. Itamar Borges Junior, coordenador da Pós-Graduação em Engenharia de Defesa, pelo apoio dado durante o curso de mestrado.

Aos CMG Araujo Mota, CMG (T) Araujo e CMG (EN) Cardoso pela amizade, orientação e pelos valiosos conselhos.

À minha querida amiga Mirian, pela atenção, delicadeza e carinho, pelas palavras de amizade, muito importantes, principalmente, nos momentos mais difíceis.

À minha estimada amiga Zilda, pela força de suas palavras, pelas orações, pelo carinho e atenção.

Ao querido amigo Dalton pelo carinho, atenção, conselhos e por sempre estar disposto a me ouvir.

Ao estimado amigo Thiago Guerra e à querida amiga Maria, os quais conheci durante a realização do curso, pelo companheirismo, carinho, opiniões e troca de informações, muito importantes ao longo dessa pesquisa.

Aos demais professores e funcionários do IME pelo aprendizado e auxílio, que de alguma forma, contribuíram para a conclusão do presente trabalho.

Aos profissionais do CASOP que gentilmente apoiaram nos primeiros experimentos de bancada. Em especial, aos CMG (Rm1) Cesar Augusto e CF França. Aos amigos Washington, Márvio e Rogério Freire, que, com suas valiosas experiências profissionais, contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos CMG (Rm1) Pagani, CMG (Rm1) Jannuzzi e Branquinho pela amizade, pelo apoio e incentivo para a realização desse mestrado.

Aos profissionais da DSAM que direta ou indiretamente me apoiaram para a realização desse curso.

Aos colegas do Ex-CETM, Lúcia, Leda, Horst, Laurentina, Aurora, Monteiro, Brasil, Oswaldo, Carlos Alberto, Valéria, Elisabeth, CC (EN) Auro, Flávio, Martins, Marcelo, Delta, Ilídio, Regina Celi, Cunha, Vanda, Giovani, Tatiana, Aurea, Cláudio, Brandão, Jesus, Lúcio, Denis, Douglas, Evandro, Sérgio e demais engenheiros, técnicos e funcionários pelo companheirismo e pelas palavras de carinho e apoio.

Aos meus “sobrinhos de pelo” Yanzinho e Dindin, pelo amor incondicional, pelas lambidas de carinho que sempre me revigoraram principalmente ao final de um longo dia de trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10	
LISTA DE TABELAS.....	12	
LISTA DE SIGLAS.....	13	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	Contextualização.....	17
1.2	Objetivo do Trabalho.....	18
1.3	Justificativa do Trabalho.....	19
1.4	Motivação do Trabalho.....	19
1.5	Organização da Dissertação.....	20
<b>2</b>	<b>TEORIA DO ALINHAMENTO.....</b>	<b>21</b>
2.1	Alinhamento do Sistema de Armas de um Navio de Guerra.....	21
2.2	Alinhamento do Sistema de Armas de um Navio de Guerra na Marinha Brasileira.....	22
2.3	Clinômetro.....	22
2.4	Principais Definições Relacionadas com o Alinhamento.....	23
2.4.1	Plano Diametral ou Longitudinal, Plano de Flutuação e Plano Transversal.....	24
2.4.2	Casco.....	24
2.4.3	Quilha.....	24
2.4.4	Proa.....	24
2.4.5	Popa.....	25
2.4.6	Linha de Centro do Navio.....	25
2.4.7	Bordos – Boreste (BE) e Bombordo (BB).....	26
2.4.8	Balanço.....	26
2.4.9	Banda.....	26
2.4.10	Caturro.....	26
2.4.11	Trim.....	27

2.4.12	Conteira.....	27
2.4.13	Plano de Passeio dos Roletes (PPR).....	28
2.4.14	Nível Mestre de Referência – <i>Master Level</i> (ML).....	29
2.5	<i>Tilt Test</i> (TT) – Teste de Inclinação das Bases.....	29
2.6	Metodologia Atual.....	32
2.6.1	Desenvolvimento Matemático da Metodologia Atual.....	35
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA POR ALINHAMENTO DIGITAL.....</b>	<b>40</b>
3.1	Desenvolvimento Matemático da Metodologia Proposta.....	41
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES, TESTES E EXPERIMENTOS.....</b>	<b>49</b>
4.1	Simulações com a Aplicação da Metodologia Atual.....	49
4.1.1	Análise dos Resultados das Simulações.....	52
4.2	Testes com a Aplicação da Metodologia Proposta.....	53
4.2.1	Análise dos Resultados dos Testes.....	55
4.3	Experimentos em Bancada Realizados na Marinha.....	61
4.3.1	Análise dos Resultados dos Experimentos em Bancada Realizados na Marinha.....	64
4.4	Experimentos em Bancada Realizados no IME.....	74
4.4.1	Análise dos Resultados dos Experimentos em Bancada Realizados no IME.....	79
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>89</b>
5.1	Sugestões para Futuros Trabalhos.....	91
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>95</b>
7.1	Tabela de Clinômetros / Inclinômetros Digitais.....	96
7.2	Planilha com os Cálculos das Simulações referente ao <i>Master Level</i> .....	CD
7.3	Planilha com os Cálculos da Metodologia Proposta.....	CD
7.4	Planilha com os Cálculos Complementares da Metodologia Proposta.....	CD
7.5	Planilha com os Cálculos dos Experimentos em Bancada Realizados no IME.....	CD
<b>8</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>101</b>

8.1	Dados Técnicos do <i>Digital Inclinometer</i> T7-1-232.....	CD
8.2	Dados Técnicos do Sensor Inercial 3DM-GX2.....	CD

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.2.1	Clinômetro analógico.....	23
FIG.2.2	Planos do casco e quilha.....	25
FIG.2.3	Esboço da vista superior de um navio, destacando proa, popa, bordos, linha de centro, ângulo de contera e o movimento de balanço.....	27
FIG.2.4	Esboço da lateral de um navio, destacando o movimento de caturro.....	28
FIG.2.5	Plano de Passeio dos Roletes (PPR) de um canhão.....	28
FIG.2.6	Clinômetro posicionado no <i>Master Level</i> para realização de <i>Tilt Test</i> .....	29
FIG.2.7	Docagem do navio nas condições de realização do <i>Tilt Test</i> .....	31
FIG.2.8	Clinômetro posicionado em trilho na plataforma de um radar para realização de <i>Tilt Test</i> .....	31
FIG.2.9	Inclinação relativa entre dois planos.....	32
FIG.2.10	Inclinação do PPR de um canhão em relação ao <i>Master Level</i> .....	32
FIG.2.11	Exemplo de inclinação do <i>Master Level</i> em relação ao plano horizontal.....	33
FIG.2.12	Exemplo de inclinação de um armamento em relação ao plano horizontal.....	33
FIG.2.13	Exemplo de decomposição do vetor inclinação relativa.....	34
FIG.2.14	Representação esquemática do Ponto Alto.....	35
FIG.2.15	Variações em $\alpha$ , $\theta$ , $A$ e $d$ .....	36
FIG.3.1	Esquema reduzido da interligação entre clinômetros e computador.....	40
FIG.3.2	Disposição dos clinômetros nos eixos X e Y.....	41
FIG.3.3	Ângulo detectado por $C_y$ .....	41
FIG.3.4	Ângulo detectado por $C_x$ .....	42
FIG.3.5	Inclinações $\mu_m$ e $\mu_a$ .....	42
FIG.3.6	Inclinações $\eta_m$ e $\eta_a$ .....	43
FIG.3.7	Inclinações relativas $\mu$ e $\eta$ .....	43
FIG.3.8	Plano Resultante.....	44
FIG.3.9	Decomposição dos vetores $\overrightarrow{OP_a}$ e $\overrightarrow{OQ_a}$ .....	45
FIG.3.10	Ângulo diedro entre dois planos.....	47
FIG.4.1	Valores calculados para $X_1$ , $X_1^2$ , $X_2$ e $X_2^2$ .....	50
FIG.4.2	Valores calculados para $X_1.X_2$ , $Y$ (Grau e Rad), $X_1.Y$ e $X_2.Y$ .....	50

FIG.4.3	Cálculo dos somatórios para Y, X1, X2, X1 <sup>2</sup> , X2 <sup>2</sup> , X1.X2, X1.Y e X2.Y.....	51
FIG.4.4	Cálculo dos coeficientes a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> e a <sub>2</sub> .....	51
FIG.4.5	Ponto Alto calculado para o <i>Master Level</i> .....	52
FIG.4.6	Parte dos dados obtidos em três <i>Tilt Tests</i> realizados em navios da Marinha.....	54
FIG.4.7	Parte dos cálculos dos planos formados pelos 36 pares de leituras ortogonais...	55
FIG.4.8	<i>Digital Inclinometer</i> modelo T7-1-232, uniaxial.....	61
FIG.4.9	Estrutura montada para o experimento em bancada.....	62
FIG.4.10	Clinômetros posicionados no <i>Master Level</i> .....	62
FIG.4.11	Clinômetros posicionados na Mesa Giratória.....	63
FIG.4.12	Posicionamento dos clinômetros A, B, C e D durante as 4 corridas.....	63
FIG.4.13	Convenção adotada para $\mu$ e $\eta$ .....	66
FIG.4.14	Sensor inercial 3DM-GX2, da <i>MicroStrain</i> .....	74
FIG.4.15	Arranjo para realização dos testes em bancada no IME.....	75
FIG.4.16	Tela do <i>laptop</i> com o <i>software</i> Inertia – Link 1.2.....	76
FIG.4.17	Base niveladora posicionada em cima da base de madeira (plano horizontal)....	76
FIG.4.18	Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base niveladora.....	77
FIG.4.19	Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base de madeira (plano horizontal) sem a base niveladora.....	77
FIG.4.20	Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base de madeira com inclinação I.....	78
FIG.4.21	Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base de madeira com inclinação II.....	78
FIG.4.22	Senóide referente às leituras de X.....	80
FIG.4.23	Senóide referente às leituras de Y.....	80
FIG.4.24	Parte de arquivo transferido para o <i>laptop</i> .....	81
FIG.4.25	Cálculos para obtenção da elevação para a inclinação I, referente ao sensor N/S 1710.....	86
FIG.4.26	Representação do arranjo montado.....	88

## LISTA DE TABELAS

TAB.4.1	Valores calculados para o ponto Alto de cada elemento.....	52
TAB.4.2	Comparação entre os valores do Ponto Alto para cada elemento.....	57
TAB.4.3	Ponto Alto encontrado <i>versus</i> Tolerância.....	59
TAB.4.4	Valores percentuais.....	60
TAB.4.5	Instantes observados <i>versus</i> taxa de aquisição.....	65
TAB.4.6	Resultados obtidos no Experimento 1.....	67
TAB.4.7	Resultados obtidos no experimento 2.....	68
TAB.4.8	Resultados obtidos no Experimento 3.....	69
TAB.4.9	Resultados obtidos no Experimento 4.....	70
TAB.4.10	Resultados obtidos no Experimento 5, não considerando-se a orientação dos eixos.....	71
TAB.4.11	Resultados obtidos no Experimento 5, considerando-se a orientação dos eixos.....	71
TAB.4.12	Resultados obtidos no Experimento 6.....	73
TAB.4.13	Leituras iniciais.....	79
TAB.4.14	Médias calculadas para o sensor N/S 1710.....	82
TAB.4.15	Médias calculadas para o sensor N/S 1798.....	82
TAB.4.16	Leituras e cálculos para a inclinação I, referentes ao sensor N/S 1710.....	84
TAB.4.17	Leituras e cálculos para a inclinação I, referentes ao sensor N/S 1798.....	84
TAB.4.18	Leituras e cálculos para a inclinação II, referentes ao sensor N/S 1710.....	85
TAB.4.19	Leituras e cálculos para a inclinação II, referentes ao sensor N/S 1798.....	85
TAB.4.20	Resultados do Ponto Alto das inclinações I e II.....	87

## LISTA DE SIGLAS

AMRJ	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
AO	Alça Ótica
AOP	Alça Optrônica
AR	A Ré
ARM	Armamento
AV	A Vante
BB	Bombordo
BE	Boreste
C	Conteira
CAN	Canhão
CASOP	Centro de Apoio a Sistemas Operativos
CVB	Corveta Bravo (nome fictício)
CVF	Corveta Foxtrot (nome fictício)
DIF	Diferença
E	Elevação
EL	Elemento
FL	Fragata Lima (nome fictício)
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IME	Instituto Militar de Engenharia
LM1	Lançador de Míssel 1
LM2	Lançador de Míssel 2
INC	Inclinação
LONG	Longitudinal
MB	Marinha do Brasil
ML	<i>Master Level</i>
NV	Navio
PA	Ponto Alto
PH	Plano Horizontal
PPR	Plano de Passeio dos Roletes

RBAS	Radar de Busca Aérea e Superfície
RDT	Radar de Direção de Tiro
TOL	Tolerância
TRANS	Transversal
TT	<i>Tilt Test</i>

## RESUMO

Este trabalho mostra o estudo de uma nova metodologia para realização do *Tilt Test*. O *Tilt Test* (Teste de Inclinação das Bases) consiste na verificação do nivelamento das bases dos armamentos de um navio de guerra em relação ao *Master Level* (Nível Mestre de Referência) do mesmo. Essa metodologia alternativa propõe a realização dessa atividade sem a necessidade do navio estar dentro de um dique (docagem). Atualmente, o *Tilt Test* é realizado com o navio docado, durante a noite e dura aproximadamente cinco dias, ocasionando restrições às principais atividades do navio e consideráveis custos. São utilizados clinômetros analógicos e mão-de-obra especializada para a realização das leituras de inclinação. A proposta desse trabalho é a utilização de clinômetros eletrônicos no *Master Level* e nos armamentos, interligados a um computador. Os cálculos das inclinações serão feitos a partir de leituras simultâneas e contínuas, em tempo real. Os resultados obtidos nas primeiras simulações deram indícios de sucesso, quando comparados com os obtidos pelo método atual seguido pela Marinha. Dentre eles, podem ser destacados os valores encontrados para o *Master Level* com base nas leituras obtidas em três *Tilt Tests* realizados pela Marinha Brasileira. Os experimentos em laboratório mostraram que posicionando-se um clinômetro triaxial em um plano, torna-se possível a análise das inclinações geradas pelas rotações dos eixos X e Y. Utilizando-se os valores das leituras dessas duas inclinações no método matemático proposto, torna-se possível o cálculo da inclinação de cada plano, individualmente, em relação ao plano horizontal. Consequentemente, pode ser gerado o cálculo da inclinação relativa desse plano em relação a outro plano, que seria o plano de referência. No caso do navio de guerra, esse plano de referência é representado pelo *Master Level*.

Palavras-Chave: nivelamento de bases, armamentos, *Tilt Test*, *Master Level*, clinômetros.

## ABSTRACT

This work shows the study of a new methodology to realize *Tilt Test*. The *Tilt Test* (Test of Inclination of the Bases) consists in verify the levelling of the bases of the armaments of a warship in relation to the *Master Level* (Reference Master Level) of the ship. This alternative methodology proposes the realization of this activity without the necessity of the ship being inside a dock. Nowadays, the *Tilt Test* is performed with the ship inside a dock, during the night and takes approximately five days, causing restrictions to the main activities of the ship and considerable costs. They use analogical clinometers and specialized technicians to make the readings of inclination. The proposal of this work is to use electronic clinometers in the *Master Level* and in the armaments, linked to a computer. The calculations of the inclinations will be done after simultaneous and continuous readings, in real time. After the first tests, the proposed methodology reached good results when compared to current method followed by the Navy. Among them, the results obtained for the *Master Level* can be detached. These results were provided by calculations using the readings of three *Tilt Tests* carried out by the Brazilian Navy. The experiments in laboratory had shown that when a triaxial clinometer is positioned in a plane, it becomes possible to analyze the inclinations generated by rotation of X and Y axis. Using the reading values of these two inclinations in the considered mathematical method, it becomes possible to calculate the inclination of each plane, individually, in relation to the horizontal plane. Then, the calculation of the relative inclination of this plane in relation to another plane, which would be the reference plane, can be generated. In the case of a warship, the reference plane is represented by the *Master Level*.

Keywords: levelling of bases, armaments, *Tilt Test*, *Master Level*, clinometers.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Um navio de guerra normalmente possui um sistema de armas composto de radares, canhões, lançadores de mísseis e plataformas com equipamentos óticos e oprônicos. Para que esse sistema de armas localize, identifique, acompanhe e destrua um alvo, é fundamental que todos os seus componentes, principalmente os sensores externos, estejam alinhados corretamente, respeitando-se a tolerância de cada equipamento. Com os avanços alcançados na pesquisa científica e, conseqüentemente, na produção de armamentos, os alvos são detectados, classificados e eliminados em distâncias cada vez maiores. Para que se tenha benefícios com esses avanços, é essencial que os alinhamentos sejam realizados com a máxima precisão possível. Para se ter uma ideia do alcance de alguns equipamentos, existem radares de busca aérea com o alcance médio de 120 km; radares de direção de tiro com alcance médio de 40 km e radares de navegação com alcance médio de 25 km. Com referência a canhões, existem, por exemplo, canhões com 40mm de calibre com alcance de 10 km e canhões com calibre de 4,5" com alcance de 20 km (ÁREA MILITAR, 2010).

O *Tilt Test* (TT), Teste de Inclinação das Bases, consiste na verificação das inclinações das bases dos armamentos em relação ao *Master Level* (ML) - Nível Mestre de Referência do navio. Ele representa uma das etapas do alinhamento do sistema de armas de um navio de guerra. Atualmente, essa atividade é realizada com o navio dentro de um dique (docagem), com a utilização de clinômetros analógicos para a verificação das inclinações das bases. Entende-se por *Master Level* (ML), uma placa de aço fixada à quilha do navio que serve como referência para as medições das inclinações das bases dos armamentos. A quilha consiste em uma peça disposta em todo comprimento do navio, sendo considerada a primeira referência longitudinal do mesmo (FONSECA, 1989). A metodologia alternativa, proposta por esse trabalho, envolve a utilização de clinômetros digitais, os quais serão instalados no *Master Level* e nos armamentos. Todos os clinômetros serão interligados a um computador e registrarão leituras de inclinação das bases, simultâneas e contínuas, em tempo real. Essas leituras serão coletadas e armazenadas pelo computador e servirão de base para os cálculos do Ponto Alto da base de

cada elemento em relação ao Plano Horizontal. O Ponto Alto é representado pelo valor da máxima inclinação do plano da base do elemento e da conteira (ou azimute) correspondente.

Clinômetros e outros instrumentos, como por exemplo acelerômetros e extensômetros, podem ser utilizados para medir deformações, acelerações e deslocamentos. Esses equipamentos, em conjunto com outros dispositivos, possibilitam a verificação do comportamento estático e dinâmico das estruturas (LAROCCA, 2004).

No passado, os alinhamentos em navios eram realizados através de instrumentos óticos. Basicamente, era montado um arranjo ótico num sensor mestre e um arranjo similar numa base escrava. Cada um desses dispositivos era posicionado em relação a uma referência externa, por exemplo uma estrela (UNITED STATES PATENT, LACKOWSKI, 1974).

Inicialmente, antes da decisão por clinômetros digitais, foi cogitada a possibilidade da utilização de equipamentos GPS (*Global Positioning System*). A tecnologia GPS pode ser empregada para monitorar deslocamentos de estruturas como viadutos e pontes de concreto armado. Esses deslocamentos normalmente são causados pelo próprio peso das estruturas, mudanças de temperatura, cargas estáticas e móveis, etc. (PACILÉO NETTO, et al., 2002). Devido a boa precisão das medidas fornecida pela tecnologia GPS, esta também pode ser utilizada para monitorar vibrações, ocasionadas por ventos fracos, em estruturas medindo em torno de 250 m de altura. Essas estruturas podem ser chaminés industriais e torres de TV (PETER BREUER et al., 2002). O monitoramento dinâmico de estruturas antigas também pode ser realizado com o emprego da tecnologia GPS. Os resultados desse tipo de monitoramento podem ser úteis para a análise do desempenho de algumas construções, por exemplo, durante movimentações extremas causadas por terremotos e ventos fortes (M. ÇELEBI, 2000).

A hipótese da utilização da tecnologia GPS foi descartada devido a dificuldade de recepção de sinal ocasionada pelo posicionamento do GPS no interior do navio de guerra.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo criar uma metodologia alternativa para verificação do nivelamento de bases dos armamentos em relação ao *Master Level* (ML) - Nível Mestre de Referência do navio, evento este, conhecido como *Tilt Test* (TT), sem a necessidade do

mesmo estar dentro de um dique (docagem). O navio poderá estar atracado no cais ou flutuando sem restrição de movimentos, bem como da presença de pessoas a bordo do mesmo.

### 1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Uma pesquisa bibliográfica preliminar demonstrou a inexistência de artigos que tratam do assunto em questão. Portanto, pode ser considerado um tema pouco estudado. Além desse fato, essa proposta, inovadora na Marinha do Brasil (MB), se justifica devido aos custos envolvidos em cada atividade de *Tilt Test*. Esses custos giram em torno de R\$ 100.000,00 e englobam a docagem do navio, o aluguel do próprio dique, rebocadores e a mão-de-obra do pessoal envolvido no evento. Além disso, evitará uma grande restrição das principais atividades do navio por, aproximadamente, cinco dias, proporcionando economia de gastos e otimização de tempo.

### 1.4 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Baseado em relatos de oficiais de Marinha com experiência no comando de navios de guerra, nunca foi cogitada a possibilidade da realização do *Tilt Test* com a utilização de um procedimento diferente do que é seguido atualmente pela Marinha do Brasil. Normalmente, quando acredita-se num procedimento tradicional, até mesmo pelo fato de que já foi realizado diversas vezes, originando resultados positivos, existe uma grande resistência para a aceitação de mudanças. Daí, uma grande motivação para a realização do desenvolvimento da pesquisa dessa metodologia alternativa para a realização do *Tilt Test*. Logicamente, deverá ser realizada a análise e comparação de resultados entre os dois métodos. Em se encontrando conclusões positivas, o método proposto certamente trará uma grande economia de custos, assim como, otimização do tempo gasto na atividade de *Tilt Test*.

Um outro fato a ser comentado é que essa nova metodologia para a execução do TT poderá proporcionar uma maior independência para as equipes de manutenção brasileiras.

Isso pode ser aplicado quando houver informações incompletas sobre os equipamentos e sistemas e os manuais técnicos não suprirem totalmente as necessidades dos técnicos brasileiros.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, seguida da contextualização em que ele está inserido, seu objetivo, justificativa e motivação.

No segundo capítulo está contido todo o suporte teórico necessário para o desenvolvimento e entendimento da dissertação. Inicialmente, apresenta-se um esclarecimento sobre o alinhamento do sistema de armas de um navio de guerra de um modo geral e na Marinha Brasileira, como também, sobre o clinômetro, o qual pode ser considerado uma peça fundamental para o trabalho. A seguir, aparecem as principais definições relacionadas com o alinhamento e apresenta-se a definição de *Tilt Test*. Finalmente, é realizada uma descrição da metodologia do *Tilt Test* atualmente executada pela Marinha, assim como, do seu desenvolvimento matemático.

O terceiro capítulo descreve a metodologia alternativa que está sendo proposta para a realização do *Tilt Test*, como também, todo o seu desenvolvimento matemático.

O quarto capítulo trata das simulações, testes e experimentos realizados ao longo do trabalho. São descritas as simulações, aplicando-se a metodologia atual, os testes, utilizando-se a metodologia proposta e, finalmente, os experimentos em bancada. Após cada um desses eventos, segue a análise dos resultados.

No capítulo cinco estão as conclusões da dissertação e as sugestões para futuros trabalhos.

Em seguida, encontram-se as referências bibliográficas, os apêndices e os anexos.

