

CONCEPÇÃO DE MANIFOLDS SUBMARINOS PARA LANÇAMENTO  
PENDULAR EM ÁGUAS ULTRA PROFUNDAS

Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

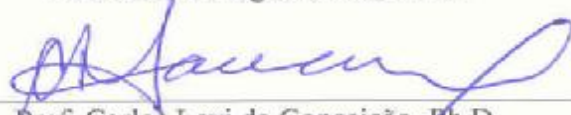
Aprovada por:



Prof. Antonio Carlos Fernandes, Ph.D.



Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.



Prof. Carlos Levi da Conceição, Ph.D.



Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.



Prof. Andre Luis Condino Fajarra, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2008

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RIBEIRO, MARIO LUIS

Concepção de Manifolds Submarinos  
para Lançamento Pendular em Águas Ultra  
Profundas [Rio de Janeiro] 2008

XXI, 241 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
D.Sc., Engenharia Oceânica, 2008)

Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Concepção de manifold
2. Instalação pendular
3. Modelo reduzido

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*À minha esposa Rafaela e à minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Antonio Carlos Fernandes, pela orientação e pelo grande apoio para realização deste trabalho.

A FMC TECHNOLOGIES DO BRASIL, empresa que deu total apoio ao desenvolvimento deste trabalho acreditando sempre nos resultados.

À Agência Nacional de Petróleo - ANP pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

Aos grandes amigos e incentivadores deste trabalho como José Américo, Maxwell Brandão, Francisco Roveri, Edson Labanca, Ebenezer de Souza e Rogério Diniz pela contribuição fundamental na realização dos ensaios.

Aos amigos Melquizedec Santos, Cassiano Neves, Fábio Mineiro e Fabio Coelho que contribuíram na interpretação dos resultados experimentais.

Ao LabOceano e ao LOC que colaboraram na realização dos ensaios experimentais.

Às pessoas que colaboraram de forma direta ou indireta, por meio de incentivo, confiança e troca de experiências.

A Deus, pela força e proteção.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.).

## CONCEPÇÃO DE MANIFOLDS SUBMARINOS PARA LANÇAMENTO PENDULAR EM ÁGUAS ULTRA PROFUNDAS

Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro

Julho/2008

Orientador: Antonio Carlos Fernandes

Programa: Engenharia Oceânica

Atualmente, existe uma tendência da utilização de testes em escala reduzida para a verificação de novos métodos de instalação de equipamentos offshore em águas ultra profundas. O Método de Instalação Pendular é um exemplo.

Devido à falta de recursos de instalação disponíveis para a utilização de manifolds de grande porte, alguns com peso superior a duzentas toneladas, em águas ultra profunda faz-se necessário o desenvolvimento de um novo método de instalação denominado Método de Instalação Pendular.

Este trabalho descreve as etapas de desenvolvimento deste método por meio da utilização da combinação de um modelo matemático conceitual, análises numéricas, utilização de software no domínio do tempo e, principalmente, a utilização de modelos reduzidos em tanque oceânico.

No passado, os testes com modelos reduzidos eram usados para a verificação de configuração previamente definida. Entretanto, no presente caso, os modelos reduzidos são utilizados para o desenvolvimento da metodologia de instalação. Particularmente neste caso, são utilizados corpos de geometria simples como esfera e caixa com e sem porosidade antes da utilização da geometria complexa como a de um manifold.

Os resultados deste estudo esclarecem os fenômenos hidrodinâmicos presentes no Método de Instalação Pendular identificando a importância da utilização de alguns dispositivos como flutuadores, contrapeso e carenagem flexível.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D. Sc.)

CONCEPT THE SUBSEA MANIFOLD FOR PENDULOUS INSTALLATION  
IN ULTRA DEEP WATER

Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro

July/2008

Advisor: Antonio Carlos Fernandes

Department: Ocean Engineering

It has been identified that there is a trend in the ocean engineering model testing field that is the support for the verification of installation methods of offshore devices over deepwater seas with or without waves. The Pendulous Installation Method is indeed a case like that. It became unpractical and/or extremely expensive to install manifolds in ultra deep water or beyond. These devices, some with more than two hundred tons, are becoming more and more common in very deep water fields and its installation has to be faced. The Pendulous Method has been devised and since has been never tried before. One has verified if it brings new problems and if that is the case, proposes solutions for these problems.

The work describes how this task has been developed by the combination of mathematical of the following tools: conceptual mathematical modeling, numerical analysis using a non-linear time domain computer program and, perhaps more importantly, the use of model tests in a deep water ocean basin.

In the past, the model testing is used to verification of designs well defined. However, in the present case, the model testing has been used to develop the installation methodology. On the other hand it required non-conventional testing as the work describes. Particularly these ones are verified by the use of simple shape like spheres, boxes with and without holes, besides a typical manifold shape used before.

The result of this work clarified the Pendulous Installation Method proposition and made it ready for more defined aspects such as the importance of floaters, counter weight and flexible faring.

# ÍNDICE

<b>GLOSSÁRIO</b>	xi
<b>SIMBOLOGIA</b>	xiii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xiv
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO</b>	1
1.1. Motivação	2
1.2. Histórico	6
1.2.1 Instalação via cabo	6
1.2.2 Balsa guindaste com eslinga	7
1.2.3 Riser de perfuração	8
1.2.4 Método da roldana	9
1.2.5 Método pendular	10
1.2.5.1 Experiência prévia	15
1.2.5.2 Análises numéricas	15
1.2.5.2 Testes com modelos reduzidos	15
1.3. Organização da Tese	16
<b>CAPÍTULO II – ENSAIOS DE LANÇAMENTO VERTICAL</b>	17
2.1. Montagem do ensaio	17
2.1.1 Sistema de vídeo	18
2.1.2 Instrumentação	20
2.2. Matriz de ensaio vertical	22
2.2.1 Esfera	23
2.2.2 Caixa de acrílico	24
2.2.3 MSGL-RO-01	28
2.3 Resultados	30
2.3