## 2 TEORIA DO ALINHAMENTO

### 2.1 ALINHAMENTO DO SISTEMA DE ARMAS DE UM NAVIO DE GUERRA

O sistema de armas de um navio de guerra é formado pela integração de vários equipamentos e subsistemas. Essa integração requer uma correta troca de dados entre os vários componentes desse sistema de armas para que ele funcione apropriadamente. Para garantir essa correta troca de dados, os equipamentos e os subsistemas devem estar alinhados em relação a uma referência comum. O objetivo do alinhamento do sistema de armas de um navio de guerra é que todos os seus elementos, quando direcionados, apontem para um mesmo ponto no espaço. Para se atingir a efetividade da qual um sistema de armas é capaz, cada equipamento deve ser alinhado levando-se em conta as tolerâncias de fabricação e o próprio ambiente no qual o elemento irá operar. Assim, pode-se garantir o desempenho esperado de cada subsistema.

O alinhamento do sistema de armas de um navio de guerra, em geral, é executado em três fases: a primeira com o navio docado (dentro de um dique), a segunda com o navio atracado no porto e a terceira com o navio no mar. Na fase de docagem é realizado o *Tilt Test*, o alinhamento mecânico, no qual são ajustados os zeros dos indicadores de elevação e conreira dos armamentos, item 2.4.12 e FIG. 2.5, e, finalmente, o alinhamento elétrico. Esse último garante que os elementos que recebem os comandos do armamento e os elementos que transmitem a sua posição estejam corretamente referenciados ao zero mecânico da instalação. Na fase do navio no porto, são realizados alinhamentos elétricos como ajustes dos sistemas servos e testes de transmissão que garantem que a instalação está obedecendo corretamente os comandos que estão sendo enviados a ela. Nessa fase, também são executados os alinhamentos estáticos por objeto distante, onde são alinhados, entre si, componentes diferentes de um mesmo sistema. Na fase de mar, são verificados os alinhamentos em elevação, utilizando-se o horizonte bem definido. No mar também são realizados os alinhamentos dinâmicos, quando são verificados os alinhamentos realizados anteriormente em condições reais de operação dos sistemas.

Nesse trabalho, será tratado especificamente o *Tilt Test* (TT), o qual é executado na fase em que o navio está docado.

## 2.2 ALINHAMENTO DO SISTEMA DE ARMAS DE UM NAVIO DE GUERRA NA MARINHA BRASILEIRA

As atividades de alinhamento dos sistemas de armas dos navios de guerra brasileiros receberam um grande impulso após a chegada das Fragatas Classe Niterói. Esses navios são oriundos da Inglaterra e chegaram ao Brasil na década de 70. Esse impulso foi acionado pelas exigências técnicas relacionadas com os parâmetros, tolerâncias e dados dos equipamentos instalados a bordo desses navios. Novas atividades de manutenção, compostas de verificações e ajustagens, tiveram que ser incluídas nos procedimentos de alinhamento, até então, executados. Foi criado, então, o conceito de “manutenção do alinhamento”, o qual simbolizou a organização em termos de responsabilidades de planejamento, execução dos alinhamentos e o estabelecimento das periodicidades.

## 2.3 CLINÔMETRO

O Clinômetro é um instrumento utilizado para medir a inclinação entre duas superfícies planas. Os mais antigos são analógicos, conforme a FIG. 2.1, compostos basicamente de um nível de bolha, um tambor de ajuste e uma escala graduada (mostrador de graus). A leitura no clinômetro é feita diretamente a partir de suas escalas. Para tanto: 1) posiciona-se o clinômetro na superfície em que se deseja medir a inclinação, 2) a seguir, gira-se o tambor com o objetivo de trazer a bolha para o centro; 3) finalmente, a leitura de inclinação é composta dos valores lidos na escala do mostrador de graus e na escala de minutos. Os mais modernos já são digitais. Atualmente, os clinômetros podem ser uniaxiais, biaxiais e triaxiais. Alguns exemplos de clinômetros podem ser visualizados no APÊNDICE 7.1.

No *Tilt Test*, os clinômetros medem as inclinações das bases ou dos Planos de Passeio dos Roletes (PPR), item 2.4.14, das instalações dos armamentos em relação ao Plano

Horizontal. Os clinômetros devem ser fixados na estrutura de forma cuidadosa e protegida, como também, devem passar por processos periódicos de manutenção e calibração para produzirem leituras confiáveis (LAROCCA, 2004).

Durante esse trabalho, foi realizada uma pesquisa no mercado nacional e internacional sobre clinômetros digitais que poderiam ser utilizados na fase experimental dessa dissertação. Essa pesquisa constitui o APÊNDICE 7.1.

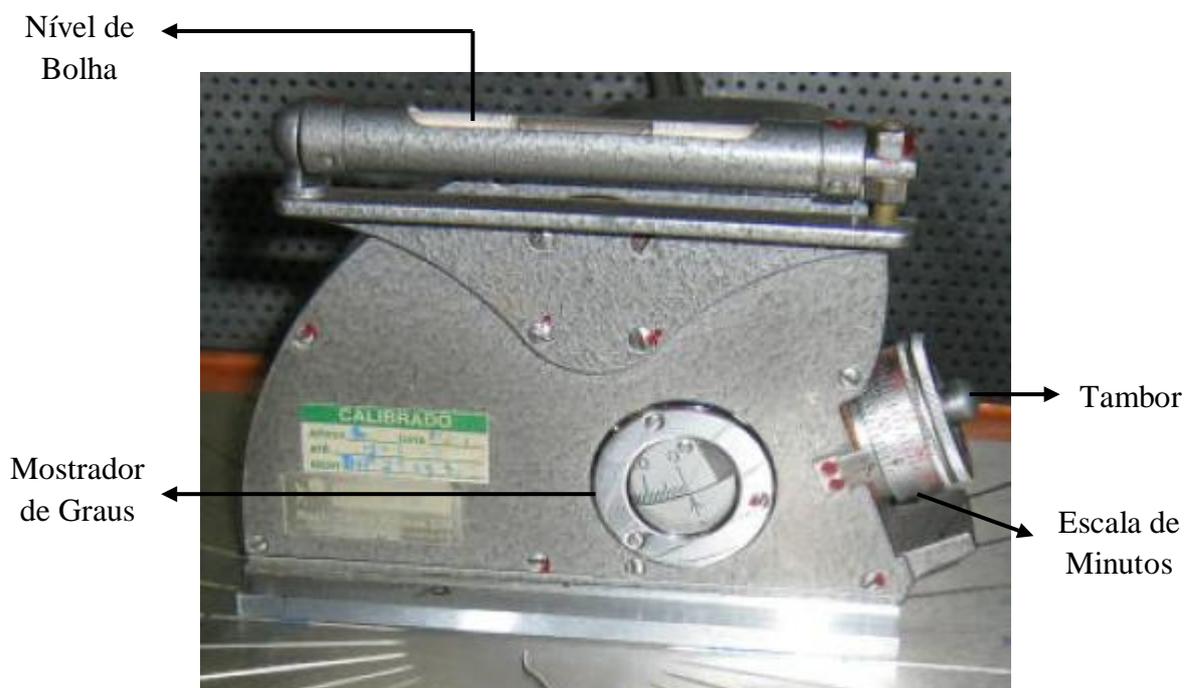


FIG. 2.1 Clinômetro analógico.

## 2.4 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES RELACIONADAS COM O ALINHAMENTO

A seguir, serão definidos alguns itens considerados importantes para o entendimento desse trabalho.

#### 2.4.1 PLANO DIAMETRAL OU LONGITUDINAL, PLANO DE FLUTUAÇÃO E PLANO TRANSVERSAL

Segundo FONSECA (1989), o plano diametral ou longitudinal é o plano de simetria encontrado nos cascos dos navios. Esse plano passa pela quilha e é perpendicular ao plano de flutuação do navio. O Plano transversal é perpendicular aos planos longitudinal e de flutuação. Todos esses planos podem ser visualizados na FIG. 2.2.

#### 2.4.2 CASCO

O casco é o corpo do navio sem os mastros, equipamentos ou qualquer tipo de acessório. A sua forma tem um plano de simetria, o qual seria o plano diametral (FONSECA, 1989).

#### 2.4.3 QUILHA

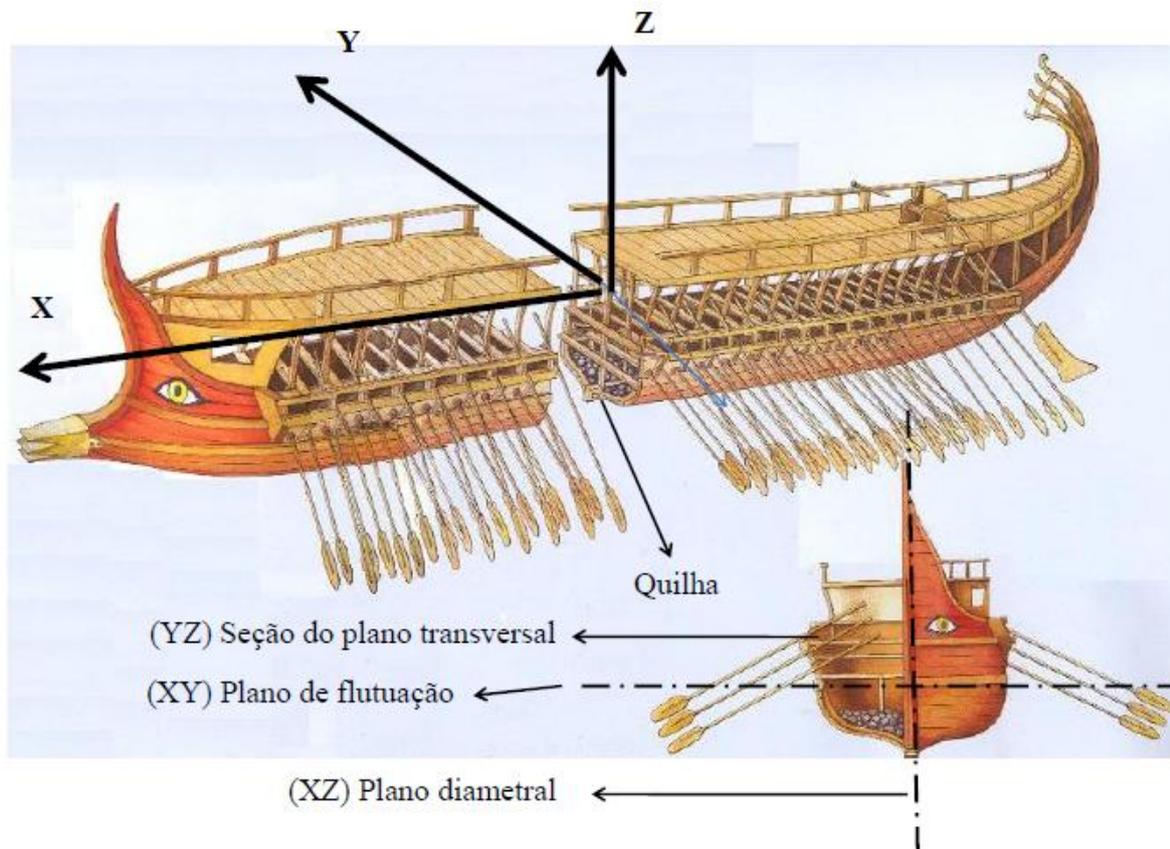
Conforme FIG. 2.2, a quilha consiste numa peça disposta em todo o comprimento do casco no plano diametral e na parte mais baixa do navio. Ela é o principal elemento estrutural e a primeira referência longitudinal do navio. A partir dela, o navio é construído e pode ser considerada a sua “espinha dorsal” (FONSECA, 1989).

#### 2.4.4 PROA

De acordo com a FIG. 2.3, a proa é definida pela extremidade anterior do navio, no sentido de sua marcha normal (FONSECA, 1989).

#### 2.4.5 POPA

Conforme a FIG. 2.3, a popa é definida pela extremidade posterior do navio (FONSECA, 1989).



Fonte: <http://www.paideuma.net/s4a.htm>

FIG. 2.2 Planos do casco e quilha.

#### 2.4.6 LINHA DE CENTRO DO NAVIO

A Linha de Centro do Navio consiste na linha de proa a popa do navio. Ela é derivada da quilha e está contida no plano longitudinal do navio, conforme a FIG. 2.3.

#### 2.4.7 BORDOS – BORESTE (BE) e BOMBORDO (BB)

Os bordos são definidos pelas duas partes simétricas em que o casco é dividido pelo plano longitudinal. Imaginando-se um observador posicionado no plano longitudinal e olhando para a proa, Boreste (BE) é a parte à direita e Bombordo (BB) é parte à esquerda (FONSECA, 1989), de acordo com a FIG. 2.3.

#### 2.4.8 BALANÇO

Balanço é o movimento (jogo) do navio no sentido transversal, ou seja, de um bordo a outro (FONSECA, 1989), conforme a FIG. 2.3. Na FIG. 2.2 representa a rotação em torno do eixo X.

#### 2.4.9 BANDA

Banda é a inclinação do navio para um dos bordos (bombordo ou boreste) (FONSECA, 1989). Diferencia-se do balanço por ser estática.

#### 2.4.10 CATURRO

Caturro é o movimento (jogo) do navio, no sentido de proa a popa (FONSECA, 1989), de acordo com a FIG. 2.4. Na FIG. 2.2 representa a rotação em torno do eixo Y.

#### 2.4.11 TRIM

Trim é a inclinação do navio para uma das extremidades (popa ou proa) (FONSECA, 1989). Diferencia-se do caturro por ser estático.

#### 2.4.12 CONTEIRA

A conteira é definida pela marcação em que se encontra um determinado objeto. Ou melhor, é o ângulo formado, a partir da proa, no sentido horário, entre a linha de centro do navio e o objeto, conforme a FIG. 2.3.

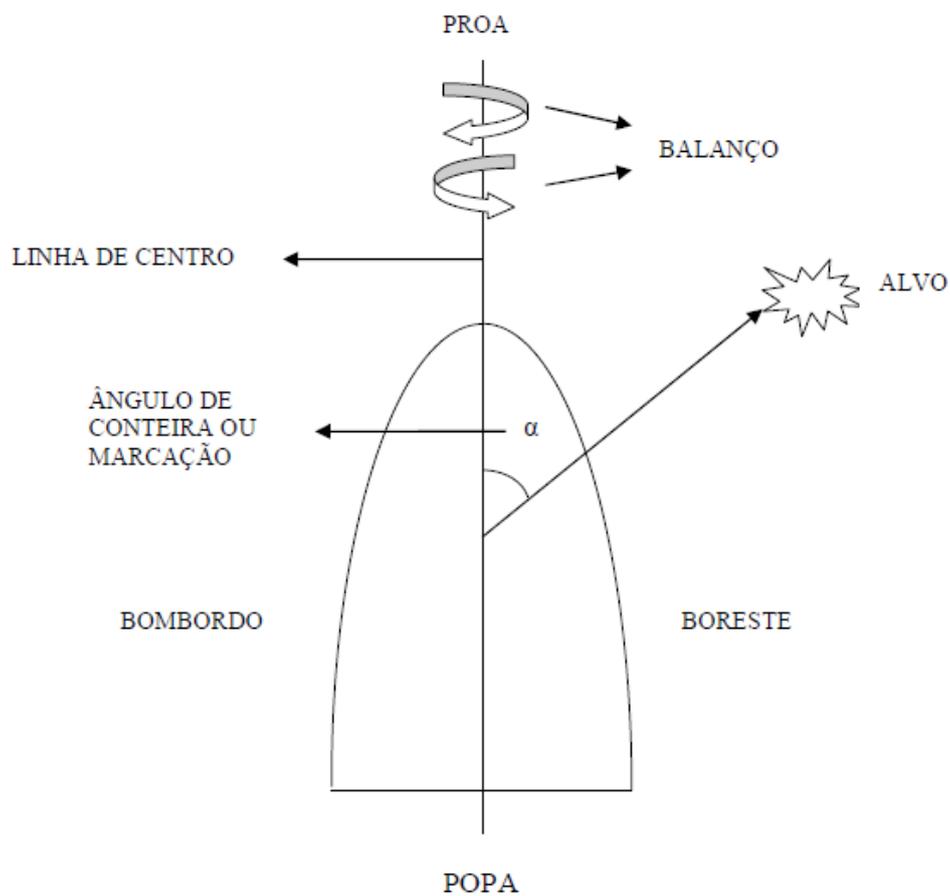


FIG. 2.3 Esboço da vista superior de um navio, destacando proa, popa, bordos, linha de centro, ângulo de conteira e o movimento de balanço.

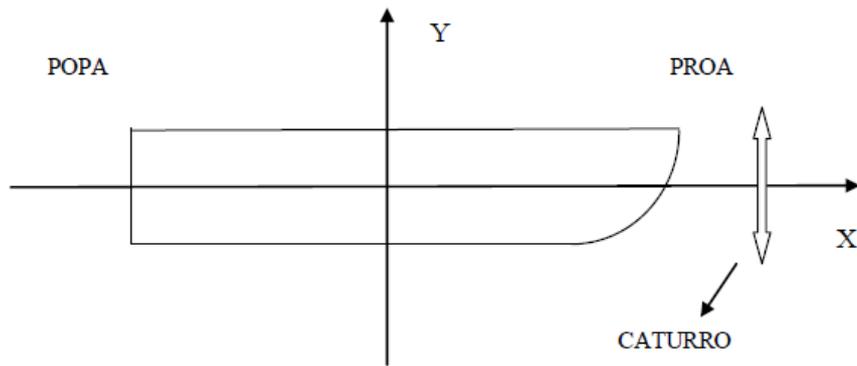
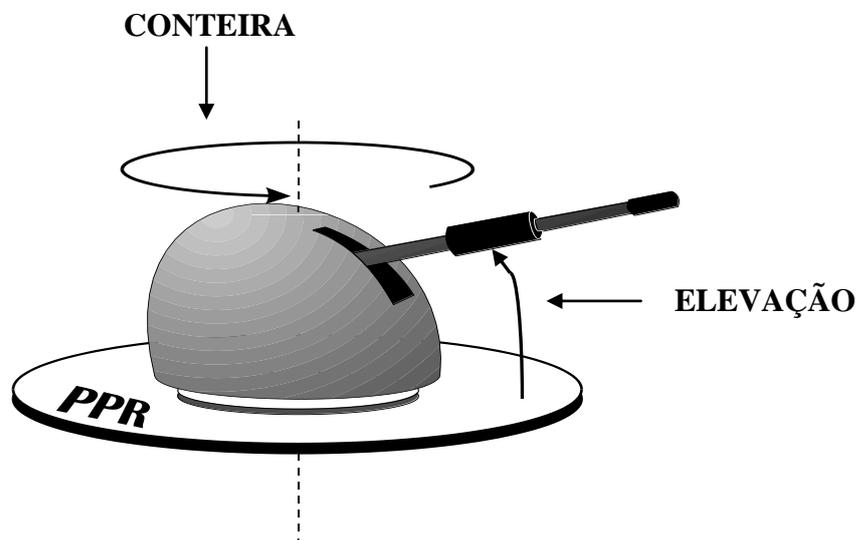


FIG. 2.4 Esboço da lateral de um navio, destacando o movimento de caturro.

### 2.4.13 PLANO DE PASSEIO DOS ROLETES (PPR)

O Plano de Passeio dos Roletes (PPR), FIG. 2.5, é a superfície sobre a qual o armamento se movimenta em conreira. O Plano de Passeio dos Roletes de um armamento é utilizado como referência para o seu movimento de elevação.

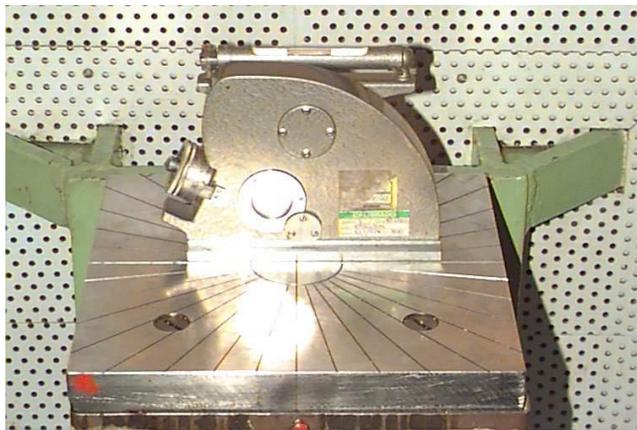


Fonte: Notas de aula do Curso de Alinhamento do CASOP, 2009.

FIG. 2.5 Plano de Passeio dos Roletes (PPR) de um canhão.

#### 2.4.14 NÍVEL MESTRE DE REFERÊNCIA – *MASTER LEVEL* (ML)

O Nível Mestre de Referência – *Master Level* (ML) é uma placa de aço paralela ao plano de flutuação do navio. O *Master Level* (ML) é a referência para as medições das inclinações dos PPR (Plano de Passeio dos Roletes) dos armamentos. A placa de aço é fixada à quilha do navio de modo a impedir oscilações que possam afetar a precisão dos alinhamentos. Ela é polida, possui tampa de proteção e apresenta marcas radiais a cada 10° (de 0° a 360°), como pode ser observado na FIG. 2.6. A sua marcação 000° é alinhada à linha de centro do navio.



Fonte: Notas de aula do Curso de Alinhamento do CASOP, 2009.

FIG. 2.6 Clinômetro posicionado no *Master Level* para realização de *Tilt Test*.

#### 2.5 *TILT TEST* (TT) – TESTE DE INCLINAÇÃO DAS BASES

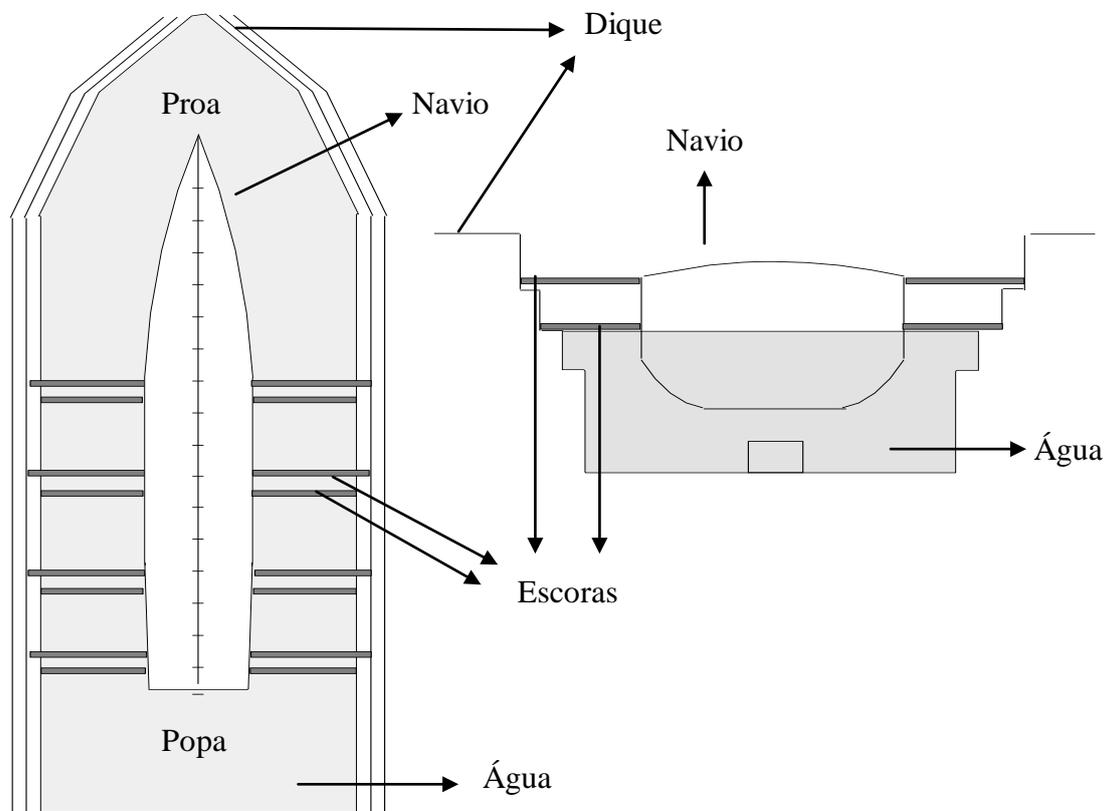
O *Tilt Test* (TT) – Teste de Inclinação das Bases - consiste na verificação das inclinações das bases dos armamentos em referência ao *Master Level* (ML). Deverá ser observado se essas bases estão paralelas ao ML, ou melhor, paralelas entre si. São medidas as inclinações dos Planos de Passeio dos Roletes (PPR) dos armamentos em relação ao ML. De acordo com a FIG. 2.7, para a realização desse evento, o navio deve estar em dique alagado, escorado e mantido rigidamente estático. A finalidade do escoramento é manter a verticalidade do navio. Nas corvetas, ele consiste ao todo de 16 escoras, sendo 8 em cada bordo dispostas em duas fileiras (superior e inferior) com 4 escoras cada. A tolerância para banda e trim é de 5'. O

peso a bordo, referente à quantidade de óleo, munição e aguada, é mantido em condições normais. A máxima estabilidade é mantida, eliminando-se fontes que possam causar oscilações e movimentos do navio, como por exemplo, o excesso de trânsito de pessoal a bordo e máquinas operando. O *Tilt Test* é executado à noite para eliminar interferências que causem vibrações nos clinômetros e alterações estruturais devido às oscilações térmicas.

A equipe que participa do *Tilt Test* é composta por um condutor do teste, o qual é o chefe da equipe, e operadores de clinômetro para cada plataforma ou posto a ser verificado, incluindo o *Master Level*. Alguns membros da tripulação do navio também participam da atividade para operar os equipamentos a serem medidos. Os postos devem ter comunicação entre si, bem como iluminação adequada. Os clinômetros analógicos, com precisão de leitura de 15 segundos de arco, são posicionados nas bases dos armamentos, FIG. 2.8, e no ML, FIG. 2.6, e são realizadas leituras a cada 10 graus de coneira (0 à 350 graus). Alguns equipamentos já possuem bases específicas para instalação dos clinômetros, em formato de trilhos, para que fiquem totalmente imóveis durante as medições. Para outros, existe a necessidade de instalação e adaptação de bases para os clinômetros. Sequencialmente, são coletadas as leituras dos clinômetros e essas introduzidos em um programa desenvolvido pelo CASOP (Centro de Apoio a Sistemas Operativos) – Programa *Tilt Test*. Este programa calcula as correções a serem implementadas no sistema operacional do navio, caso os valores de inclinação encontrados excedam as tolerâncias especificadas para cada armamento. A inclinação relativa de cada equipamento é representada pela subtração entre as inclinações absolutas das bases dos armamentos e o valor da inclinação medida no *Master Level*.

A periodicidade para a realização do *Tilt Test* depende da própria vida operativa do navio, durante a qual podem ocorrer pequenas deformações, desgastes e avarias que normalmente alteram o paralelismo entre as bases dos armamentos, comprometendo a eficácia do sistema de armas. O primeiro *Tilt Test* é realizado pelo estaleiro construtor após a instalação dos equipamentos no navio. O segundo é realizado após o término das provas de mar e antes da aceitação formal do navio pelo setor operativo. A seguir, após o navio completar um ano de serviço, é recomendada a realização de um novo *Tilt Test*, visto que nem sempre são perfeitamente conhecidos os primeiros esforços sofridos pela estrutura do navio em condições operativas normais. Posteriormente, o *Tilt Test* é realizado após um longo período de reparos ou de modernização do navio, na qual pode ocorrer a substituição de armamentos por outros mais modernos. Após grandes reparos decorrentes de avarias e quando houver indícios de que

os valores atuais das inclinações estão fora das tolerâncias, comprometendo o desempenho do sistema de armas.



Fonte: Notas de aula do Curso de Alinhamento do CASOP, 2009.

FIG. 2.7 Docagem do navio nas condições de realização do *Tilt Test*.

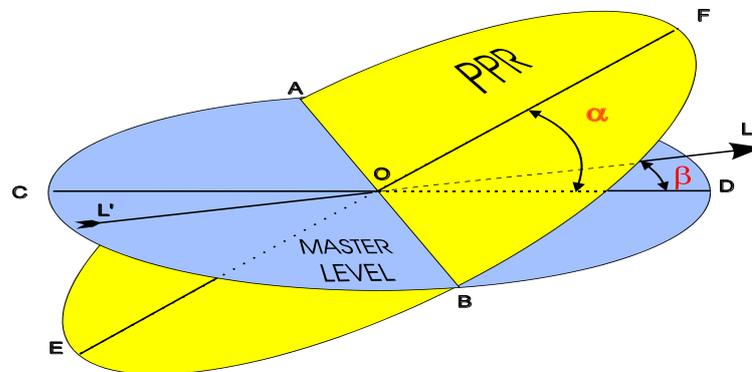


Fonte: Notas de aula do Curso de Alinhamento do CASOP, 2009.

FIG. 2.8 Clinômetro posicionado em trilho na plataforma de um radar para realização de *Tilt Test*.

## 2.6 METODOLOGIA ATUAL

A inclinação entre o Plano de Passeio dos Roletes (PPR) de um armamento e o *Master Level* (ML) é representada pelo Ponto Alto. O Ponto Alto é representado pelo valor da máxima inclinação do plano da base do elemento e da conteira (ou azimute) correspondente. Na FIG. 2.9, a linha AB representa a interseção entre o plano de referência ML e o PPR de um armamento qualquer. A inclinação entre os dois planos é representada pelo ângulo  $\alpha$ , FIG. 2.9 e 2.10; e a conteira, onde esta inclinação ocorre, pelo ângulo  $\beta$ , FIG. 2.9. O vetor L'L representa a linha de centro do navio e está contido no plano de referência *Master Level*.



Fonte: Notas de aula do Curso de Alinhamento do CASOP, 2009.

FIG. 2.9 Inclinação relativa entre dois planos.

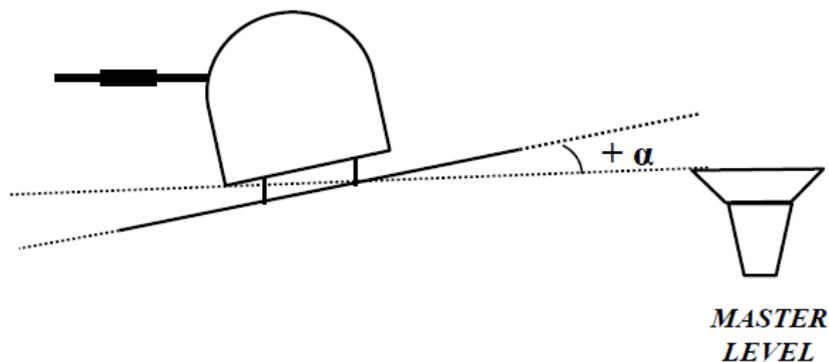


FIG. 2.10 Inclinação do PPR de um canhão em relação ao *Master Level*.

Na prática, para a determinação de  $\alpha$  e  $\beta$ , primeiramente coleta-se as informações de inclinação, variando de 10 em 10 graus em conteira, utilizando-se clinômetros de bolha nas duas localizações (*Tilt Test*). Analisando a FIG. 2.9, o ângulo  $\alpha$  assume o valor de  $0^\circ$  na

direção OB. Na direção OE assume o valor de  $-\alpha$ , e na direção OA assume novamente o valor de  $0^\circ$ . Portanto, a variação é senoidal. Os valores podem ser plotados em eixos cartesianos onde as ordenadas representam as inclinações e as abscissas os valores de conteira. A representação gráfica da inclinação entre planos pode ser feita através de curvas senoidais, onde poderá ser identificado o Ponto Alto para os planos em relação ao plano horizontal (FIG. 2.11 e FIG. 2.12).

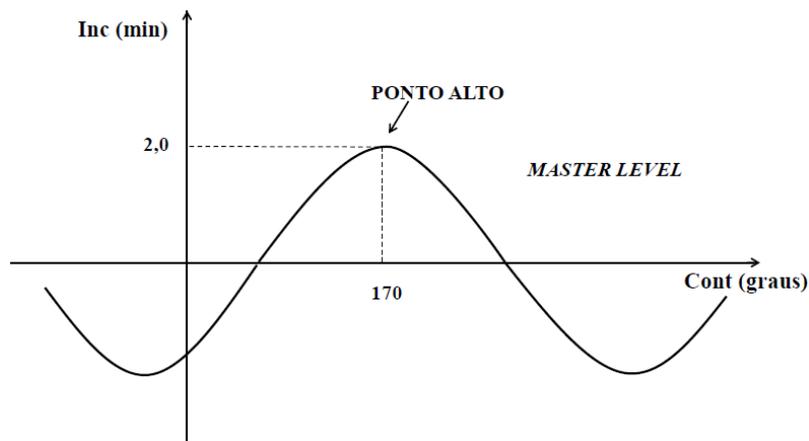


FIG. 2.11 Exemplo de inclinação do *Master Level* em relação ao plano horizontal.

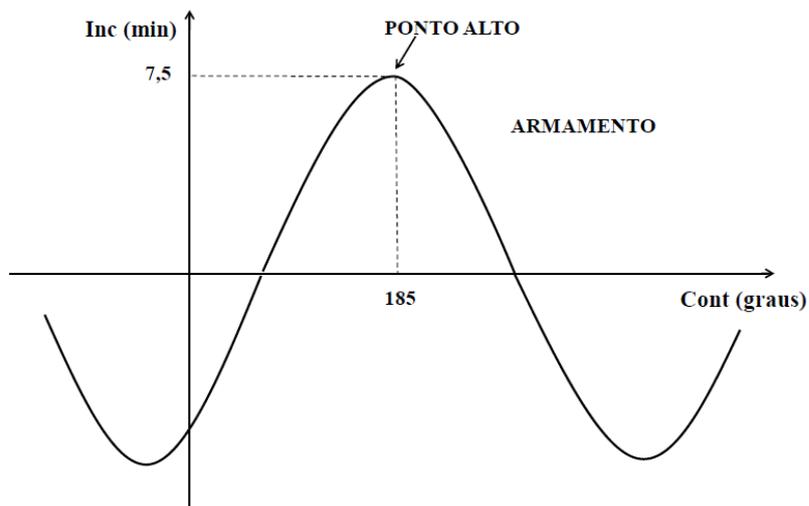


FIG. 2.12 Exemplo de inclinação de um armamento em relação ao plano horizontal.

Atualmente, a Marinha utiliza o programa *Tilt Test*, desenvolvido pelo Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP), o qual, através do método dos Mínimos Quadrados (DIEGUEZ, 2005), primeiramente calcula a inclinação da base de cada elemento (Armamentos e ML) em relação ao Plano Horizontal. Esse cálculo gera o Ponto Alto de cada elemento, que é representado por um vetor com módulo (elevação em minutos) e direção (conreira em graus). A seguir, são calculadas as inclinações relativas entre as bases dos armamentos e o ML. Essas inclinações relativas também são representadas por vetores (elevação e conreira). Após a obtenção do vetor inclinação relativa entre os dois planos (Armamento e ML), este é decomposto segundo as linhas longitudinal e transversal do navio, surgindo, então, as inclinações longitudinal (LONG) e transversal (TRANS), conforme a FIG. 2.13. Essas duas inclinações farão parte das futuras correções a serem realizadas pelo sistema operacional do navio, juntamente com as informações da giro.

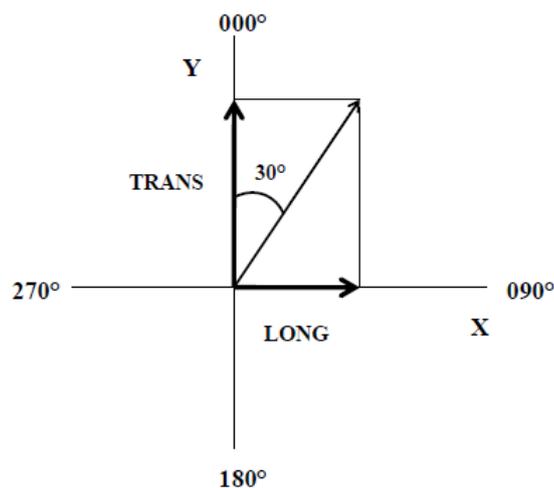


FIG. 2.13 Exemplo de decomposição do vetor inclinação relativa.

Supondo o Ponto Alto do canhão em relação ao ML igual a + 2,00 minutos aos 030° relativos, situação mostrada na representação esquemática da FIG. 2.14. O sistema operacional do navio deverá reduzir a elevação do canhão de 2,00 minutos quando este estiver na conreira de 030° relativos e aumentar a sua elevação de 2,00 minutos quando ele estiver na conreira de 210° relativos. Os valores de correção da inclinação transversal (TRANS) e longitudinal (LONG), respectivamente, são acrescidos às informações de balanço e caturro vindas da giro do navio.

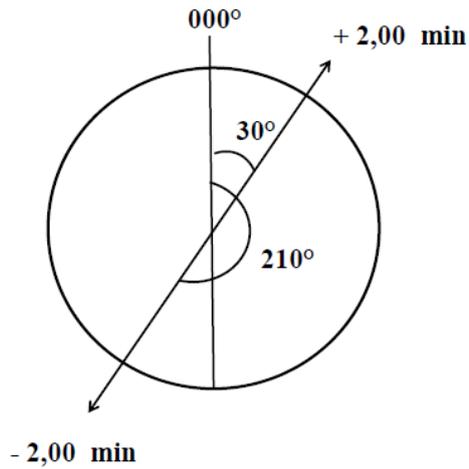


FIG. 2.14 Representação esquemática do Ponto Alto.

### 2.6.1 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DA METODOLOGIA ATUAL

Considerando-se que uma senóide pode ser expressa por:

$$Y = A \sin(\alpha + \theta) + d$$

Onde:

A = amplitude;

$\alpha$  = ângulo de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ ;

$\theta$  = deslocamento horizontal angular; e

d = deslocamento vertical da curva da senóide.

No gráfico da FIG. 2.15, a curva em vermelho representa a curva da senóide variando  $\alpha$  de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ . A curva em amarelo mostra a variação de  $\theta$ ; a curva em azul a variação de A e a de cor verde a variação em d.

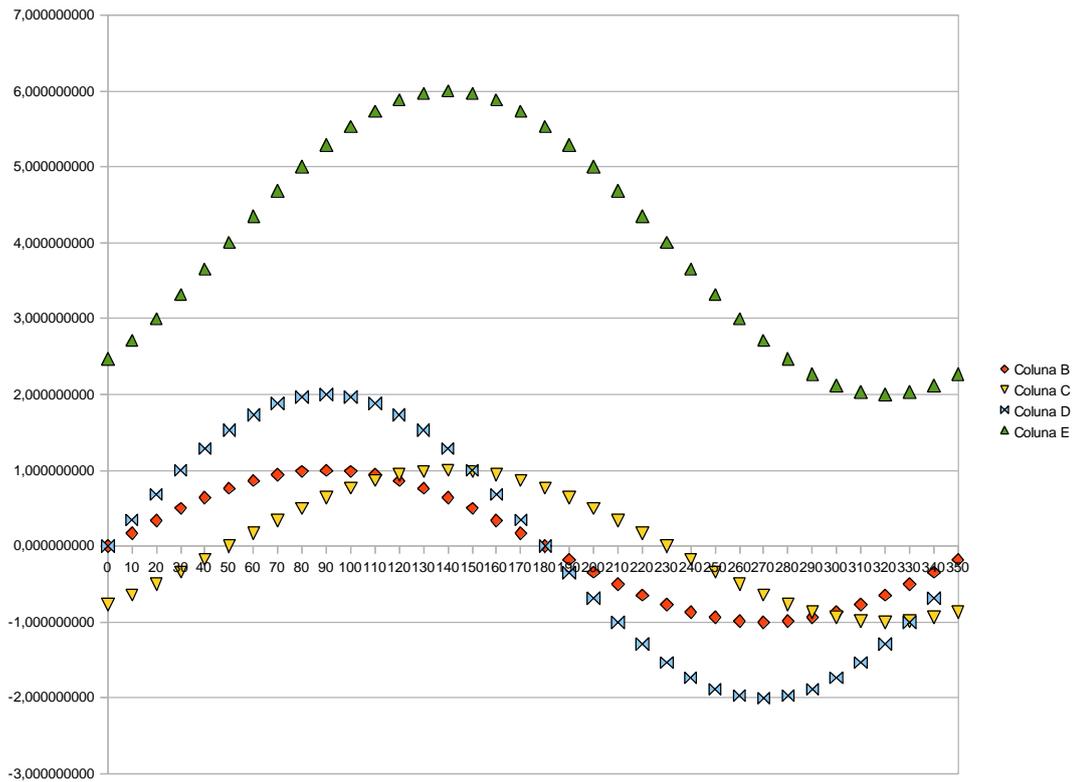


FIG. 2.15 Variações em  $\alpha$ ,  $\theta$ , A e d.

E que, segundo GUIDORIZZI (2000):

$$\sin(a + b) = \sin(a) \cos(b) + \sin(b) \cos(a)$$

Logo, pode-se escrever:

$$Y = A \sin(\alpha) \cos(\theta) + A \cos(\alpha) \sin(\theta) + d \quad (\text{EQ. 2.1})$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 \quad (\text{EQ. 2.2})$$

Fazendo:

$$a_0 = d$$

$$a_1 = A \sin(\theta)$$

$$a_2 = A \cos(\theta)$$

$$X_1 = \cos(\alpha)$$

$$X_2 = \sin(\alpha)$$

E, finalmente:

$$a_1^2 + a_2^2 = A^2 \sin^2(\theta) + A^2 \cos^2(\theta)$$

$$a_1^2 + a_2^2 = A^2 [\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta)]$$

A elevação do Ponto Alto será dada pela EQ 2.3:

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad (\text{EQ. 2.3})$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{A \sin(\theta)}{A \cos(\theta)}$$

A conteira do Ponto Alto será dada pela EQ 2.4:

$$\theta = \arctan\left(\frac{a_1}{a_2}\right) \quad [0^\circ, 90^\circ] \quad (\text{EQ. 2.4})$$

$$\theta = \arctan2(a_1; a_2) \quad [0^\circ, 180^\circ]$$

Realizando-se “N” observações de “Y” (leituras nos clinômetros) nas marcações “ $\alpha$ ”:

$$Y_{(1)} = a_0 + a_1 \cdot X_{1(1)} + a_2 \cdot X_{2(1)}$$

$$Y_{(2)} = a_0 + a_1 \cdot X_{1(2)} + a_2 \cdot X_{2(2)}$$

$$Y_{(3)} = a_0 + a_1 \cdot X_{1(3)} + a_2 \cdot X_{2(3)}$$

.....

$$Y_{(n)} = a_0 + a_1 \cdot X_{1(n)} + a_2 \cdot X_{2(n)}$$

$$\sum Y = a_0 N + a_1 \cdot \sum X_1 + a_2 \cdot \sum X_2 \quad (\text{EQ. 2.5})$$

Multiplicando-se a EQ 2.5 por  $X_1$ :

$$\sum X_1 Y = a_0 N \sum X_1 + a_1 \cdot \sum X_1^2 + a_2 \cdot \sum X_1 X_2$$

Multiplicando-se a EQ 2.5 por  $X_2$ :

$$\sum X_2 Y = a_0 N \sum X_2 + a_1 \cdot \sum X_1 X_2 + a_2 \cdot \sum X_2^2$$

O seguinte sistema linear pode ser obtido:

$$\begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 N + a_1 \cdot \sum X_1 + a_2 \cdot \sum X_2 \\ a_0 N \sum X_1 + a_1 \cdot \sum X_1^2 + a_2 \cdot \sum X_1 X_2 \\ a_0 N \sum X_2 + a_1 \cdot \sum X_1 X_2 + a_2 \cdot \sum X_2^2 \end{bmatrix}$$

Para a determinação dos coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ , realiza-se a solução por *Cramer*:

$$k = \begin{vmatrix} N & \sum X_1 & \sum X_2 \\ N \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 \\ N \sum X_2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_2^2 \end{vmatrix}$$

$$a_0 = \begin{vmatrix} \sum Y & \sum X_1 & \sum X_2 \\ \sum X_1 Y & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 \\ \sum X_2 Y & \sum X_1 X_2 & \sum X_2^2 \end{vmatrix} / k$$

$$a_1 = \begin{vmatrix} N & \sum Y & \sum X_2 \\ N \sum X_1 & \sum X_1 Y & \sum X_1 X_2 \\ N \sum X_2 & \sum X_2 Y & \sum X_2^2 \end{vmatrix} / k$$

$$a_2 = \begin{vmatrix} N & \sum X_1 & \sum Y \\ N \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 Y \\ N \sum X_2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_2 Y \end{vmatrix} / k$$

Com o objetivo de se estudar o modelo matemático da Marinha, foi realizada uma aplicação prática que pode ser visualizada no APÊNDICE 7.2. Para isso, foram utilizados os dados obtidos no *Tilt Test* da Corveta Bravo, realizado pela Marinha em setembro/2009. Os resultados desse ensaio são mostrados no item 4.1.1.

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA POR ALINHAMENTO DIGITAL

A nova metodologia propõe a instalação de dois clinômetros eletrônicos uniaxiais em cada base de armamento e outros dois no *Master Level* (ML), de modo a detectar a inclinação em dois eixos, os quais formam um plano. Os dois clinômetros uniaxiais podem ser substituídos por um clinômetro biaxial ou triaxial. Os pares de clinômetros uniaxiais, formando ângulos de  $90^\circ$  entre si, serão interligados a um computador, o qual irá receber várias medidas de inclinação, oriundas dos clinômetros, durante um determinado intervalo de tempo, conforme a FIG. 3.1. As leituras dos clinômetros deverão ser simultâneas e contínuas e serão realizadas em tempo real. O intervalo de tempo da transferência de dados entre os clinômetros e o computador, assim como da aquisição de dados dependerão do modelo do clinômetro a ser utilizado na fase experimental.

Nesse caso, o sincronismo é importante para que as leituras de todos os equipamentos sejam realizadas no mesmo instante de tempo. Como serão realizadas várias leituras ao longo de um determinado tempo, haverá um maior estabilidade dos valores, ou melhor, haverá uma convergência nas medidas.

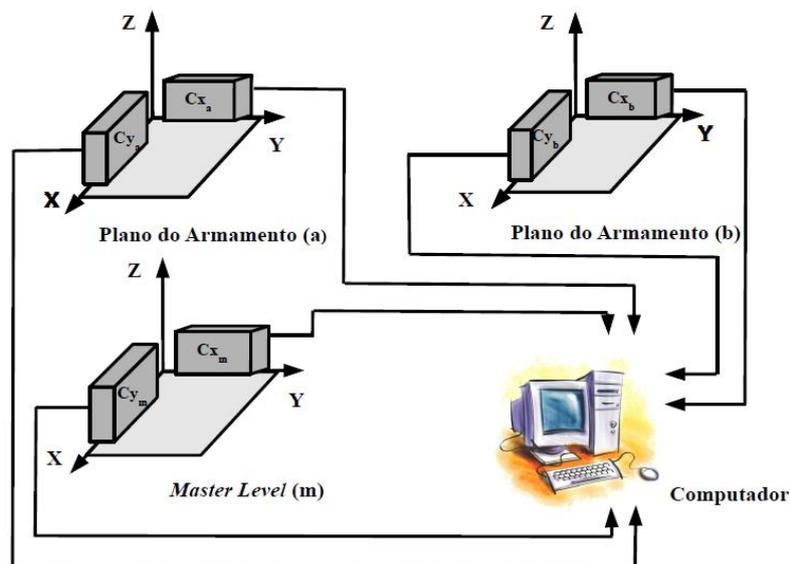


FIG. 3.1 Esquema reduzido da interligação entre clinômetros e computador.

### 3.1 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Quatro clinômetros uniaxiais, sendo dois instalados no *Master Level* (m) e dois instalados no Plano de Passeio dos Roletos (PPR) de um armamento (a) qualquer que se deseja alinhar, serão dispostos de tal modo que possam registrar as rotações em torno dos eixos X (linha 0° - 180° de azimute ou conteira) (Cx) e Y (linha 90° - 270° de azimute ou conteira) (Cy), conforme FIG. 3.2, 3.3 e 3.4.

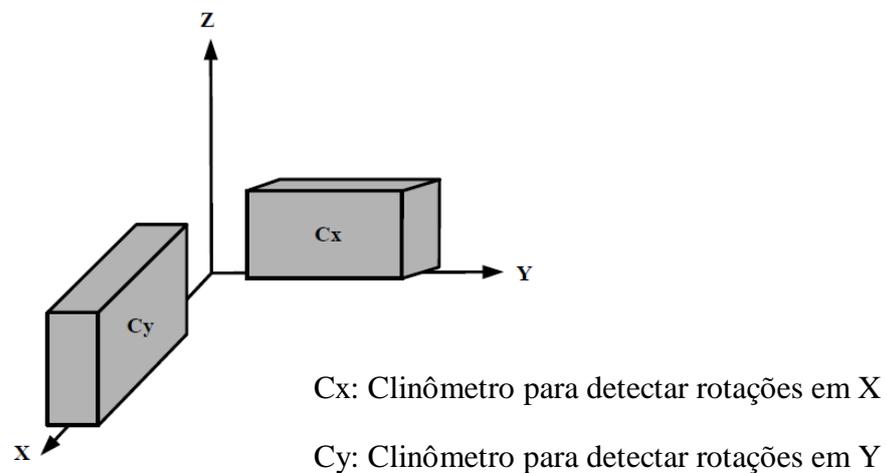


FIG. 3.2 Disposição dos clinômetros nos eixos X e Y.

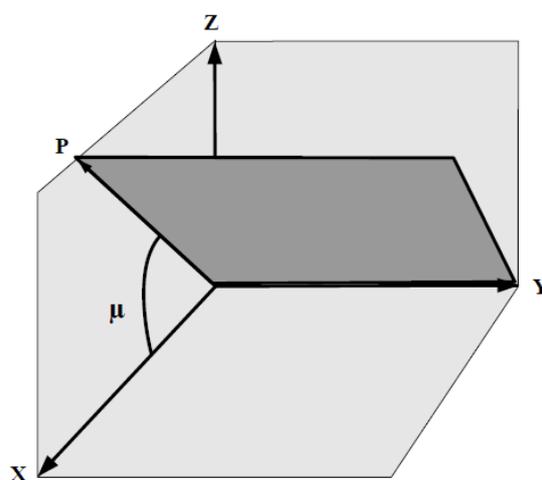


FIG. 3.3 Ângulo  $\mu$  detectado por Cy.

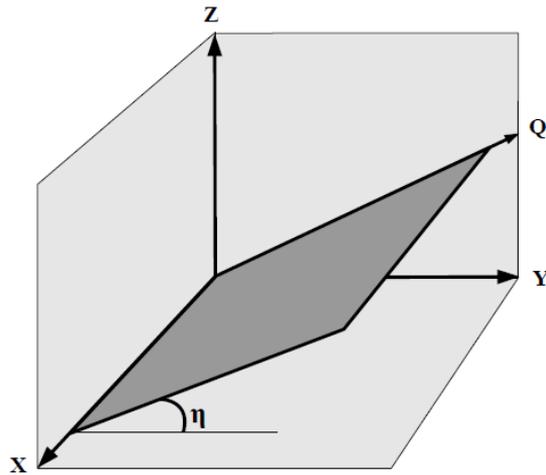


FIG. 3.4 Ângulo  $\eta$  detectado por Cx.

Assim, de acordo com as FIG. 3.5 e 3.6:

Cx<sub>m</sub> registra os movimentos de balanço no ML – inclinações  $\eta_m$ ;

Cx<sub>a</sub> registra os movimentos de balanço no armamento – inclinações  $\eta_a$ ;

Cy<sub>m</sub> registra os movimentos de caturro no ML – inclinações  $\mu_m$ ; e

Cy<sub>a</sub> registra os movimentos de caturro no armamento – inclinações  $\mu_a$ .

$\mu_m$ ,  $\mu_a$ ,  $\eta_m$  e  $\eta_a$  deverão ser observados em um mesmo instante de tempo  $t_0$ . O sincronismo poderá ser obtido mediante anotação de horário e interpolação de valores.

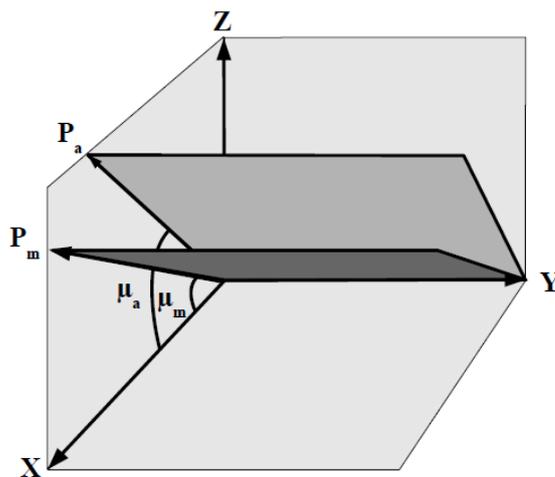


FIG. 3.5 Inclinações  $\mu_m$  e  $\mu_a$ .

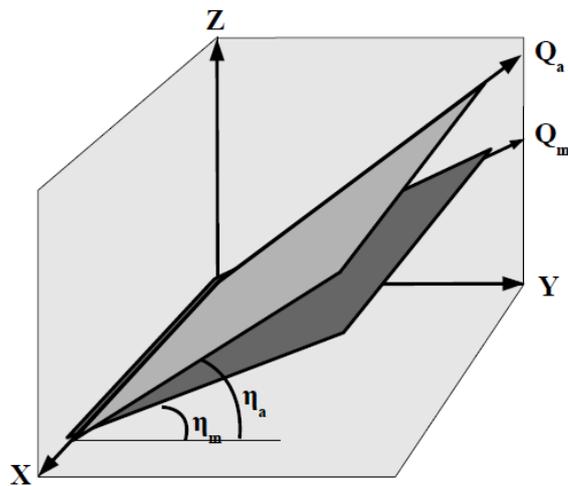


FIG. 3.6 Inclinações  $\eta_m$  e  $\eta_a$ .

De acordo com a FIG. 3.7, seja  $\mu = \mu_a - \mu_m$  a inclinação relativa do plano do armamento com referência ao ML, na direção  $90^\circ - 270^\circ$  (caturro), no instante  $t_0$ ; e  $\eta = \eta_a - \eta_m$  a inclinação relativa do plano do armamento com referência ao ML, na direção  $0^\circ - 180^\circ$  (balanço), no instante  $t_0$ .

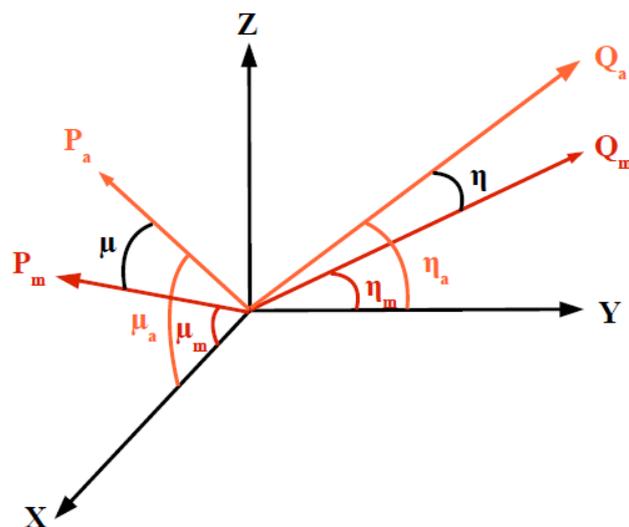


FIG. 3.7 Inclinações relativas  $\mu$  e  $\eta$ .

Considerando o ML representado pelo plano XY, de acordo com a FIG. 3.8, gera-se o Plano Resultante  $OP_aQ_a$ .

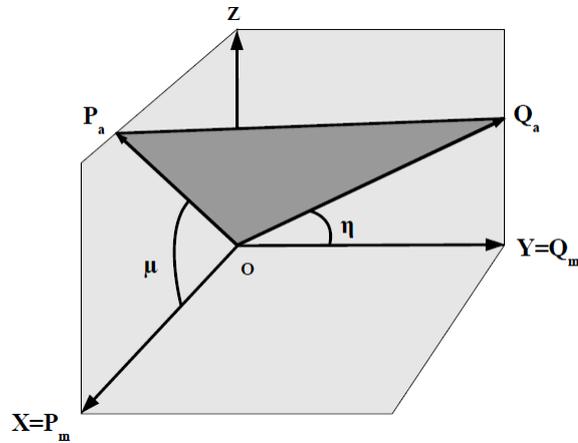


FIG. 3.8 Plano Resultante.

Assim, de acordo com a FIG. 3.9, para se obter a equação do plano relativo entre o ML e o PPR do armamento considerado, tem-se, segundo STEINBRUCH (1987), que:

A origem do sistema é definida por  $O = (0, 0, 0)$ .

O versor normal ao plano inclinado na direção  $0^\circ - 180^\circ$  é dado por:

$$\overrightarrow{OP_a} = (\cos \mu, 0, \sin \mu)$$

O versor normal ao plano inclinado na direção  $90^\circ - 270^\circ$  é dado por:

$$\overrightarrow{OQ_a} = (0, \cos \eta, \sin \eta)$$

Considerando:

$$v(x, y, z)$$

Sendo:

$$v \perp \overrightarrow{OP_a} \times \overrightarrow{OQ_a}$$

Realizando o produto misto:

$$(v, \overrightarrow{OP_a}, \overrightarrow{OQ_a}) = 0$$

Tem-se que:

$$\begin{vmatrix} x - 0 & y - 0 & z - 0 \\ \cos(\mu) - 0 & 0 - 0 & \sin(\mu) - 0 \\ 0 - 0 & \cos(\eta) - 0 & \sin(\eta) - 0 \end{vmatrix} = 0$$

(DET. 3.1)

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ \cos(\mu) & 0 & \sin(\mu) \\ 0 & \cos(\eta) & \sin(\eta) \end{vmatrix} = 0$$

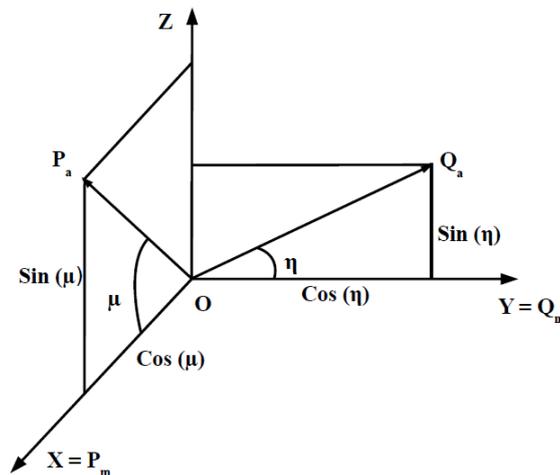


FIG. 3.9 Decomposição dos vetores  $\overrightarrow{OP_a}$  e  $\overrightarrow{OQ_a}$ .

Resolvendo-se o determinante DET 3.1, obtém-se a EQ 3.1 para o Plano Resultante da FIG. 3.8.

$$z \cdot \cos \mu \cdot \cos \eta - x \cdot \cos \eta \cdot \sin \mu - y \cdot \cos \mu \cdot \sin \eta = 0 \quad (\text{EQ. 3.1})$$

Sendo a equação de um plano representada por:

$$\pi : ax + by + cz + d = 0$$

Logo, os coeficientes da equação do Plano Resultante  $OP_aQ_a$  são:

$$a = -\sin \mu \cos \eta$$

$$b = -\cos \mu \sin \eta$$

$$c = \cos \mu \cos \eta$$

$$d = 0$$

Sejam os planos  $\pi_1$  e  $\pi_2$  definidos por (STEINBRUCH, 1987):

$$\pi_1 : a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$$

$$\pi_2 : a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0$$

Os respectivos vetores normais aos planos são definidos por:

$$\vec{n}_1 = (a_1, b_1, c_1) : \vec{n}_1 \perp \pi_1$$

$$\vec{n}_2 = (a_2, b_2, c_2) : \vec{n}_2 \perp \pi_2$$

Considerando-se  $\pi_1$  como Plano Resultante e  $\pi_2$  como Plano Horizontal (ML), tem-se:

$$a_1 = -\sin \mu \cos \eta$$

$$b_1 = -\cos \mu \sin \eta$$

$$c_1 = \cos \mu \cos \eta$$

$$d_1 = 0$$

$$z = 0$$

$$a_2 = 0$$

$$b_2 = 0$$

$$c_2 = 1$$

$$d_2 = 0$$

Segundo, STEINBRUCH (1987), o ângulo diedro, mostrado na FIG. 3.10, entre dois planos, o qual corresponde ao ângulo entre os vetores normais, pode ser calculado por meio de:

Considerando-se os dois vetores, sendo que cada um normal a um plano:

$$\vec{u} = (a_1, b_1, c_1)$$

$$\vec{v} = (a_2, b_2, c_2)$$

O cosseno do ângulo formado pelos dois planos é representado por:

$$\cos \theta = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{\|\vec{u}\| \|\vec{v}\|}$$

Logo:

$$\cos(\theta) = \frac{|a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2|}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \times \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}$$

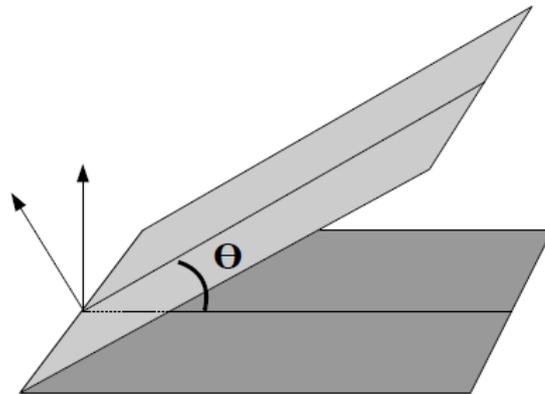


FIG. 3.10 Ângulo diedro entre dois planos.

Os cossenos diretores de um vetor são representados por (STEINBRUCH, 1987):

$$\cos \alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (\text{EQ. 3.2})$$

$$\cos \beta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (\text{EQ. 3.3})$$

$$\cos \gamma = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (\text{EQ. 3.4})$$

$$\cos(\theta) = \frac{|a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2|}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \times \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}$$

Operando-se o vetor normal ao plano com o versor “k”, obtem-se o ângulo entre o plano inclinado resultante e o plano horizontal de referência (ML), EQ 3.5:

$$\cos(\theta) = \frac{c_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \quad (\text{EQ. 3.5})$$

Neste capítulo foi realizado todo o desenvolvimento matemático para a nova metodologia. A partir de agora, existe a necessidade de uma fase experimental, de modo a comprovar a teoria proposta.

## 4 SIMULAÇÕES, TESTES E EXPERIMENTOS

Como visto nos capítulos 2 e 3, foram descritos, respectivamente, os desenvolvimentos matemáticos da metodologia atual e da metodologia proposta. Agora, no capítulo 4, serão realizadas simulações com a aplicação da metodologia atual, testes com a aplicação da metodologia proposta e os experimentos em bancada.

### 4.1 SIMULAÇÕES COM A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ATUAL

Inicialmente, para se entender a metodologia de cálculo adotada atualmente pela Marinha, foram utilizados os dados obtidos no *Tilt Test* da Corveta Bravo, realizado pela Marinha em setembro/2009. Foram elaboradas planilhas de cálculos no *BrOffice* e aplicados os cálculos matemáticos apresentados no item 2.6.1. Uma dessas planilhas, mais especificamente a do *Master Level*, pode ser visualizada no APÊNDICE 7.2. Seis planilhas foram montadas, uma para cada elemento. São eles: *Master Level*; Canhão A Vante (CAN AV); Radar de Direção de Tiro A Vante (RDT AV); Alça Optrônica (AOP); Alça Ótica (AO); e Radar de Busca Aérea e Superfície (RBAS). Para a realização desses cálculos foi utilizada a ferramenta planilha de cálculo do *BrOffice* e um *Lap Top*, marca SONY VAIO, modelo NS 120AH, com processador Intel Pentium *Dual-Core* T3200, disco rígido de 160 GB e memória RAM de 2 GB.

As EQ 2.1 e 2.2 foram utilizadas para se chegar aos valores do Ponto Alto (elevação e conreira) de cada elemento em relação ao plano horizontal. O passo a passo dos cálculos pode ser visualizado nas FIG. 4.1 à 4.5, as quais representam partes da planilha de cálculos no *BrOffice*. Nas FIG. 4.1 e 4.2 são visualizados os cálculos para as primeiras nove marcações ou conreiras (0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70° e 80°).

$$Y = A \sin(\alpha) \cos(\theta) + A \cos(\alpha) \sin(\theta) + d \quad (\text{EQ. 2.1})$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 \quad (\text{EQ. 2.2})$$

O  $A$  representa a amplitude da elevação e  $\theta$  indica a conteira do Ponto Alto.

Considerando-se:

$$a_0 = d \qquad X_1 = \cos(\alpha)$$

$$a_1 = A \sin(\theta) \qquad X_2 = \sin(\alpha)$$

$$a_2 = A \cos(\theta)$$

ML		Alfa	X1 cos (alfa)	X1 <sup>2</sup>	X2 sin (alfa)	X2 <sup>2</sup>
a0	d	0	1,000000000	1,000000000	0,000000000	0,000000000
a1	A sin (teta)	10	0,984807753	0,969846310	0,173648178	0,030153690
a2	A cos (teta)	20	0,939692621	0,883022222	0,342020143	0,116977778
X1	cos (alfa)	30	0,866025404	0,750000000	0,500000000	0,250000000
X2	sin (alfa)	40	0,766044443	0,586824089	0,642787610	0,413175911
A	Sqrt (a12 + a22)	50	0,642787610	0,413175911	0,766044443	0,586824089
M	ArcTan (a1/a2)	60	0,500000000	0,250000000	0,866025404	0,750000000
		70	0,342020143	0,116977778	0,939692621	0,883022222
		80	0,173648178	0,030153690	0,984807753	0,969846310

FIG. 4.1 Valores calculados para X1, X1<sup>2</sup>, X2 e X2<sup>2</sup>.

X1.X2	Y			X1.Y	X2.Y
	'	°	Rad		
0,000000000	-2,00	-0,033333	-0,000581776417	-0,000581776	0,000000000
0,171010072	-2,00	-0,033333	-0,000581776417	-0,000572938	-0,000101024
0,321393805	-1,75	-0,029167	-0,000509054365	-0,000478355	-0,000174107
0,433012702	-1,50	-0,025000	-0,000436332313	-0,000377875	-0,000218166
0,492403877	-1,25	-0,020833	-0,000363610261	-0,000278542	-0,000233724
0,492403877	-0,75	-0,012500	-0,000218166156	-0,000140235	-0,000167125
0,433012702	-0,50	-0,008333	-0,000145444104	-0,000072722	-0,000125958
0,321393805	-0,50	-0,008333	-0,000145444104	-0,000049745	-0,000136673
0,171010072	-0,50	-0,008333	-0,000145444104	-0,000025256	-0,000143234

FIG.4.2: Valores calculados para X1.X2, Y (Grau e Rad), X1.Y e X2.Y.

De acordo com a FIG. 4.3, realizaram-se, então, os somatórios, levando-se em conta as 36 observações, ou seja, de 0 à 350°, de 10 em 10°, para possibilitar a aplicação da solução por *Cramer*, de acordo com o capítulo 2, item 2.6.1.

Calculou-se, então, os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ . Em seguida, seus valores foram aplicados nas EQ 2.3 e 2.4, conforme capítulo 2, item 2.6.1, para se obter o Ponto Alto para cada elemento. Na FIG. 4.5 pode ser verificado o Ponto Alto calculado para o *Master Level*.

N	36
$\Sigma Y$	-0,000945387
$\Sigma X1$	0,000000000
$\Sigma X2$	0,000000000
$\Sigma X1^2$	18,000000000
$\Sigma X2^2$	18,000000000
$\Sigma X1.X2$	0,000000000
$\Sigma X1.Y$	-0,010482233
$\Sigma X2.Y$	0,001349105

FIG. 4.3 Cálculo dos somatórios para Y, X1, X2, X1<sup>2</sup>, X2<sup>2</sup>, X1.X2, X1.Y e X2.Y.

36,000000000	0,000000000	0,000000000			
0,000000000	18,000000000	0,000000000			
0,000000000	0,000000000	18,000000000		11664,000000	
-0,000945387	0,000000000	0,000000000			
-0,010482233	18,000000000	0,000000000			
0,001349105	0,000000000	18,000000000	<b>a0 =</b>	-0,306305	<b>-0,000026</b>
36,000000000	-0,000945387	0,000000000			
0,000000000	-0,010482233	0,000000000			
0,000000000	0,001349105	18,000000000	<b>a1 =</b>	-6,792487	<b>-0,000582</b>
36,000000000	0,000000000	-0,000945387			
0,000000000	18,000000000	-0,010482233			
0,000000000	0,000000000	0,001349105	<b>a2 =</b>	0,874220	<b>0,000075</b>

FIG. 4.4 Cálculo dos coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ .

<b>Conteira</b>	<b>172,67</b>					
	graus	minutos				
<b>A (Pto Alto)</b>	<b>0,0336</b>	<b>2,02</b>				
	A		$\Theta$			
<b>Master Level</b>	<b>2,02</b>	<b>aos</b>	<b>171</b>	<b>graus</b>	<b>X = -1.99</b>	<b>Y = 0.31</b>
CAN AV	1,00	aos	127	graus	X = -0.60	Y = 0.80
CAN AR	1,74	aos	270	graus	X = -0.00	Y = -1.74
RDT AV	8,26	aos	93	graus	X = -0.37	Y = 8.26
AOP	4,13	aos	164	graus	X = -3.97	Y = 1.11
AO	11,30	aos	115	graus	X = -4.72	Y = 10.26
RBAS	32,06	aos	145	graus	X = 26.29	Y = 18.35

FIG. 4.5 Ponto Alto calculado para o *Master Level*.

#### 4.1.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Na TAB. 4.1 deverá ser adotada a seguinte legenda:

Legenda:

EL – Elemento

E – Elevação (em minutos)

C – Conteira (em graus)

ML – *Master Level*

CAN – Canhão

AV – A Vante

RDT – Radar de Direção de Tiro

AOP – Alça Optrônica

AO – Alça Ótica

RBAS – Radar de Busca Aérea e Superfície

TAB. 4.1 Valores calculados para o Ponto Alto de cada elemento.

EL	PROGRAMA TILT TEST		PLANILHA DO BROFFICE	
	E (°)	C (°)	E (°)	C (°)
<b>ML</b>	2,02	171	2,02	173
<b>CAN AV</b>	1,00	127	1,00	127
<b>RDT AV</b>	8,26	93	8,26	93
<b>AOP</b>	4,13	164	4,13	164
<b>AO</b>	11,30	115	11,30	115
<b>RBAS</b>	32,06	145	32,06	145

De acordo com a TAB. 4.1, em relação aos seis elementos, comparou-se os valores do Ponto Alto (elevação e conteira), de cada um deles, gerados pelo programa *Tilt Test* do CASOP (Centro de Apoio a Sistemas Operativos), com o Ponto Alto obtido pela planilha do *BrOffice*. Pode ser observado, então, que os valores de elevação foram exatamente os mesmos para os dois métodos. Quanto aos valores de conteira, houve uma diferença, em valor absoluto, de 2° para o *Master Level*.

#### 4.2 TESTES COM A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Segundo ARAUJO et al. (2010), para os primeiros testes, foram utilizados dados de três *Tilt Tests* (TT) realizados pela Marinha na Corveta Bravo, em setembro/2009, na Corveta Foxtrot, em maio/2007 e na Fragata Lima, em outubro/2007. Parte desses dados pode ser visualizada na FIG. 4.6. A nova metodologia propõe a modelagem a partir de dois eixos ortogonais com a instalação de dois clinômetros, formando um ângulo de 90° entre eles, em cada base de armamento e no *Master Level* (ML). A Marinha dispõe de dados relativos às 36 leituras de conteira, de 0° à 350°, de 10° em 10°, correspondentes a uma varredura completa do círculo. Deste conjunto de observações, foram formados 36 pares com leituras em posições ortogonais, por exemplo: 0° / 90°; 10° / 100°; etc. A partir de um par ortogonal, um plano foi gerado e calculado o Ponto Alto para esse plano em relação ao plano horizontal. Portanto, para cada elemento disponível foram gerados 36 planos.

Na Corveta Bravo foram analisados os seis elementos a seguir: *Master Level* (ML); Canhão A Vante (CAN AV); Radar de Direção de Tiro A Vante (RDT AV); Alça Optrônica (AOP); Alça Ótica (AO); e Radar de Busca Aérea e Superfície (RBAS).

Sete elementos foram analisados na Corveta Foxtrot, são eles: *Master Level* (ML); Canhão A Vante (CAN AV); Alça Ótica A Vante (AO AV); Radar de Direção de Tiro A Vante (RDT AV); Alça Ótica A Ré (AO AR); Canhão de Boreste (CAN BE); e Canhão de Bombordo (CAN BB).

Na Fragata Lima foram analisados os dez elementos a seguir: *Master Level* (ML); Canhão A Vante (CAN AV); Lançador de Míssel 1 (LM1); Alça Optrônica (AOP); Radar de Direção de Tiro A Vante (RDT AV); Canhão de Boreste (CAN BE); Canhão de Bombordo

(CAN BB); Radar de Direção de Tiro A Ré (RDT AR); Lançador de Míssel 2 (LM2); e Radar de Busca Aérea e Superfície (RBAS).

Para a realização dos cálculos foi utilizada a ferramenta planilha de cálculo do *BrOffice*, um *Lap Top*, marca SONY VAIO, modelo NS 120AH, com processador Intel Pentium *Dual-Core* T3200, disco rígido de 160 GB e memória RAM de 2 GB. A planilha de cálculo está contida no APÊNDICE 7.3. Partes dessa planilha são mostradas nas FIG. 4.6 e 4.7. Para a obtenção de cada plano, foi utilizada a EQ 3.1 e para o cálculo dos cossenos diretores foram utilizadas as EQ 3.2, 3.3 e 3.4, conforme capítulo 3, item 3.1.

MARC	CVB
ML	
0	-2,00
10	-2,00
20	-1,75
30	-1,50
40	-1,25
50	-0,75
60	-0,50
70	-0,50
80	-0,50
90	0,00
100	0,25
110	0,75
120	1,00
130	1,25
140	1,25
150	1,50
160	1,75
170	2,00

FIG. 4.6 Parte dos dados obtidos em três *Tilt Tests* realizados em navios da Marinha.

Na FIG. 4.6 encontram-se disponíveis parte dos dados coletados para o *Master Level* da Corveta Bravo, de 0° à 350°, de 10° em 10°. A cada conteira ou marcação (0°, 10°, 20°, etc.) corresponde um valor de inclinação lido pelo clinômetro. Conforme a FIG. 4.7, esses dados foram organizados de modo a formarem 36 pares com leituras em posições ortogonais, ou melhor, 0° / 90°; 10° / 100°; 20° / 110°; etc. Ao lado de cada par, encontram-se as leituras de inclinação,  $\mu$  e  $\eta$ , realizadas pelo clinômetro, correspondentes a cada ângulo de conteira ou marcação. O objetivo dessa organização é mostrar que o método proposto irá produzir os mesmos resultados do método seguido atualmente pela Marinha do Brasil.

B e AU	B	2,02
		171,00
		CVB
Marc		ML
0	$\mu$	-2,00
90	$\eta$	0,00
10	$\mu$	-2,00
100	$\eta$	0,25
20	$\mu$	-1,75
110	$\eta$	0,75
30	$\mu$	-1,50
120	$\eta$	1,00
40	$\mu$	-1,25
130	$\eta$	1,25
50	$\mu$	-0,75
140	$\eta$	1,25
60	$\mu$	-0,50
150	$\eta$	1,50

FIG. 4.7 Parte dos cálculos dos planos formados pelos 36 pares de leituras ortogonais.

Foi calculado, então, o Ponto Alto em relação ao Plano Horizontal de cada um dos 36 planos gerados para cada elemento. A seguir, foi realizada a diferença entre cada um desses 36 Pontos Altos e o resultado encontrado pela Marinha. Depois, para cada elemento, foi calculada a média dessas 36 diferenças, tanto para os valores de conteira quanto para os de elevação. Consequentemente, foram originados alguns resultados preliminares. A planilha dos cálculos está contida no (APÊNDICE 7.4).

#### 4.2.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES

Na TAB. 4.2 podem ser visualizados os valores encontrados pela Marinha para cada elemento dos três navios, os valores das médias, pelo método proposto, e os valores da diferença (em valor absoluto) entre o método proposto e o da Marinha. Comparando-se os valores das médias para o ML com os valores encontrados pela Marinha, verificou-se que para a Corveta Bravo, em termos de conteira, a diferença foi de 1,7° e quanto à elevação foi de 0,0'. Na Corveta Foxtrot a diferença de conteira foi de 0,1° e de elevação de 0,3'; e para a Fragata Lima, a diferença de conteira foi de 0,2° e quanto à elevação foi de 0,0'.

Um elemento que chamou atenção no TT da Corveta Bravo e no da Fragata Lima foi o Radar de Busca Aérea e Superfície (RBAS), pois as diferenças de elevação foram de 112,1' e 82,5', respectivamente. O que pode ser notado é que todas as leituras de elevação realizadas pela Marinha para este elemento, na varredura completa do círculo ( $0^{\circ} - 360^{\circ}$ ), foram positivas para os dois navios. Na Corveta Bravo, essas leituras variaram entre 68,5' e 132' e na Fragata Lima entre 45' e 123'. O esperado em leituras de clinômetros, em um giro de horizonte, é que produzam valores positivos e negativos devido à variação do sentido nos vetores observações. Segundo informações oriundas da experiência do pessoal envolvido no TT, esses valores altos nas leituras das elevações são devidos a uma inclinação que varia de  $1^{\circ}$  a  $4^{\circ}$ , a qual é dada à plataforma desse radar. Essa inclinação seria para que ele, ao emitir, não reflita na superfície da água.

Nas TAB. 4.2, 4.3 e 4.4, deverá ser adotada a seguinte legenda:

Legenda:

NV – Navio	AO – Alça Ótica
CVB – Corveta Bravo	RBAS – Radar de Busca Aérea e Superfície
CVF – Corveta Foxtrot	BE – Boreste
FL – Fragata Lima	BB – Bombordo
EL – Elemento	LM1 – Lançador de Míssel 1
ML – “Master Level”	LM2 – Lançador de Míssel 2
CAN – Canhão	C – Conteira (em graus)
AV – A Vante	E – Elevação (em minutos)
AR – A Ré	ARM – Armamento
RDT – Radar de Direção de Tiro	TOL - Tolerância
AOP – Alça Optrônica	

TAB. 4.2 Comparação entre os valores do Ponto Alto para cada elemento.

NV	EL	MARINHA		MÉTODO PROPOSTO (MÉDIA)		DIFERENÇA ENTRE MÉTODO PROPOSTO E MARINHA (EM VALOR ABSOLUTO)	
		C (°)	E (°)	C (°)	E (°)	C (°)	E (°)
CVB	ML	171	2,0	172,7	2,0	1,7	0,0
	CAN AV	127	1,0	160,0	2,1	33,0	1,1
	RDT	93	8,3	92,5	9,2	0,5	0,9
	AOP	164	4,1	163,7	4,2	0,3	0,1
	AO	115	11,3	114,3	12,8	0,7	1,5
	RBAS	145	32,1	170,0	144,2	25,0	112,1
CF	ML	67	10,9	66,9	11,2	0,1	0,3
	CAN AV	74	18,1	72,2	18,4	1,8	0,3
	AO AV	75	12,0	67,8	12,7	7,2	0,7
	RDT AV	52	20,2	51,3	20,33	0,7	0,1
	AO AR	71	14,9	161,1	30,6	90,1	15,7
	CAN BE	70	18,4	69,6	18,7	0,4	0,3
	CAN BB	46	15,6	43,3	16,7	2,7	1,1
FL	ML	41	10,5	41,2	10,5	0,2	0,0
	CAN AV	30	15,6	30,1	16	0,1	0,4
	LM 1	36	15,6	116,7	18,7	80,7	3,1
	AOP	29	11,4	28,9	11,4	0,1	0,0
	RDT AV	81	10,7	82,1	11,7	1,1	1,0
	CAN BE	132	26,6	199,0	29,3	67,0	0,3
	CAN BB	27	9,8	170,0	24,0	143,0	14,2
	RDT AR	25	14,5	44,7	15,3	19,7	0,8
	LM 2	33	8,9	132,5	10,2	99,5	1,3
	RBAS	170	38,8	179,9	121,3	9,9	82,5

Ainda na TAB. 4.2, com relação à Alça Ótica A Ré (AO AR), no TT da Corveta Foxtrot, a diferença de conreira foi de  $90,1^\circ$  e de elevação igual a  $15,7'$ . Inclusive pode ser observado que essas diferenças foram as maiores entre todos os elementos desse navio. Todos os valores de leituras de elevação realizadas pela Marinha para esse elemento, na varredura completa do círculo ( $0^\circ - 360^\circ$ ), foram negativas, variando entre  $-36,5'$  à  $-3,8'$ . Com relação ao Canhão de Bombordo (CAN BB), no TT da Fragata Lima, a diferença de conreira foi de  $143^\circ$  e de elevação igual a  $14,2'$ . Todos os valores de leituras de elevação realizadas pela Marinha para esse elemento, na varredura completa do círculo ( $0^\circ - 360^\circ$ ), foram positivas, variando entre  $6,3'$  e  $26,3'$ .

Na TAB. 4.3, com relação às tolerâncias aceitas pela Marinha do Brasil, alguns valores podem ser observados, tais como:  $59'$  para o Radar de Direção de Tiro (RDT),  $4'$  para a Alça Optrônica (AOP),  $12'$  para o Radar de Busca Aérea e Superfície (RBAS) e  $12'$  para o Lançador de Míssel 2 (LM2). Considera-se inclinação relativa, a elevação do armamento em relação ao ML. Foram, então, calculadas as inclinações relativas desses elementos, quando disponíveis no navio, em relação ao ML calculado pela Marinha e em relação ao ML proposto. Para os três navios, todos os elementos tiveram seus valores dentro das tolerâncias, com exceção do Radar de Busca Aérea e Superfície, nos casos da Corveta Bravo e da Fragata Lima. A metodologia proposta não prevê a inclinação inicial desse elemento, mas existe a possibilidade de se fazer esse complemento ao modelo matemático.

Um outra análise realizada pode ser visualizada na TAB. 4.4. Ela consiste na verificação da porcentagem de planos, de um total de 36 (100%) gerados para cada elemento, que tiveram a diferença entre o valor de elevação encontrado pelo método proposto e o valor da Marinha, dentro de determinados intervalos.

TAB. 4.3 Ponto Alto encontrado *versus* Tolerância

NV	EL	MÉDIA DA DIFERENÇA RELATIVA EM ELEVAÇÃO: ARM – ML (MARINHA) (°)	MÉDIA DA DIFERENÇA RELATIVA EM ELEVAÇÃO: ARM – ML (PROPOSTO) (°)	TOL E (°)	OK/ N OK
CB	RDT AV	2,5	2,5	59	OK
	AOP	-2,3	-2,3	4	OK
	RBAS	-31,2	-31,2	+/- 12	N OK
CF	RDT AV	10,4	10,3	59	OK
FL	AOP	2,6	2,6	4	OK
	RDT AV	-8,4	-8,4	59	OK
	RDT AR	6,8	6,8	59	OK
	LM 2	-0,1	-0,1	12	OK
	RBAS	-55,1	-55,2	+/- 12	N OK

Com relação ao ML, na Corveta Bravo, 100% dos planos tiveram essa diferença menor que 1°. Na Corveta Foxtrot, 55,6% dos planos tiveram essa diferença entre 1° e 3°. E, finalmente, na Fragata Lima 80,6% dos planos se encontram com essa diferença abaixo de 1°.

Com relação ao Radar de Busca Aérea e de Superfície, tanto na Corveta Bravo, quanto na Fragata Lima, 100% dos planos tiveram as diferenças maiores que 70°. Conforme explicado anteriormente, o modelo matemático proposto terá que sofrer adaptações para compensar a inclinação inicial desse elemento.

Em relação aos outros elementos, com raras exceções, as maiores porcentagens estão dentro do intervalo de 0° à 7°.

TAB.4.4: Valores percentuais.

NV	EL	PLANOS GERADOS, NUM TOTAL DE 36 - DIFERENÇA DE ELEVAÇÃO ENTRE O VALOR PELO MÉTODO PROPOSTO E O VALOR DA MARINHA								
		(EM PORCENTAGEM)								
		0 - 1'	1' - 3'	3' - 5'	5' - 7'	7' - 9'	9' - 11'	11' - 13'	13' - 30'	MAIOR QUE 70'
CB	ML	100								
	CAN AV	27,8	72,2							
	RDT	13,9	25	38,9	22,2					
	AOP	86,1	13,9							
	AO	5,6	22,2	13,9	25	33,3				
	RBAS									100
CF	ML	19,4	55,6	25						
	CAN AV	11,1	22,2	52,8	11,1	2,8				
	AO AV	0	27,8	41,7	22,2	5,6	2,8			
	RDT AV	55,6	22,2	19,4	2,8					
	AO AR	11,1	11,1	2,8	5,6	0	5,6	5,6	58,3	
	CAN BE	41,7	30,6	25	0	0	2,8			
	CAN BB	8,3	33,3	25	30,6	2,8				
FL	ML	80,6	19,4							
	CAN AV	13,9	38,9	41,7	5,6					
	LM 1	5,6	5,6	16,7	13,9	11,1	16,7	19,4	11,1	
	AOP	88,9	11,1							
	RDT AV	13,9	27,8	22,2	30,6	5,6				
	CAN BE								77,8	22,2
	CAN BB		2,8	8,3	13,9	2,8	5,6	8,3	58,3	
	RDT AR	11,1	25	27,8	33,3	2,8				
	LM 2	16,7	19,4	25	36,1	2,8				
	RBAS									100

#### 4.3 EXPERIMENTOS EM BANCADA REALIZADOS NA MARINHA

Com o objetivo de se verificar na prática a aplicação da metodologia proposta, em 04 de novembro de 2010, foram realizados os experimentos em bancada no Laboratório do CASOP (Centro de Apoio a Sistemas Operativos). O CASOP adquiriu seis clinômetros digitais uniaxiais modelo T7-1-232 - *Digital Inclinator*, FIG. 4.8, da empresa *US Digital*, acompanhados dos seus acessórios. Os dados técnicos desse equipamento podem ser encontrados no (ANEXO 8.1).



Fonte: <http://usdigital.com/products/inclinometers/absolute/t7>

FIG. 4.8 *Digital Inclinator* modelo T7-1-232, uniaxial.

Para os experimentos em bancada, realizados no CASOP, foram utilizados os seguintes itens:

- 4 Clinômetros modelo: T7 – 1 – 232 – Digital Inclinator da US Digital – N/S: 32337 à 32340;
- Um *Master Level* retirado de um navio que deu baixa;
- Uma Mesa Giratória de madeira com diâmetro de 59 cm;
- 2 Perfis de alumínio em 90° soldados em bases de alumínio para fixação dos clinômetros;
- Uma Agulha Magnética modelo *Nippon Kokaikeiki*;
- 4 cabos modelo CA-CFR-PS DB9P – 15;
- Um Computador Celeron (R), 170 GHz, 1,21 GB, Windows XP; e

➤ T7 Software – Software que acompanha o clinômetro.

Toda a estrutura foi montada e os testes conduzidos inteiramente pelo próprio pessoal do CASOP. Foram realizadas medidas em 4 corridas:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ . Em cada uma dessas 4 corridas, foram posicionados 2 clinômetros, formando um ângulo de  $90^\circ$  entre os mesmos, no *Master Level* (ML) e na Mesa Giratória, como pode ser observado nas FIG. 4.9, 4.10 e 4.11. Os dois clinômetros do *Master Level* representaram  $\mu$  e  $\eta$ . O mesmo ocorrendo para a Mesa Giratória. Para cada uma das 4 corridas, foram realizadas medidas, pelos clinômetros, durante 1 minuto. Essas medidas eram passadas para o computador, onde eram armazenadas. Na FIG. 4.12, são mostradas as posições dos clinômetros, representados pelas letras A e B, no *Master Level*, e C e D, na Mesa Giratória, durante as 4 corridas.



FIG. 4.9 Estrutura montada para o experimento em bancada.



FIG. 4.10 Clinômetros posicionados no *Master Level*.



FIG. 4.11 Clinômetros posicionados na Mesa Giratória.

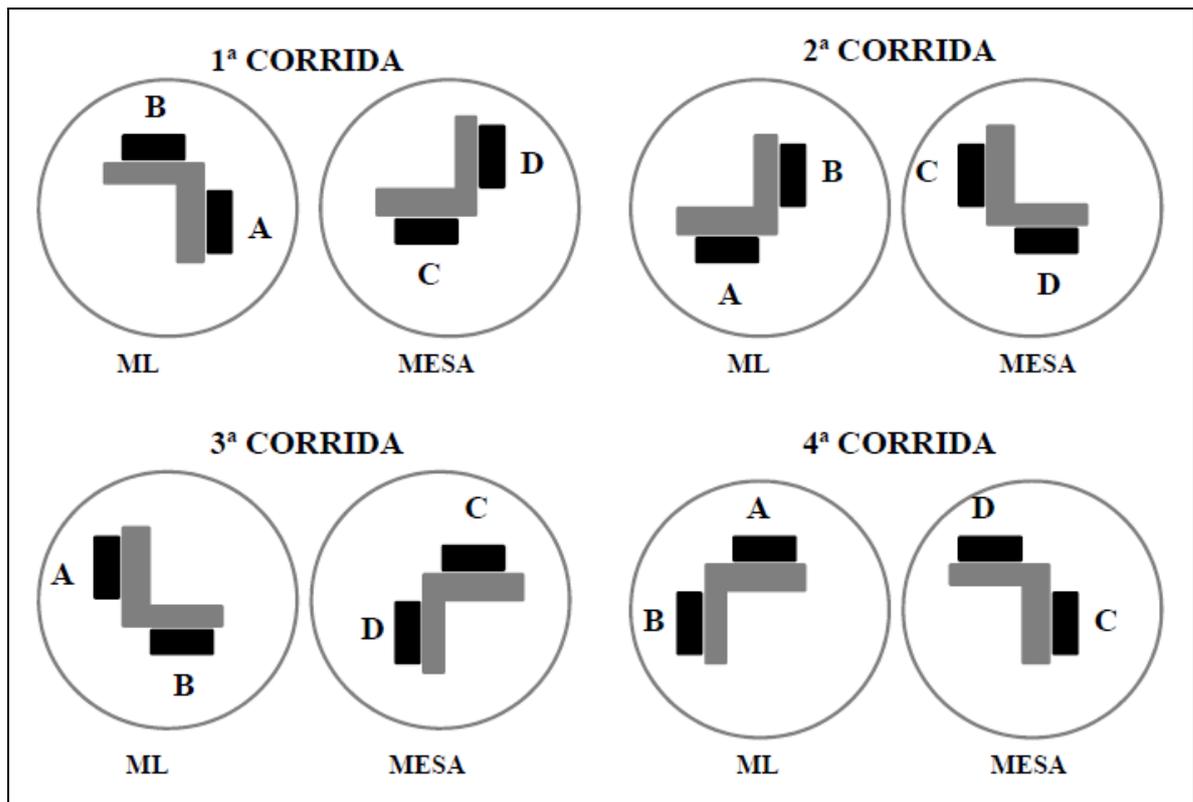


FIG. 4.12 Posicionamento dos clinômetros A, B, C e D durante as 4 corridas.

#### 4.3.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS EM BANCADA REALIZADOS NA MARINHA

Durante as 4 corridas a quantidade de leituras, por clinômetro, variou entre 1.394 e 7.837. Foi verificado que, em algumas ocasiões, para um mesmo instante, mais de uma medida de elevação foi realizada pelo clinômetro. Para se obter os valores de elevação e conteira do Ponto Alto para cada uma das 4 corridas, foi necessário o cumprimento das etapas a seguir:

- Etapa 1: Cálculo das médias parciais para que cada instante correspondesse a uma medida distinta de elevação. Esse procedimento se repetiu para cada um dos 4 conjuntos de medidas, originados pelos 4 clinômetros;
- Etapa 2: Sincronização das medidas para  $\mu$  e  $\eta$  do *Master Level* e da Mesa Giratória;
- Etapa 3: Convergência das medidas; e
- Etapa 4: Cálculo dos valores de elevação e conteira do Ponto Alto para cada uma das 4 corridas.

Todos os cálculos foram realizados através da ferramenta planilha de cálculo do *BrOffice* e um *Lap Top*, marca: SONY VAIO, modelo: NS 120AH, com processador Intel Pentium *Dual-Core* T3200, disco rígido de 160 GB e memória RAM de 2 GB.

A Etapa 2, que corresponde à sincronização das medidas, é dividida em duas partes. Na primeira, registra-se o intervalo de tempo de interseção, entre os quatro clinômetros, após o cálculo das médias parciais, realizado na Etapa 1. Consequentemente, obtém-se os instantes observados para cada corrida, conforme TAB. 4.5. Na segunda parte, verifica-se, entre os quatro clinômetros, em quantos instantes todos os clinômetros registraram medidas simultaneamente. Resultando, então, os instantes após o sincronismo.

Pela TAB. 4.5 pode ser observado que quanto menor o intervalo de tempo, ou seja, quanto maior a frequência na aquisição dos dados, mais difícil será a sincronização entre as medidas. Isso também pode ser visualizado nas TAB. 4.6 e 4.7 (OBS 1, 2 e 3). Por exemplo, considerando-se a taxa de aquisição de 1 segundo, na 1ª corrida, serão gerados 29 instantes após o sincronismo. Já a taxa de aquisição de 0,1 segundo origina 16 instantes e a de 0,01 segundo gera 8 instantes após o sincronismo.

TAB. 4.5 Instantes observados *versus* taxa de aquisição

TAXA DE AQUISIÇÃO (s)	INSTANTES OBSERVADOS	INSTANTES APÓS SINCRONISMO	% DE APROVEITAMENTO
<b>1ª CORRIDA</b>			
1	57	29	50,87
0,1	558	16	2,86
0,01	5575	8	0,14
<b>2ª CORRIDA</b>			
1	48	19	39,58
0,1	470	16	3,40
0,01	4662	2	0,04
<b>3ª CORRIDA</b>			
1	53	20	37,73
0,1	516	10	1,93
0,01	5147	0	0,00
<b>4ª CORRIDA</b>			
1	48	14	29,16
0,1	475	1	0,21
0,01	4738	0	0,00

Para melhor entendimento, a análise dos testes realizados em bancada na Marinha será dividida em seis experimentos. Para efeito dos experimentos, descritos a seguir, convencionou-se que  $\mu$  corresponderia ao eixo X e  $\eta$  ao eixo Y, conforme a FIG. 4.13.

#### Experimento 1:

No experimento 1, os valores para o Ponto Alto da inclinação relativa entre a Mesa Giratória e o *Master Level* foram obtidos sem que fosse levado em conta a orientação em relação aos eixos X e Y, referente ao posicionamento dos clinômetros. De acordo com a FIG. 4.12, B e D representaram, respectivamente, o  $\mu$  do *Master Level* e da Mesa Giratória, e A e C representaram, respectivamente, o  $\eta$  do *Master Level* e da Mesa Giratória. Para se obter o sincronismo entre as medidas, foi cumprida a Etapa 2, descrita no início do item 4.3.1. Os cálculos foram realizados para as taxas de aquisição de 1; 0,1 e 0,01 segundos. Foi calculada,

então, a diferença entre os dois valores de  $\mu$ , um do *Master Level* e outro da Mesa Giratória, e, do mesmo modo, aconteceu com  $\eta$ . Finalmente, os valores das diferenças foram aplicados na fórmula do Plano Resultante para que o valor do Ponto Alto dessa inclinação relativa fosse encontrado.

A TAB. 4.6 apresenta os resultados do Experimento 1.

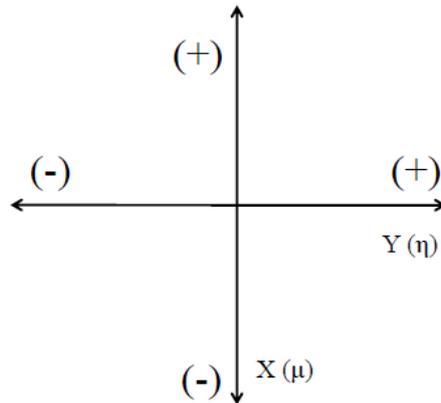


FIG. 4.13 Convenção adotada para  $\mu$  e  $\eta$ .

A seguinte legenda deverá ser adotada para as TAB. 4.6 à 4.12.

Legenda:

CORR. – Corrida

E – Elevação em minutos

C – Conteira em graus

DESVP– Desvio padrão

TAB. 4.6 Resultados obtidos no Experimento 1.

CORR.	E (MÉDIA) (°)	E (DESVP) (°)	C (MÉDIA) (°)	C (DESVP) (°)	CONVERGÊNCIA	
					E (°)	C (°)
<b>TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s</b>						
1 <sup>a</sup>	26,65	1,66	-23,57	4,08	26,60	-23,67
2 <sup>a</sup>	21,66	1,56	-75,33	3,92	21,58	-75,35
3 <sup>a</sup>	2,71	2,11	DIV/0	67,94	0,48	-29,74
4 <sup>a</sup>	21,31	2,26	24,27	6,13	21,19	24,24
<b>TAXA DE AQUISIÇÃO = 0,1 s</b>						
1 <sup>a</sup>	25,79	1,67	-22,75	4,73	25,73	-22,92
2 <sup>a</sup>	21,18	1,23	-72,91	9,82	20,90	-72,97
3 <sup>a</sup>	4,56	2,87	5,04	55,53	2,04	0,00
4 <sup>a</sup>	20,74	OBS 1	32,36	OBS 1	OBS 1	OBS 1
<b>TAXA DE AQUISIÇÃO = 0,01 s</b>						
1 <sup>a</sup>	26,82	5,20	-23,39	6,78	26,61	-24,37
2 <sup>a</sup>	26,19	0,15	8,66	67,90	24,33	-81,49
3 <sup>a</sup>	OBS 2	OBS 2	OBS 2	OBS 2	OBS 2	OBS 2
4 <sup>a</sup>	OBS 3	OBS 3	OBS 3	OBS 3	OBS 3	OBS 3

**OBS 1)** Na 4<sup>a</sup> corrida (uma decimal), depois da sincronização só restou um instante.

**OBS 2) e OBS 3)** Na terceira e quarta corridas (duas decimais), depois da sincronização, não restou instante algum.

Como os resultados do Experimento 1 não foram satisfatórios, pois, já que os planos não tiveram as suas inclinações modificadas, esperava-se que os resultados das médias de elevação para cada corrida fossem iguais ou bem próximos. Mas, de acordo com a TAB. 4.6, este fato não ocorreu. Então, partiu-se para o Experimento 2.

Experimento 2:

No experimento 2, foi realizada a tentativa de se encontrar o Ponto Alto da inclinação relativa entre os dois planos, levando-se em conta a orientação dos eixos referente ao posicionamento dos clinômetros. Desta forma, em relação à FIG. 4.12, a diferença, então, foi calculada entre D e A e entre C e B.

A TAB. 4.7 apresenta os resultados do Experimento 2.

TAB. 4.7 Resultados obtidos no Experimento 2.

CORR.	E (MÉDIA) (°)	E (DESVP) (°)	C (MÉDIA) (°)	C (DESVP) (°)	CONVERGÊNCIA	
					E (°)	C (°)
<b>TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s</b>						
1 <sup>a</sup>	37,97	1,77	-59,66	2,08	37,94	-59,70
2 <sup>a</sup>	33,45	1,53	-25,93	2,69	33,44	-25,97
3 <sup>a</sup>	21,75	2,30	-44,51	5,80	21,64	-44,78
4 <sup>a</sup>	38,17	2,47	-76,32	3,07	38,10	-76,34
<b>TAXA DE AQUISIÇÃO = 0,1 s</b>						
1 <sup>a</sup>	37,54	2,08	-59,96	2,77	37,50	-59,95
2 <sup>a</sup>	33,17	1,96	-27,66	6,17	32,93	-27,69
3 <sup>a</sup>	21,33	2,90	-49,76	11,54	20,92	-48,95
4 <sup>a</sup>	34,86	OBS 1	-80,49	OBS 1	OBS 1	OBS 1
<b>TAXA DE AQUISIÇÃO = 0,01 s</b>						
1 <sup>a</sup>	36,69	3,50	-60,08	4,08	36,62	-59,91
2 <sup>a</sup>	37,28	2,11	-22,38	12,12	36,49	-21,71
3 <sup>a</sup>	OBS 2	OBS 2	OBS 2	OBS 2	OBS 2	OBS 2
4 <sup>a</sup>	OBS 3	OBS 3	OBS 3	OBS 3	OBS 3	OBS 3

**OBS 1)** Na 4<sup>a</sup> corrida (uma decimal), depois da sincronização só restou um instante.

**OBS 2) e OBS 3)** Na terceira e quarta corridas (duas decimais), depois da sincronização, não restou instante algum.

Como ocorreu no Experimento 1, os resultados do Experimento 2 também não atingiram os valores esperados. Esperava-se que os resultados das médias de elevação para cada corrida fossem iguais ou bem próximos, pois os planos não tiveram as suas inclinações modificadas. Mas, de acordo com a TAB. 4.7, este fato não ocorreu. Então, partiu-se para o Experimento 3.

### Experimento 3:

No Experimento 3, decidiu-se trabalhar com o Ponto Alto de cada plano individualmente em relação ao Plano Horizontal e não mais com a inclinação relativa entre os dois planos. O  $\mu$  foi representado por A e o  $\eta$  foi representado por B no *Master Level* e, na Mesa Giratória, o  $\mu$  foi representado por D e o  $\eta$  foi representado por C. Os cálculos foram realizados não considerando-se a orientação dos eixos, referente ao posicionamento dos clinômetros. A partir desse experimento, os cálculos foram realizados para a taxa de aquisição de 1 segundo. A

sincronização das medidas foi feita separadamente, ou seja, primeiramente para os dois clinômetros do *Master Level* e depois para os dois clinômetros da Mesa Giratória. Portanto, após a sincronização das medidas foram utilizados os valores das leituras de  $\mu$  e  $\eta$  para o cálculo do Ponto Alto de cada plano em relação ao Plano Horizontal.

Na TAB. 4.8 podem ser visualizados os resultados do Experimento 3.

TAB. 4.8 Resultados obtidos no Experimento 3.

TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MASTER LEVEL						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	6,42	0,94	-32,17	15,73	6,19	-33,54
2 <sup>a</sup>	10,97	1,17	7,50	8,65	10,84	7,64
3 <sup>a</sup>	13,96	1,06	-6,19	11,18	13,70	-6,28
4 <sup>a</sup>	12,45	2,05	-42,74	10,85	12,27	-42,82
TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MESA GIRATÓRIA						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	32,63	0,76	-24,95	0,95	32,62	-24,91
2 <sup>a</sup>	25,05	0,84	-49,53	2,14	25,02	-49,47
3 <sup>a</sup>	13,46	0,50	-7,28	4,81	13,43	-7,44
4 <sup>a</sup>	28,95	0,80	2,47	2,21	28,95	2,49

Como os resultados do Experimento 3 não foram satisfatórios, pois, já que os planos não tiveram as suas inclinações modificadas, esperava-se que os resultados das médias de elevação para cada corrida fossem iguais ou bem próximos. Mas, de acordo com a TAB. 4.8, este fato não ocorreu. Então, partiu-se para o Experimento 4.

Experimento 4:

No Experimento 4, a metodologia utilizada foi semelhante à realizada no Experimento 3, com a diferença de que, dessa vez, os cálculos foram realizados considerando-se a orientação dos eixos, referente ao posicionamento dos clinômetros.

A TAB. 4.9 apresenta os resultados do Experimento 4.

TAB.4.9: Resultados obtidos no Experimento 4.

TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MASTER LEVEL						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	6,42	0,94	-32,17	15,73	6,19	-33,54
2 <sup>a</sup>	10,97	1,17	-7,55	8,65	10,84	-7,64
3 <sup>a</sup>	13,96	1,06	-6,19	11,18	13,70	-6,28
4 <sup>a</sup>	12,45	2,05	42,74	10,85	12,27	42,82
TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MESA GIRATÓRIA						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	32,63	0,76	24,95	0,95	32,62	24,91
2 <sup>a</sup>	25,05	0,84	-49,53	2,14	25,02	-49,47
3 <sup>a</sup>	13,46	0,50	7,28	4,81	13,43	7,44
4 <sup>a</sup>	28,95	0,80	2,47	2,21	28,95	2,49

Novamente, como a inclinação do plano permaneceu a mesma, esperava-se que os resultados das médias de elevação para as quatro corridas fossem iguais ou bem próximas. Mas, conforme a TAB. 4.9, os resultados insatisfatórios continuaram. Os valores encontrados para elevação foram os mesmos encontrados no Experimento 3, onde não se levou em consideração a orientação dos eixos, referente ao posicionamento dos clinômetros. Os valores encontrados para conteira também foram iguais, sendo que com os sinais trocados para a segunda e quarta corridas do *Master Level* e para a primeira e terceira corridas da Mesa Giratória. Devido a esses fatores, partiu-se para o Experimento 5.

#### Experimento 5:

No Experimento 5, um outro cálculo foi tentado da mesma forma que nos Experimentos 3 e 4, sendo que foi realizada a troca de  $\mu$  por  $\eta$ .

Os resultados do Experimento 5 podem ser visualizados nas TAB. 4.10 e 4.11.

TAB. 4.10 Resultados obtidos no Experimento 5, não considerando-se a orientação dos eixos.

TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MASTER LEVEL						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	6,42	0,94	-49,25	27,53	6,19	-56,46
2 <sup>a</sup>	10,97	1,17	-58,76	56,29	10,84	-82,36
3 <sup>a</sup>	13,96	1,06	-47,81	63,57	13,70	-83,72
4 <sup>a</sup>	12,45	2,05	47,26	10,85	12,27	47,18
TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MESA GIRATÓRIA						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	32,63	0,76	65,05	0,95	32,62	65,09
2 <sup>a</sup>	25,05	0,84	-40,47	2,14	25,02	-40,53
3 <sup>a</sup>	13,46	0,50	DIV / 0	DIV / 0	13,43	82,56
4 <sup>a</sup>	28,95	0,80	DIV / 0	DIV / 0	28,95	87,51

TAB. 4.11 Resultados obtidos no Experimento 5, considerando-se a orientação dos eixos.

TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MASTER LEVEL						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	6,42	0,94	-49,25	27,53	6,19	-56,46
2 <sup>a</sup>	10,97	1,17	58,76	56,29	10,84	82,36
3 <sup>a</sup>	13,96	1,06	-47,81	63,57	13,70	-83,72
4 <sup>a</sup>	12,45	2,05	-47,26	10,85	12,27	-47,18
TAXA DE AQUISIÇÃO = 1 s						
MESA GIRATÓRIA						
CORR.	E (MÉDIA)	E (DESVP)	C (MÉDIA)	C (DESVP)	CONVERGÊNCIA	
	(°)	(°)	(°)	(°)	E (°)	C (°)
1 <sup>a</sup>	32,63	0,76	-65,05	0,95	32,62	-65,09
2 <sup>a</sup>	25,05	0,84	-40,47	2,14	25,02	-40,53
3 <sup>a</sup>	13,46	0,50	DIV / 0	DIV / 0	13,43	-82,56
4 <sup>a</sup>	28,95	0,80	DIV / 0	DIV / 0	28,95	87,15

Como mostrado nas TAB 4.10 e 4.11, os resultados também não foram satisfatórios. Foram encontrados os mesmos valores de elevação, quando comparados com os resultados do

Experimentos 3, TAB. 4.8, e Experimento 4, TAB. 4.9. Com relação aos valores de conteira, quando comparadas as TAB. 4.10 e 4.11, esses foram iguais, sendo que com os sinais trocados para a segunda e quarta corridas do *Master Level* e para a primeira corrida da Mesa Giratória. Os valores para a terceira e quarta corridas da Mesa Giratória não foram obtidos, pois, durante os cálculos, apareceram duas divisões por zero. Devido a esses fatores, partiu-se para o Experimento 6.

#### Experimento 6:

No Experimento 6, ou melhor, numa última tentativa de aproveitamento das leituras realizadas nesse ensaio que ocorreu no CASOP, foi calculado o Ponto Alto de cada plano em relação ao Plano Horizontal. Dessa vez, utilizando-se a média de todas as leituras realizadas por cada clinômetro. Sendo que o sincronismo, entre as medidas, foi realizado para os quatro clinômetros simultaneamente. Foram analisadas as orientações dos eixos em relação às posições dos clinômetros A, B, C e D. Essa análise teve o objetivo de se atribuir sinais positivos ou negativos aos valores das médias das medidas realizadas por cada um deles. E, de acordo com as FIG. 4.12 e 4.13, a cada corrida, cada um dos dois clinômetros, instalados no *Master Level* e na Mesa Giratória, mudava de eixo (X e Y). Os cálculos foram realizados primeiramente para os quatro clinômetros posicionados de acordo com a FIG. 4.12. Em seguida, trocou-se A por B e C por D, ou seja,  $\mu$  por  $\eta$ . A TAB. 4.12 apresenta os resultados do Experimento 6. Após a troca de  $\mu$  por  $\eta$ , todos os valores de elevação permaneceram os mesmos tanto para o *Master Level* quanto para a Mesa Giratória. Os valores para conteira foram complementares aos encontrados antes da troca, no caso do *Master Level*. Para a Mesa Giratória, os valores de conteira foram iguais. Mas, mesmo assim, os resultados do Ponto Alto para as quatro corridas continuaram muito diferentes, não alcançando as expectativas.

Como pode ser verificado pelos Experimentos 1 à 6, apesar de diversas tentativas de se buscar uma correta orientação dos eixos e sincronização das medidas, os resultados foram insatisfatórios. Então, começou-se a questionar as observações obtidas através dos clinômetros pertencentes à Marinha. Não foi facultado o acesso ao *software* que gerou as medidas e não se teve acesso ao processo de coleta de dados completamente. Portanto, não houve possibilidade de uma análise mais profunda sobre as causas dessas inconsistências. Por

esses motivos, os dados fornecidos pelos equipamentos da Marinha foram abandonados, gerando a necessidade de se buscar um novo equipamento para a realização dos experimentos.

TAB.4.12: Resultados obtidos no Experimento 6.

<b>ZERO DECIMAIS</b>					
<b>MASTER LEVEL</b>					
<b>MÉDIA DAS LEITURAS</b>	<b>CORR.</b>	<b>E (') e C (°)</b>	<b>E (') e C (°) (trocando B e A)</b>	<b>E (') e C (°) (cálculo c/ a média das medidas)</b>	<b>E (') e C (°) (cálculo c/ a média das medidas e trocando B e A.</b>
<b>B (0,083) A (-0,060)</b>	<b>1<sup>a</sup> (Y) B + (X) A +</b>	6,42' aos 32,56°	6,42' aos 57,44°	6,00' aos 36,87°	6,00' aos 53,13°
<b>B (0,180) A (0,021)</b>	<b>2<sup>a</sup> (X) B + (Y) A +</b>	10,96' aos 8,56°	10,96' aos 81,44°	10,87' aos 6,65°	10,87' aos 83,34°
<b>B (0,224) A (-0,040)</b>	<b>3<sup>a</sup> (Y) B - (X) A +</b>	14,07' aos -10,96°	14,07' aos -79,04°	13,65' aos -10,13°	13,65' aos -79,88°
<b>B (0,150) A (-0,128)</b>	<b>4<sup>a</sup> (X) B + (Y) A -</b>	12,74' aos -37,71°	12,74' aos -52,29°	11,83' aos -40,48°	11,83' aos -49,53°
<b>ZERO DECIMAIS</b>					
<b>MESA GIRATÓRIA</b>					
<b>MÉDIA DAS LEITURAS</b>	<b>CORR.</b>	<b>E (') e C (°)</b>	<b>E (') e C (°) (trocando B e A)</b>	<b>E (') e C (°) (cálculo c/ a média das medidas)</b>	<b>E (') e C (°) (cálculo c/ a média das medidas e trocando B e A.</b>
<b>D (0,494) C (-0,228)</b>	<b>1<sup>a</sup> (X) D + (Y) C +</b>	32,69' aos 25,11°	32,69' aos 25,11°	32,64' aos 24,78°	32,64' aos 24,78°
<b>D (0,274) C (-0,318)</b>	<b>2<sup>a</sup> (Y) D - (X) C +</b>	25,23' aos -49,91°	25,23' aos -49,91°	25,19' aos -49,25°	25,19' aos -49,25°
<b>D (0,223) C (-0,028)</b>	<b>3<sup>a</sup> (X) D + (Y) C -</b>	13,45' aos -7,02°	13,45' aos -7,02°	13,49' aos -7,16°	13,49' aos -7,16°
<b>D (0,478) C (0,016)</b>	<b>4<sup>a</sup> (Y) D + (X) C +</b>	29,24' aos 1,73°	29,24' aos 1,73°	28,70' aos 1,92°	28,70' aos 1,92°

#### 4.4 EXPERIMENTOS EM BANCADA REALIZADOS NO IME

Os experimentos em bancada realizados com os clinômetros da Marinha não tiveram resultados satisfatórios, portanto houve a necessidade de se buscar um outro equipamento para a realização dos experimentos dessa pesquisa. Mais adiante, teve-se conhecimento de que o Laboratório de Projetos Mecânicos do IME havia adquirido dois sensores inerciais, modelo 3DM-GX2, da *MicroStrain*, FIG. 4.14. Portanto, foram realizados, em março de 2011, experimentos em bancada com os dois sensores. Os dados técnicos desse equipamento podem ser visualizados no ANEXO 8.2. Esses sensores são uma combinação de, entre outros dispositivos, um acelerômetro e uma giro triaxiais. Esses equipamentos e os resultados produzidos pelas medidas realizadas por eles constituem a fase experimental final dessa dissertação.



Fonte: <http://www.microstrain.com/3dm-gx2.aspx>

FIG. 4.14 Sensor Inercial 3DM-GX2, da *MicroStrain*.

Para os experimentos em bancada, realizados no IME, foram utilizados os seguintes itens:

- 2 sensores inerciais modelo 3DM-GX2, da *MicroStrain* - N/S: 1710 e 1798;
- Uma base quadrada de madeira, com cada lado medindo 54,5 cm;
- Uma folha de papel A4 com marcações de 0° à 360°, de 10° em 10°;

- Dispositivos para possibilitar a introdução de inclinações na base de madeira;
- Base niveladora;
- 1 cabo modelo MICROSTRAIN RS-232-4005-0037 para interligar o sensor ao cabo conversor USB / serial;
- 1 cabo conversor USB / serial;
- Um *laptop* Asus modelo Eee PC 1000H, Intel (R) Atom (TM), CPU N270, 1.60 GHz, 0,99 GB de RAM, Windows XP; e
- *Software* Inertia – Link 1.2 – *Software* que acompanha o sensor.

Inicialmente, para possibilitar a familiarização com o equipamento, foram realizadas algumas leituras com o sensor em duas bases, uma inclinada e outra na posição horizontal. Essas leituras foram feitas posicionando-se o sensor de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , de  $45^\circ$  em  $45^\circ$ . Como se trata de um equipamento triaxial, foram obtidas leituras nos três eixos: X, Y e Z. A variação em torno do eixo X representa o movimento de *roll*, em torno do eixo Y, o movimento de *pitch* e em torno do eixo Z, o de *heading*, FIG. 2.2. No caso dessa proposta, como nas FIG. 3.3 e 3.4, a variação em torno do eixo Y é representada pelo ângulo  $\mu$  e em torno do eixo X, pelo ângulo  $\eta$ . Na FIG. 4.15 pode ser visualizado o arranjo para a realização dos testes com o referido sensor e na FIG. 4.16 aparece, em detalhe, a tela do *laptop* com o *software* do sensor em operação. A TAB. 4.13 mostra essas primeiras leituras.



FIG. 4.15 Arranjo para realização dos testes em bancada no IME.



FIG. 4.16 Tela do *laptop* com o *software* Inertia – Link 1.2.

Após o entendimento da operação do sensor, sempre posicionando-o de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , de  $45^\circ$  em  $45^\circ$ , foram realizados os seguintes experimentos para os dois sensores N/S 1710 e 1798:

#### Experimento 7:

Leituras com o sensor em cima da base de madeira na posição horizontal, com e sem a utilização da base niveladora, conforme FIG. 4.17, 4.18 e 4.19. A utilização da base niveladora foi para verificar se a base de madeira poderia ser considerada uma superfície realmente plana, como também para observar se o material metálico teria influência nas medições.



FIG. 4.17 Base niveladora posicionada em cima da base de madeira (plano horizontal).



FIG. 4.18 Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base niveladora.

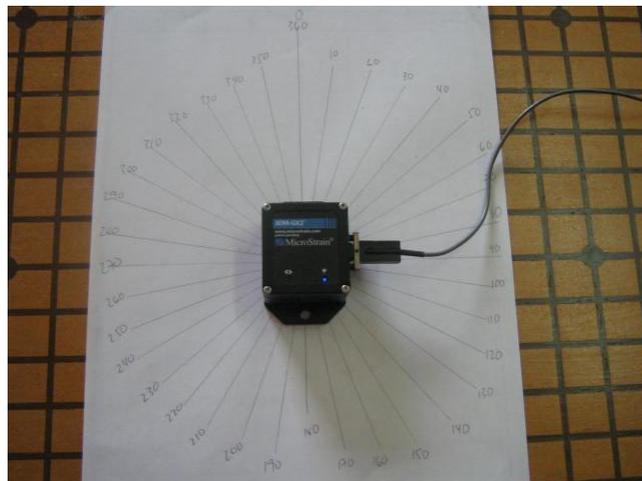


FIG. 4.19 Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base de madeira (plano horizontal) sem a base niveladora.

#### Experimento 8:

Leituras com o sensor em cima da base de madeira com a inclinação  $I$ , em torno de  $1,8^\circ$  ( $108^\circ$ ), como mostrado na FIG. 4.20.



FIG. 4.20 Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base de madeira com inclinação I.

#### Experimento 9:

Leituras com o sensor em cima da base de madeira com a inclinação II, em torno de  $5,5^\circ$  ( $330^\circ$ ), que pode ser visualizado na FIG. 4.21.



FIG. 4.21 Sensor 3DM-GX2 posicionado em cima da base de madeira com inclinação II.

A cada anotação de leitura, esperava-se o intervalo de 40 segundos para permitir a estabilização do sensor.

#### 4.4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS EM BANCADA REALIZADOS NO IME

Observando-se a TAB. 4.13 e as FIG. 4.22 e 4.23, pode ser verificado que as leituras de X e Y, para a base inclinada, variam segundo aproximadamente uma senóide, o que era esperado. Mas, as leituras de X e Y, para a base na posição horizontal, praticamente se mantiveram estáveis. Daí, pode-se concluir que, na realidade, o plano de referência do sensor não é o plano horizontal. Portanto, esses valores deveriam ser trabalhados antes de serem aplicados na fórmula do plano resultante, EQ 3.1, do capítulo 3. Ou melhor, todos as leituras para os planos inclinados deveriam ser subtraídas dos valores correspondentes, nas mesmas conteiras, lidos para o plano na posição horizontal. Dessa forma, a referência passaria a ser o plano horizontal.

TAB. 4.13 Leituras iniciais.

CONTEIRA (em graus)	PLANO INCLINADO			PLANO HORIZONTAL		
	X	Y	Z	X	Y	Z
	(em graus)			(em graus)		
<b>0</b>	-6,6	-7,0	8,9	-6,6	-9,9	0,3
<b>45</b>	-4,0	-8,5	49,0	-6,5	-10,4	37,7
<b>90</b>	-3,4	-10,9	87,7	-6,7	-10,2	79,7
<b>135</b>	-4,8	-13,3	144,6	-6,8	-10,2	135,3
<b>180</b>	-7,4	-13,9	-160,4	-6,8	-10,0	-169,8
<b>225</b>	-10,0	-12,2	-109,4	-6,9	-10,1	-123,5
<b>270</b>	-10,6	-9,4	-70,8	-6,9	-10,0	-81,5
<b>315</b>	-9,0	-7,2	-31,3	-6,7	-10,0	-40,7
<b>360</b>	-6,4	-6,6	9,3	-6,8	-10,0	0,5

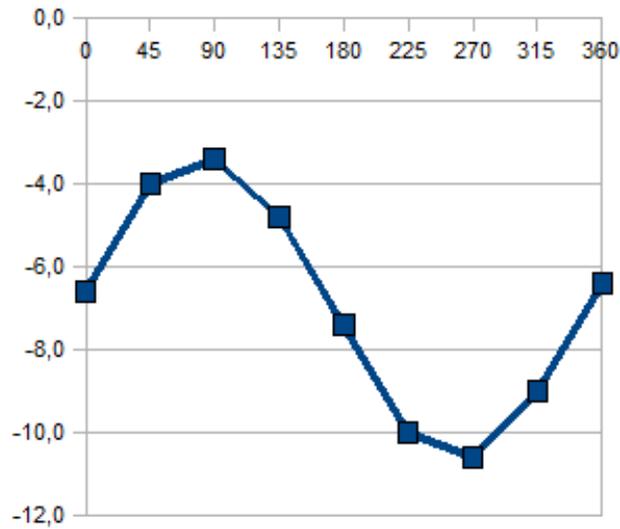


FIG. 4.22 Senóide referente às leituras de X.

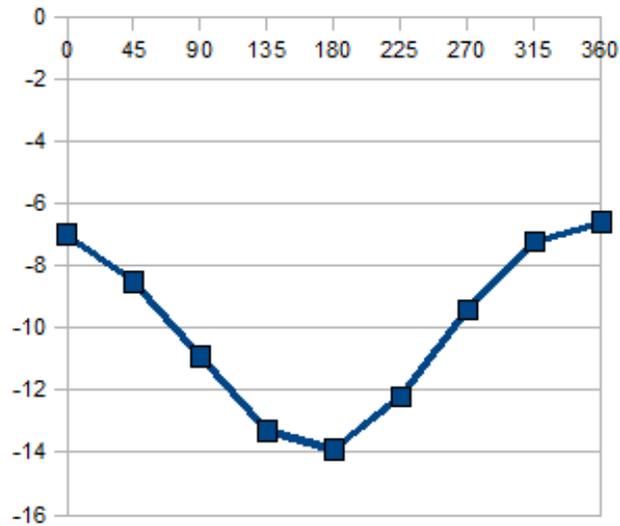


FIG. 4.23 Senóide referente às leituras de Y.

As leituras iniciais foram realizadas girando-se o sensor de 0° à 360°, de 45° em 45°. Comparando-se as leituras obtidas com o equipamento em cima de um plano inclinado e em cima de um plano na posição horizontal, concluiu-se que os planos de referência são característicos de cada sensor. Com base nesse entendimento, deu-se início aos experimentos com o sensor inercial 3DM-GX2. Os experimentos a seguir foram realizados para os dois equipamentos N/S 1710 e 1798.

### Experimento 7:

No Experimento 7, foram realizadas as medidas de inclinação no plano horizontal. As leituras foram obtidas de dois modos. Um com a utilização de uma base niveladora e outro sem o referido elemento, conforme FIG. 4.18 e 4.19. O sensor foi posicionado, de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , de  $45^\circ$  em  $45^\circ$ , em cima da base de madeira, sem inclinação alguma, representando o plano horizontal. Aguardava-se em torno de 40 segundos para a estabilização do sensor naquela determinada posição. Somente após a estabilização do sensor eram registradas as leituras realizadas pelo mesmo. Essas leituras eram transferidas para o *laptop*, sendo que para cada marcação ou conteira eram computados em torno de 1.000 registros. Na FIG. 4.24 pode ser visualizada parte de um dos arquivos, aberto no *BrOffice*, transferidos para o computador. Ao final dessa etapa foram gerados 9 arquivos, de modo que cada um deles correspondente aos 1.000 registros feitos para cada marcação. Lembrando que o procedimento foi realizado para o sensor posicionado com e sem a base niveladora, para os dois equipamentos disponíveis.

Planilha1			
MicroStrain Logging Session 17/3/2011 10:33:07			
3DM-GX2 #1710			
Attitude & 3D Object			
Time	Pitch Y	Roll X	Heading Z
0.000000	-9.752363	-6.711631	-44.839925
0.003340	-9.749974	-6.711849	-44.837751
0.006680	-9.748719	-6.712851	-44.836756
0.010020	-9.746660	-6.711352	-44.835740
0.030059	-9.735811	-6.715050	-44.842205
0.033398	-9.733189	-6.718128	-44.842912
0.036738	-9.732606	-6.720827	-44.840694
0.060117	-9.735409	-6.719963	-44.835872
0.063457	-9.734130	-6.719440	-44.833750

FIG. 4.24 Parte de arquivo transferido para o *laptop*.

Em seguida, foram calculadas as médias das leituras registradas para Y (*pitch*) e X (*roll*), mostradas na FIG. 4.24, em cada uma das marcações ou conteiras de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , de  $45^\circ$  em  $45^\circ$ , conforme TAB. 4.14 e 4.15. Os valores gerados, com e sem a base niveladora, estão muito próximos. Para o sensor N/S 1710, a diferença, em valor absoluto, de X foi de  $0,102^\circ$  ( $6,12'$ ) e de Y foi de  $0,098^\circ$  ( $5,88'$ ). Para o sensor N/S 1798, a diferença, em valor absoluto, de X foi de  $0,297^\circ$  ( $17,82'$ ) e de Y foi de  $0,089^\circ$  ( $5,34'$ ).

TAB. 4.14 Médias calculadas para o sensor N/S 1710.

<b>PLANO HORIZONTAL</b>					
<b>SENSOR 3DM-GX2 N/S 1710</b>					
<b>COM BASE NIVELANTE (MÉDIAS)</b>			<b>SEM BASE NIVELANTE (MÉDIAS)</b>		
<b>CONTEIRA (°)</b>	<b>Y (°)</b>	<b>X (°)</b>	<b>CONTEIRA (°)</b>	<b>Y (°)</b>	<b>X (°)</b>
<b>0</b>	-9,706	-6,578	<b>0</b>	-9,638	-7,075
<b>45</b>	-9,785	-6,513	<b>45</b>	-9,576	-7,055
<b>90</b>	-10,014	-6,577	<b>90</b>	-9,471	-6,870
<b>135</b>	-10,017	-6,893	<b>135</b>	-9,636	-6,862
<b>180</b>	-10,060	-6,977	<b>180</b>	-9,554	-6,862
<b>225</b>	-9,567	-7,560	<b>225</b>	-9,732	-6,869
<b>270</b>	-9,205	-6,921	<b>270</b>	-9,444	-6,892
<b>315</b>	-9,683	-6,735	<b>315</b>	-9,787	-6,922
<b>360</b>	-9,497	-6,753	<b>360</b>	-9,814	-7,015
<b>MÉDIA TOTAL</b>	<b>-9,726</b>	<b>-6,834</b>	<b>MÉDIA TOTAL</b>	<b>-9,628</b>	<b>-6,936</b>

TAB. 4.15 Médias calculadas para o sensor N/S 1798.

<b>PLANO HORIZONTAL</b>					
<b>SENSOR 3DM-GX2 N/S 1798</b>					
<b>COM BASE NIVELANTE (MÉDIAS)</b>			<b>SEM BASE NIVELANTE (MÉDIAS)</b>		
<b>CONTEIRA (°)</b>	<b>Y (°)</b>	<b>X (°)</b>	<b>CONTEIRA (°)</b>	<b>Y (°)</b>	<b>X (°)</b>
<b>0</b>	3,687	4,956	<b>0</b>	3,628	5,328
<b>45</b>	3,577	4,836	<b>45</b>	3,675	5,117
<b>90</b>	3,520	5,021	<b>90</b>	3,679	5,147
<b>135</b>	2,985	4,870	<b>135</b>	3,652	5,335
<b>180</b>	3,502	4,777	<b>180</b>	3,458	5,104
<b>225</b>	3,713	4,986	<b>225</b>	3,626	5,113
<b>270</b>	3,604	4,520	<b>270</b>	3,531	5,414
<b>315</b>	3,583	5,093	<b>315</b>	3,484	5,242
<b>360</b>	3,314	5,080	<b>360</b>	3,552	5,008
<b>MÉDIA TOTAL</b>	<b>3,498</b>	<b>4,904</b>	<b>MÉDIA TOTAL</b>	<b>3,587</b>	<b>5,201</b>

#### Experimento 8:

No Experimento 8 foi introduzida a inclinação I, em torno de  $1,8^\circ$  ( $108'$ ), à base de madeira. Conforme mostrado na FIG. 4.20, foram, então, realizadas leituras com o sensor inercial 3DM-GX2, posicionado em cima dessa base de madeira. Essas leituras foram registradas, manualmente, de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , de  $45^\circ$  em  $45^\circ$  de marcação ou conteira. Antes do registro de cada leitura, eram aguardados em torno de 40 segundos para que o equipamento se estabilizasse. Depois, foram subtraídos dessas leituras os valores das médias, calculados para X e Y, para o plano horizontal sem a base niveladora. O objetivo dessa subtração é a obtenção dos valores de inclinação em relação ao plano horizontal.

#### Experimento 9:

A metodologia utilizada no Experimento 9 foi exatamente a mesma realizada para o Experimento 8. A diferença foi que, dessa vez, utilizou-se a inclinação II, em torno de  $5,5^\circ$  ( $330'$ ), de acordo com a FIG. 4.21.

As TAB. 4.16 à 4.19 mostram os registros dessas leituras e desses cálculos para os dois equipamentos N/S 1710 e 1798. A seguinte legenda deverá ser adotada para as TAB. 4.16 à 4.20.

#### Legenda:

C – Conteira em graus

E – Elevação em graus

DIF – Diferença

INC – Inclinação

PH – Plano horizontal

PA – Ponto Alto

O *software* do sensor inercial 3DM-GX2 fornece as leituras referentes ao eixo Z em dois sentidos, ou seja, no sentido horário de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  e no sentido anti-horário de  $0^\circ$  à  $-180^\circ$ . Nas TAB. 4.16 à 4.19, todos os valores coletados para Z, quando necessário, foram adaptados para o sentido horário de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ .

TAB. 4.16 Leituras e cálculos para a inclinação I, referentes ao sensor N/S 1710.

SENSOR N/S 1710									
INCLINAÇÃO I									
C (°)	LEITURAS (°)			MÉDIA PLANO HORIZONTAL (°)			DIF INC I – PH (°)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0	-6,70	-7,60	359,60	-6,94	-9,63	359,82	0,24	2,03	-0,22
45	-5,40	-8,70	38,00	-6,94	-9,63	36,65	1,54	0,93	1,35
90	-4,80	-9,80	78,00	-6,94	-9,63	78,87	2,14	-0,17	-0,87
135	-5,80	-11,10	128,70	-6,94	-9,63	130,78	1,14	-1,47	-2,08
180	-7,10	-11,60	188,40	-6,94	-9,63	189,87	-0,16	-1,97	-1,47
225	-8,50	-11,00	235,50	-6,94	-9,63	238,93	-1,56	-1,37	-3,43
270	-8,70	-9,50	277,10	-6,94	-9,63	280,82	-1,76	0,13	-3,72
315	-8,10	-8,30	317,50	-6,94	-9,63	321,99	-1,16	1,33	-4,49
360	-6,70	-7,80	359,50	-6,94	-9,63	2,72	0,24	1,83	356,78

TAB. 4.17 Leituras e cálculos para a inclinação I, referentes ao sensor N/S 1798.

SENSOR N/S 1798									
INCLINAÇÃO I									
C (°)	LEITURAS (°)			MÉDIA PLANO HORIZONTAL (°)			DIF INC I – PH (°)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0	5,00	5,40	357,20	5,20	3,59	358,87	-0,20	1,81	-1,67
45	6,20	4,90	37,40	5,20	3,59	40,19	1,00	1,31	-2,79
90	7,00	3,60	102,70	5,20	3,59	101,53	1,80	0,01	1,17
135	6,40	2,30	176,20	5,20	3,59	180,79	1,20	-1,29	-4,59
180	5,00	1,60	226,30	5,20	3,59	231,39	-0,20	-1,99	-5,09
225	3,50	2,20	260,40	5,20	3,59	262,20	-1,70	-1,39	-1,80
270	3,30	3,80	290,30	5,20	3,59	295,13	-1,90	0,21	-4,83
315	3,70	5,00	320,90	5,20	3,59	326,42	-1,50	1,41	-5,52
360	5,00	5,60	355,80	5,20	3,59	358,71	-0,20	2,01	-2,91

TAB. 4.18 Leituras e cálculos para a inclinação II, referentes ao sensor N/S 1710.

SENSOR N/S 1710									
INCLINAÇÃO II									
C (°)	LEITURAS (°)			MÉDIA PLANO HORIZONTAL (°)			DIF INC II – PH (°)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0	-6,00	-4,20	359,90	-6,94	-9,63	359,82	0,94	5,43	0,08
45	-2,20	-6,40	36,70	-6,94	-9,63	36,65	4,74	3,23	0,05
90	-1,00	-10,80	77,30	-6,94	-9,63	78,87	5,94	-1,17	-1,57
135	-3,30	-14,20	128,00	-6,94	-9,63	130,78	3,64	-4,57	-2,78
180	-7,70	-15,20	189,10	-6,94	-9,63	189,87	-0,76	-5,57	-0,77
225	-11,50	-13,30	236,00	-6,94	-9,63	238,93	-4,56	-3,67	-2,93
270	-12,60	-9,00	279,10	-6,94	-9,63	280,82	-5,66	0,63	-1,72
315	-10,20	-5,40	318,80	-6,94	-9,63	321,99	-3,26	4,23	-3,19
360	-6,10	-4,20	359,60	-6,94	-9,63	2,72	0,84	5,43	356,88

TAB. 4.19 Leituras e cálculos para a inclinação II, referentes ao sensor N/S 1798.

SENSOR N/S 1798									
INCLINAÇÃO II									
C (°)	LEITURAS (°)			MÉDIA PLANO HORIZONTAL (°)			DIF INC II – PH (°)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0	4,90	9,00	0,00	5,20	3,59	358,87	-0,30	5,41	-358,87
45	8,70	7,50	41,70	5,20	3,59	40,19	3,50	3,91	1,51
90	10,50	3,50	103,70	5,20	3,59	101,53	5,30	-0,09	2,17
135	8,90	-0,40	176,50	5,20	3,59	180,79	3,70	-3,99	-4,29
180	4,60	-2,00	228,20	5,20	3,59	231,39	-0,60	-5,59	-3,19
225	0,60	-0,40	263,10	5,20	3,59	262,20	-4,60	-3,99	0,90
270	-0,60	3,80	293,80	5,20	3,59	295,13	-5,80	0,21	-1,33
315	1,00	7,50	323,90	5,20	3,59	326,42	-4,20	3,91	-2,52
360	4,90	9,20	359,50	5,20	3,59	358,71	-0,30	5,61	0,79

Em seguida, os valores das diferenças entre as inclinações e o plano horizontal foram introduzidos na planilha de cálculo do *BrOffice* do APÊNDICE 7.5, onde esses valores foram aplicados na EQ 3.1 do Plano Resultante, capítulo 3. Parte dessa planilha é mostrada na FIG. 4.25.

Os valores de conteira foram calculados, aplicando-se os valores das diferenças entre as inclinações e o plano horizontal na planilha do APÊNDICE 7.3. De acordo com a planilha do APÊNDICE 7.5, com relação a esses valores encontrados para a conteira, pode ser verificado que a diferença entre cada conteira e sua próxima varia em torno de 45°. O que já seria previsível, pois as leituras para as inclinações foram realizadas de 0° à 360°, de 45° em 45°. Em seguida, esses valores foram referenciados à origem, gerando a conteira para cada uma das marcações.

N/S: 1710	Leituras para Inclinação I		Leituras para Inclinação II		X	Y	sin X cos X	sin Y cos Y	a = - sin Y cos X b = - cos Y sin X c = cos Y cos X	a <sup>2</sup> b <sup>2</sup> c <sup>2</sup>	Inclinação I N/S: 1710	
	X	Y	X	Y							Elevação minutos	Elevação graus
Conteira					1	1						
0	0,24	2,03	0,94	5,43	0,240	2,030	0,004189 0,999991	0,035423 0,999372	-0,035422461 -0,004186149	0,001254751 0,000017524	<b>122,647</b>	<b>2,044</b>
45	1,54	0,93	4,74	3,23	1,540	0,930	0,026875 0,999639	0,016231 0,999868	-0,016224987 -0,026871294	0,000263250 0,000722066	<b>107,928</b>	<b>1,799</b>
90	2,14	-0,17	5,94	-1,17	2,140	-0,170	0,037341 0,999303	-0,002967 0,999996	0,002964986 -0,037341198	0,000008791 0,001394365	<b>128,804</b>	<b>2,147</b>
135	1,14	-1,47	3,64	-4,57	1,140	-1,470	0,019895 0,999802	-0,025654 0,999671	0,025648448 -0,019888893	0,000657843 0,000395568	<b>111,596</b>	<b>1,860</b>
180	-0,16	-1,97	-0,76	-5,57	-0,160	-1,970	-0,002793 0,999996	-0,034376 0,999409	0,034376078 0,002790873	0,001181715 0,000007789	<b>118,589</b>	<b>1,976</b>
225	-1,56	-1,37	-4,56	-3,67	-1,560	-1,370	-0,027224 0,999629	-0,023909 0,999714	0,023899871 0,027215990	0,000571204 0,000740710	<b>124,544</b>	<b>2,076</b>
270	-1,76	0,13	-5,66	0,63	-1,760	0,130	-0,030713 0,999528	0,002269 0,999997	-0,002267856 0,030712885	0,000005143 0,000943281	<b>105,887</b>	<b>1,765</b>

FIG. 4.25 Cálculos para obtenção da elevação para a inclinação I, referente ao sensor N/S 1710.

Os resultados finais que representam o Ponto Alto de cada plano inclinado podem ser visualizados na TAB. 4.20. Como era esperado, para as inclinações I e II, os valores de elevação e conteira (marcação) foram muito próximos ao longo dos 360°. Isso se deve ao fato de que o plano permaneceu o mesmo, ou melhor, não teve a sua inclinação alterada durante as medições. Calculou-se, então, a média dos valores de elevação e conteira para representar o Ponto Alto para aquela determinada inclinação.

Com relação à inclinação I, a diferença entre o Ponto Alto, quando comparados os dois sensores, em valores absolutos, foi de  $0,0^\circ$  ( $0,0'$ ) para elevação e de  $6^\circ$  ( $360'$ ) para conteira. Com relação à inclinação II, a diferença entre o Ponto Alto, quando comparados os dois sensores, em valores absolutos, foi de  $0,1^\circ$  ( $6'$ ) para elevação e de  $8^\circ$  ( $480'$ ) para conteira.

Para o mesmo sensor, quando comparados os valores de conteira das inclinações I e II, pode ser verificado que a diferença, em valores absolutos, foi de  $2^\circ$  ( $120'$ ) para o sensor N/S 1710 e de  $0^\circ$  ( $0'$ ) para o de N/S 1798.

TAB. 4.20 Resultados do Ponto Alto das inclinações I e II.

	SENSOR N/S 1710					SENSOR N/S 1798			
	INC I		INC II			INC I		INC II	
	PA		PA			PA		PA	
C ( $^\circ$ )	E ( $^\circ$ )	C ( $^\circ$ )	E ( $^\circ$ )	C ( $^\circ$ )	E ( $^\circ$ )	C ( $^\circ$ )	E ( $^\circ$ )	C ( $^\circ$ )	
0	2,0	103	5,5	100	1,8	116	5,4	113	
45	1,8	96	5,7	99	1,6	118	5,2	113	
90	2,1	105	6,1	99	1,8	110	5,3	109	
135	1,8	103	5,8	104	1,8	108	5,4	108	
180	2,0	105	5,6	102	2,0	104	5,6	104	
225	2,1	106	5,8	104	2,2	104	6,1	106	
270	1,8	106	5,7	104	1,9	104	5,8	108	
315	1,8	106	5,3	103	2,1	112	5,7	112	
360	1,8	103	5,5	101	2,0	116	5,6	113	
<b>MÉDIAS</b>	<b>1,9</b>	<b>104</b>	<b>5,7</b>	<b>102</b>	<b>1,9</b>	<b>110</b>	<b>5,6</b>	<b>110</b>	

Para se ter uma ideia dos valores das elevações introduzidas nas inclinações I e II, de acordo com a FIG. 4.26, foram realizadas as medidas de “a” e “b” utilizando-se uma régua metálica para as duas situações de inclinação. Em seguida, esses valores foram aplicados na fórmula do Teorema de Pitágoras. Os valores encontrados após os cálculos foram  $\theta = 1,8^\circ$  ( $108'$ ) para a inclinação I e  $\theta = 5,5^\circ$  ( $330'$ ) para a inclinação II. Para a inclinação I, o valor

medido para “a” foi de 1,7 cm e para “b” foi de 54,5 cm. Para a inclinação II, o valor medido para “a” foi de 5,3 cm e para “b” foi de 54,8 cm.

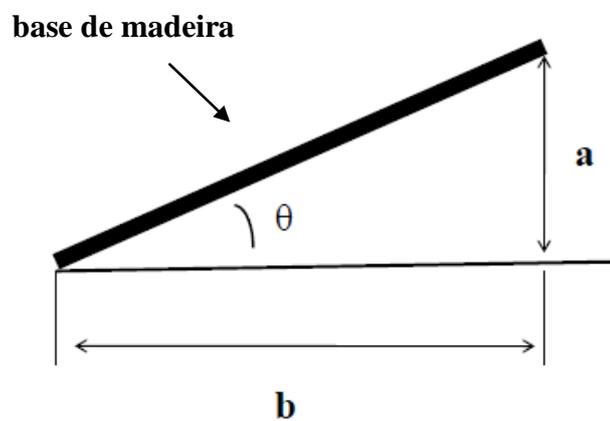


FIG. 4.26 Representação do arranjo montado.

## 5 CONCLUSÃO

Com relação às simulações com a aplicação da metodologia atual, item 4.1, TAB. 4.1, conclui-se que é possível detectar a atitude dos planos do navio através dos cálculos utilizados pela metodologia atualmente seguida pela Marinha.

Comparando-se os resultados dos testes realizados com os dados oriundos dos três *Tilt Tests*, realizados pela Marinha, item 4.2.1 e TAB. 4.2, conclui-se que para os três navios, os valores das médias encontrados para o Ponto Alto do *Master Level* foram praticamente os mesmos ou muito próximos aos valores calculados pelo método da Marinha. Em termos de elevação, a diferença foi de 0,0' para dois navios e de 0,3' para a terceira embarcação. Com relação à conteira, as diferenças foram de 1,7°; 0,1°; e 0,2°. Esses resultados indicam que a metodologia que está sendo proposta alcançou o seu objetivo, pois o valor do Ponto Alto do *Master Level* é a referência para o *Tilt Test*. Também, de acordo com a TAB. 4.2, as maiores diferenças de elevação e conteira, quando comparados os valores calculados pelo método da Marinha e pelo método proposto, estão relacionadas às leituras realizadas pela Marinha na varredura completa do círculo (0° à 360°). O que normalmente se espera é que quando clinômetros realizam leituras em um giro de horizonte, em uma superfície, sejam produzidos valores positivos e negativos. Esse fato faz com que seja gerada uma curva próxima a uma senóide. Pelo que pode ser observado, para alguns elementos, as leituras, realizadas pela Marinha, foram todas positivas ou todas negativas, ocasionando, assim, as maiores diferenças entre os dois métodos.

Com relação aos experimentos em bancada realizados na Marinha, verificando-se a TAB. 4.5, conclui-se que quanto maior o intervalo de tempo, ou seja, quanto menor a frequência de aquisição dos dados, maior será o aproveitamento dos instantes após o sincronismo das medidas. Demonstrando, assim, que não há necessidade de se utilizar clinômetros que meçam décimos ou centésimos de segundo. Equipamentos que forneçam medidas a cada segundo seriam mais adequados para esse tipo de aplicação. Supondo-se que esse sistema poderá ficar instalado em um navio de guerra durante anos, uma medida de inclinação captada por dia será o suficiente. Como pode ser verificado pelos Experimentos 1 à 6, TAB. 4.6 à 4.12, apesar de diversas tentativas de se buscar uma correta orientação dos eixos e sincronização das medidas, os resultados dos experimentos não atenderam às expectativas. Esperavam-se medidas do

Ponto Alto iguais ou muito próximas entre as 4 corridas, já que os planos permaneceram os mesmos durante a realização das medidas, mas esse fato não aconteceu. Começou-se, então, a se questionar as observações obtidas através dos clinômetros pertencentes à Marinha. Não foi facultado o acesso ao *software* que gerou as medidas e não se teve acesso ao processo de coleta de dados completamente. Portanto, não houve possibilidade de uma análise mais profunda sobre as causas das inconsistências encontradas. Provavelmente, os problemas que aconteceram nos experimentos com os equipamentos da Marinha foram consequência da não observação dos planos de referência para cada clinômetro considerado. Esse acontecimento só se tornou possível quando se trabalhou com os sensores pertencentes ao Laboratório de Projetos Mecânicos do IME, nos experimentos que se seguiram. Por esses motivos, os resultados fornecidos pelos equipamentos da Marinha não puderam ser aproveitados.

Com relação aos testes de bancada realizados no Laboratório de Projetos Mecânicos do IME, TAB. 4.20, os valores das médias encontrados para o Ponto Alto, comparando-se os dois equipamentos, estão muito próximos. Com relação à inclinação I, a diferença entre o Ponto Alto, quando comparados os dois sensores, em valores absolutos, foi de  $0,0^\circ$  ( $0,0'$ ) para elevação e de  $6^\circ$  ( $360'$ ) para conteira. Para a inclinação II, a diferença entre o Ponto Alto, quando comparados os dois sensores, em valores absolutos, foi de  $0,1^\circ$  ( $6'$ ) para elevação e de  $8^\circ$  ( $480'$ ) para conteira. Logo, conclui-se que todo o procedimento realizado para se obter as leituras reais de inclinação, em relação ao plano horizontal, está correto. Ou melhor, havia realmente a necessidade de se definir o plano de referência para cada sensor. Consequentemente, pode-se concluir que o plano de referência é uma característica de cada sensor. Pelos dados técnicos do sensor 3DM-GX2, ANEXO 8.2, em termos de elevação, a precisão do sensor é de  $\pm 0,5^\circ$  ( $30'$ ) para condições estáticas. Comparando-se os valores encontrados para o Ponto Alto, para os dois sensores, em relação à elevação, as diferenças estão de acordo com a precisão do equipamento. Quando comparados os valores de conteira, as diferenças foram de  $6^\circ$  ( $360'$ ) para a inclinação I e  $8^\circ$  ( $480'$ ) para a inclinação II. Isso pode ser explicado pela instabilidade que o sensor 3GM-GX2 possui em relação às medidas coletadas para o eixo Z (*heading*). Durante os experimentos, verificou-se que os valores variavam, mesmo após o intervalo de tempo aguardado para a estabilização do sensor. Esse intervalo foi em torno de 40 segundos. Comparando-se os valores de conteira das inclinações I e II, para o mesmo equipamento, pode ser observada a proximidade dos valores. A diferença, em valores absolutos, foi de  $2^\circ$  ( $120'$ ) para o sensor N/S 1710 e de  $0^\circ$  ( $0'$ ) para o de

N/S 1798. Isso se deve ao fato de que a elevação da base de madeira é que sofreu alteração, mas a direção da inclinação da base não se modificou.

Comparando-se os valores das inclinações I ( $1,8^\circ$  ou  $108'$ ) e II ( $5,5^\circ$  ou  $330'$ ) com as médias encontradas, verifica-se que a diferença, em valores absolutos, para a inclinação I foi de  $0,1^\circ$  ( $6'$ ) para os dois sensores e para a inclinação II foi de  $0,2^\circ$  ( $12'$ ) para o sensor de N/S 1710 e de  $0,1^\circ$  ( $6'$ ) para o de N/S 1798.

De acordo com os Experimentos 7, 8 e 9, provou-se que é possível a determinação da posição relativa entre a base de um armamento qualquer e o *Master Level* através da instalação de dois clinômetros uniaxiais, formando um ângulo de  $90^\circ$  entre eles. Sendo que esses dois clinômetros uniaxiais poderão ser substituídos por um clinômetro biaxial ou triaxial em cada base. Uma melhor convergência dos valores será obtida com o uso continuado dos equipamentos a bordo. Dispondo-se de um sistema, com essas características, instalado permanentemente a bordo de um navio de guerra, haverá repetibilidade ao longo do tempo, fazendo com que haja uma convergência para valores mais exatos.

Em termos financeiros, essa nova proposta poderá trazer uma economia significativa para a Marinha. Atualmente, os custos envolvidos em cada atividade de *Tilt Test* giram em torno de R\$ 100.000,00. Com a nova metodologia seria realizado um investimento único, por navio, de aproximadamente R\$ 20.000,00, considerando o custo de um clinômetro em torno de R\$ 1.000,00.

## 5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestões para futuros trabalhos, podem ser cotados:

a) Aplicação da metodologia proposta a bordo de um navio de guerra atracado a um cais. Dessa forma, poderão ser realizados estudos comparativos entre a metodologia atualmente utilizada pela Marinha para realização do *Tilt Test* e a metodologia proposta. Para a concretização desse evento, será necessária uma infra-estrutura que englobe a passagem de cabos entre compartimentos, instalação de bases para fixação dos clinômetros digitais, mão-de-obra especializada para operação dos clinômetros, computador, pessoal da tripulação do navio para manusear os armamentos, assim como, disponibilidade do navio.

b) Aplicação da metodologia proposta a bordo de um navio de guerra navegando em alto mar. A realização do *Tilt Test* com o navio navegando em alto mar poderia ser um fator, principalmente, de segurança, caso o navio necessite realizar algum disparo contra um possível alvo. Antes do tiro, a tripulação poderia verificar o alinhamento das bases dos armamentos. Consequentemente, poderia se assegurar uma melhor precisão do disparo.

c) Desenvolvimento de um *software* para a realização dos cálculos que se fazem necessários durante um *Tilt Test*, com o emprego da metodologia proposta nessa dissertação. Esse *software* receberia as leituras realizadas pelos clinômetros digitais instalados em cada base de armamento e no *Master Level*. De posse dessas informações, seriam calculados, de uma forma otimizada, os valores do Ponto Alto de cada plano de armamento e do *Master Level* em relação ao plano horizontal, como também, a inclinação relativa de cada plano de armamento em relação ao *Master Level*.

d) Estudo aprofundado do comportamento do *Digital Inclinometer*, modelo T7-1-232, uniaxial.

e) Pesquisa com outros sensores triaxiais que possuam uma estabilização melhor, principalmente em relação ao eixo Z (*heading*).

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C. R. et al. **Verificação do nivelamento das bases dos armamentos de um navio de guerra sem docagem.** In: VI SBEIN - VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, 2010, Rio de Janeiro. VI SBEIN, 2010.

ÁREA MILITAR, **Corveta Classe Barroso.** Disponível em: <<http://www.areamilitar.net/DIRECTORIO/nav.aspx?nn=50>>. Acesso em: 8 dez. 2010.

BRASIL, Marinha do Brasil – Diretoria-Geral do Material da Marinha. **Manual de Alinhamento das Corvetas Classe “Inhaúma” (MAC)**, 2003 (confidencial).

BRASIL, Marinha do Brasil – Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha. **Procedimentos de Integração e Aceitação: Procedimentos de Alinhamento Equipamentos e Sistemas SiComFrag:** Manual de Sistema. Categoria 4. DGMM 7412. 1.ed., versão A, abr. 2007 (confidencial).

CASCO DE NAVIO. Disponível em: <http://www.paideuma.net/s4a.htm>. Acesso em: 31 mar 2011.

CASOP, Marinha do Brasil – Centro de Apoio a Sistemas Operativos. **Curso de Alinhamento - Notas de Aula**, 2009.

DEPARTMENT OF THE NAVY – Naval Sea Systems Command. **Theory of Combat System Alignment.** Washington, D.C. SW225-AO-MMA010/OP762ALIGNTHEORY, rev. 1, jul. 1981 (confidencial).

DIEGUEZ, José Paulo P. **Métodos de Cálculo Numérico.** Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia e Fundação Ricardo Franco, 2005. 431p.: il. (Coleção Disseminar). ISBN 85-98013-04-8.

DIGITAL INCLINOMETER T7-1-232. Disponível em: <http://usdigital.com/products/inclinometers/absolute/t7>. Acesso em: 31 mar 2011.

FONSECA, Maurílio Magalhães. **Arte Naval.** 5.ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação Geral da Marinha, 1989. 2v.: Il. ISBN 85-7047-051-7.

GUIDORIZZI, Hamilton Luiz. **Um Curso de Cálculo.** 4.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2000. v. 1.

LAROCCA, A. P. C. **O uso do GPS como instrumento de controle de deslocamentos dinâmicos de obras civis – aplicação na área de transportes.** 2004. 218p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- M. ÇELEBI. GPS in dynamic monitoring of long-period structures. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, n. 20, p. 477-483, 2000.
- PACILÉO NETTO, N. et al. Monitoramento de Deslocamentos em Estruturas com GPS. In: 3ª ASSEMBLEIA LUSO-ESPANHOLA DE GEODÉSIA E GEOFÍSICA, 2002, Valência. **Proceedings Tomo I. Valencia : Editorial de la UPV**, 2002. v. 1. p. 165-169.
- PETER BREUER, et al. Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, n. 90, p. 223-230, 2002.
- SENSOR INERCIAL 3DM-GX2. Disponível em: <http://www.microstrain.com/3dm-gx2.aspx>. Acesso em: 31 mar 2011.
- STEINBRUCH, Alfredo; WINTERLE, Paulo. **Geometria Analítica**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.
- UNITED STATES PATENT. Secretary of the Navy (Washington, D.C.). Donald H. Lackowski. **Alignment Error Detection System**. 3,803,387, 20 set. 1972, 9 abr. 1974.

## 7 APÊNDICES

O APÊNDICE: 7.1 - TABELA DE CLINÔMETROS / INCLINÔMETROS DIGITAIS - encontra-se nas páginas 97 à 101.

Os APÊNDICES abaixo relacionados encontram-se gravados dentro do CD, o qual acompanha esse volume.

APÊNDICE: 7.2 - PLANILHA COM OS CÁLCULOS DAS SIMULAÇÕES, REFERENTE AO *MASTER LEVEL*;

APÊNDICE: 7.3 - PLANILHA COM OS CÁLCULOS DA METODOLOGIA PROPOSTA ;

APÊNDICE: 7.4 - PLANILHA COM OS CÁLCULOS COMPLEMENTARES DA METODOLOGIA PROPOSTA; e

APÊNDICE: 7.5 - PLANILHA COM OS CÁLCULOS DOS EXPERIMENTOS EM BANCADA REALIZADOS NO IME.

**TABELA DE CLINÔMETROS / INCLINÔMETROS DIGITAIS**

<b>FIRMA</b>	<b>REPRESENTANTE NO BRASIL</b>	<b>NOME / MODELO</b>	<b>PRECISÃO / RESOLUÇÃO</b>	<b>DADOS TÉCNICOS</b>	<b>PREÇO</b>
SMARTOOL	<p align="center"><b>MITUTOYO</b></p> <p>Sr. Douglas (info técnica) douglas@mitutoyo.com.br Tel.: (11) 5643-0044</p> <p>Sra. Ana (Representante RJ – vendas) Tel.: (21) 3333-4899</p> <p>Sr. Sérgio Luiz (Gerente do RJ) Tel.: (21) 9418-6971 sergio_rj@mitutoyo.com.br</p>	DIGITAL PROTRACTOR / PRO 3600	<p><b>Resolução:</b> 0.6' = 0.01° (0 a 9.99°) 6' = 0.10° (10 a 90°)</p> <p><b>Precisão:</b> +- 3' = +- 0.05° (0 a 10°) +- 6' = +- 0.10° (80 a 90°) +- 12' = +- 0.20° (10 a 80°)</p>	<p>UNIAXIAL (teria que ser posicionado ao longo dos 360°) Range: 360° Saída: RS 232 Possui Display Software grátis pela internet Peso: 295 g Funciona com bateria de 9 volts O manual informa que o cabo é um cabo padrão que pode ser montado pelo cliente com um conector DB-9 para o PC e um conector específico para o equipamento. Eles oferecem cabos de 1,82 m; 7,62 m; e 15,24 m.</p>	<p>Medidor de Inclinação (código da Mitutoyo: 950316): R\$ 3080,00</p> <p>Cabo Medidor / PC (código Mitutoyo: 5050AAA983): R\$ 1975,48, com 1 metro.</p>
		INCLINOMETER PROBE / DIS-500	<p><b>Resolução:</b> 0,01 mm (0.00039"=1.08x10<sup>-7</sup>°)</p> <p><b>Precisão:</b> 0.07" (1.94 x 10<sup>-5</sup>°) para 2mm e 82.02' (1.367°) acima de 25 metros.</p>	<p>BIAXIAL. Usado em torpedos. Bluetooth p/ PDA(digital readout) e USB do PDA p/ computador. Não possui Display Trata-se de uma ponteira (probe) fixada na extremidade de um cabo aduchado em um carretel Peso: 8,5 Kg (30 m); 9,5 Kg (50m); 11,5 Kg (100m) – Depende do comprimento do cabo. Funciona com baterias</p>	---
ROCTEST	<p>NT EMPREN. LTDA</p> <p>Sr. Ney Magalhães ntbrazil@openlink.com.br Tel.: (21) 2543-0988 ou (21) 96065928</p>	<p><a href="http://www.roctest.com/modules/AxialRealisation/img_repository/files/documents/DIS500-E5DIS500.pdf">http://www.roctest.com/modules/AxialRealisation/img_repository/files/documents/DIS500-E5DIS500.pdf</a></p>	<p><b>Resolução:</b> 0.006' =</p>	<p>UNIAXIAL. Usado p/ monitorar movimentos de</p>	

		TUFF TILT 801  <a href="http://www.roctest.com/modules/AxialRealisation/img_repository/files/documents/TUFFTILT-E5077E-W.pdf">http://www.roctest.com/modules/AxialRealisation/img_repository/files/documents/TUFFTILT-E5077E-W.pdf</a>	0.0001° (high-gain version) 0.036' = 0.0006° (standard version) 0.6' = 0.01° (wide angle version)	fundações. Tem cabo, mas não é USB. Não possui Display Peso: 0,6 Kg Saída analógica Trabalha c/ read out instruments: Model 870, ADVisor, SENSLOG	
SIGNALQUEST	Não tem representante no Brasil  Contato:  Sr. Jim Downey  jimd@signalquest.com	INCLINOMETER / SQ-SI-360DA  <a href="http://www.signalquest.com/sq-si.htm">http://www.signalquest.com/sq-si.htm</a> e  <a href="http://www.signalquest.com/datasheets/SQ-SI-360DA_MEMS%20Inclinometer%20Datasheet.pdf">http://www.signalquest.com/datasheets/SQ-SI-360DA_MEMS%20Inclinometer%20Datasheet.pdf</a>	<b>Resolução:</b> 6' = 0.1° (digital serial output)  <b>Precisão:</b> +- 60' = +- 1°	SINGLE AXIS - Wide range (360°) DUAL AXIS - Restricted range (+-70°) Possui USB Software (Signal View) grátis no site. Para USB e RS232, recomendam cabos de no max. 6 metros, apesar de clientes terem sucesso com cabos de até 30,48 metros. Para RS-485, podem ser usados cabos de até 914,4 metros. O cabo vem acompanhado do Signal View real time data logging, display software e interface DLL para desenvolvimento de aplicações pelo cliente.	R\$ 760,00 (US\$ 425) O preço inclui inclinômetro, cabo USB ou RS232 e caixa do equipamento
		INCLINOMETER / SQ-SI2X-360DA  <a href="http://www.signalquest.com/sq-si2x.htm">http://www.signalquest.com/sq-si2x.htm</a> e  <a href="http://www.signalquest.com/datasheets/SQ-SI2X-360DA_Wide%20Range%20MEMS%20Inclinometer%20Datasheet.pdf">http://www.signalquest.com/datasheets/SQ-SI2X-360DA_Wide%20Range%20MEMS%20Inclinometer%20Datasheet.pdf</a>	<b>Resolução:</b> 6' = 0.1° (digital serial output)  <b>Precisão:</b> +- 60' = +- 1°	DUAL AXIS - Wide range Possui USB Software (Signal View) grátis no site. Para USB e RS232, recomendam cabos de no max. 6 metros, apesar de clientes terem sucesso com cabos de até 30,48 metros. Para RS-485, podem ser usados cabos de até 914,4 metros. O cabo vem acompanhado do Signal View real time data logging, display software e interface DLL para desenvolvimento de aplicações pelo cliente.	R\$ 803,00 (US\$ 450) O preço inclui inclinômetro, cabo USB ou RS232 e caixa do equipamento
US DIGITAL	Não tem representante no Brasil  Contato:	MULTI-AXIS ABSOLUTE MEMS INCLINOMETER / X3M	<b>Resolução:</b> 0.06' = 0.001° <b>Precisão:</b> Erro angular dos	MULTIAXIAL - Full 360 range in pitch & roll axis. Possui Serial interface (RS 232). USB disponível via módulo conversor USB-232. O cabo entre o inclinômetro e o computador não deve	1 eixo: R\$350,00  2eixos:

	<p>Sr. Dirk Restvedt</p> <p>Dirk.R@usdigital.com</p>	<p><a href="http://usdigital.com/products/inclinometers/">http://usdigital.com/products/inclinometers/</a> e</p> <p><a href="http://usdigital.com/products/inclinometers/absolute/x3m/">http://usdigital.com/products/inclinometers/absolute/x3m/</a></p>	<p>eixos 0 e 1 = +- 72' = +- 1.2° (dentro de um ano de calibração) e +- 90' = +- 1.5° (vida útil);</p> <p>Erro angular do eixo 2 = +- 24' = +- 0.4° (dentro de um ano de calibração) e +- 36' = +- 0.6° (vida útil);</p>	<p>ultrapassar 4,5 metros</p> <p>DLL Software disponível gratuitamente no site</p> <p>Peso: 20,4 g</p>	<p>R\$396,00</p> <p>3 eixos: R\$ 441,00</p> <p>Cabo: R\$ 59,00</p>
<p>GSI CO., LTD</p>	<p>Não tem representante no Brasil</p> <p>Contato:</p> <p>Sr. Miki Shibahara</p> <p>shibahara@po.gsinet.co.jp</p>	<p>DIGITAL CLINOMETER / GeoClino</p> <p><a href="http://www.gsinet.co.jp/english/geocline/index.html">http://www.gsinet.co.jp/english/geocline/index.html</a></p>	<p><b>Resolução:</b> 60' = 1°</p>	<p>TRIAXIAL</p> <p>Capaz de medir o ângulo e a direção de uma superfície plana em uma range de 0° a 360 ° (info por e-mail)</p> <p>Funciona com pilhas AA</p> <p>Comprimento max. cabo: 1,5 metros.</p> <p>Possui RS-232 C</p> <p>Os dados do clinômetro para o PC não podem ser transferidos em tempo real. Eles são armazenados dentro do clinômetro e depois transferidos para o PC (info por e-mail).</p> <p>Peso: 150 g</p> <p>Possui um software "GeoAssist" que transfere os dados para o computador.</p>	<p>R\$ 1096,50 (¥56,300)</p> <p>O preço inclui o equipamento, cabo serial, CD-ROM com software, certificado de garantia e manual.</p>
<p>METROLOG</p>	<p>Sr. Gabriel Calin</p> <p>gcalin@metrolog.net</p>	<p>INCLINÔMETRO SÉRIE D / G-NSDMG-023</p>	<p><b>Resolução:</b> 0.06' = 0.001°</p> <p><b>Precisão Digital:</b> 12' = 0.2°</p> <p><b>Precisão Analógica:</b> 18' = 0.3°</p>	<p>BIAXIAL</p> <p>Possui saída digital RS-232</p> <p>Campo de medição: +- 30 °</p> <p>Peso: 290 g</p> <p>Software gratuito Data Ex (permite interface c/ word, excel)</p>	<p>R\$ 4250,66 (inclinômetro)</p> <p>R\$ 221,13 (conversor USB/RS232 com cabo de 1,2 metros)</p> <p>Total: R\$ 4471,79</p>

SINGER- INSTRUMENTS	Não respondeu o contato feito por e-mail	DUAL AXIS DIGITAL INCLINOMETER / MTS-USB  <a href="http://www.singer-instruments.com/products/inclinometers/Dual_Axis_Digital_Inclinometer_MTS-USB.php">http://www.singer-instruments.com/products/inclinometers/Dual_Axis_Digital_Inclinometer_MTS-USB.php</a>	<b>Resolução:</b> $0.6' = 0.01^\circ$	DUAL AXIS. Connector : USB Type b Plug. Measuring range: $45^\circ$	---
VIGOR TECHNOLOGY	Não respondeu o contato feito por e-mail	INCLINOMETER / SST900 SERIES INCLINOMETER <a href="http://www.tiltsensorchina.com/">http://www.tiltsensorchina.com/</a> e <a href="http://www.tiltsensorchina.com/2_sst_series_inclinometer_9.html">http://www.tiltsensorchina.com/2_sst_series_inclinometer_9.html</a>	<b>Precisão</b> (in small range): $\pm 2$ arc-seconds. <b>Precisão</b> (in large range): $0.01$ arc-degrees.	SINGLE / DOUBLE AXIS. Os modelos SST920 e SST930 possuem saídas USB Ranges: $1^\circ$ a $10^\circ$ e $\pm 60^\circ$	---
ADOS W	Não respondeu o contato feito por registro na página do site	DIGITAL CLINOMETER / ICA 03  <a href="http://www.ados.it/pdf/news/ados2008_2_7_10_41_20_333994729.pdf">http://www.ados.it/pdf/news/ados2008_2_7_10_41_20_333994729.pdf</a>	<b>Resolução:</b> $6' = 0.1^\circ / \pm 45^\circ$ para Double axis; e $12' = 0.2^\circ / \pm 180^\circ$ para Single axis.	SINGLE ou DOUBLE AXIS	---

**OBS:**

- 1) Firms / Fabricantes consultados que não possuem o produto: MINIPA; SENSOR; RIO LINK; PERCON e ALFA INSTRUMENTOS (GIGA).
- 2) Firms / Fabricantes consultados que não responderam ao contato: FLUKE ; YOKOGAWA; MASERAF, DI-ELÉTRONS e SUMEX.

## 8 ANEXOS

Os ANEXOS abaixo relacionados encontram-se gravados dentro do CD, o qual acompanha esse volume.

O ANEXO: 8.1 - DADOS TÉCNICOS DO DIGITAL INCLINÔMETRO T7-1-232; e

O ANEXO: 8.2 - DADOS TÉCNICOS DO SENSOR INERCIAL 3DM-GX2.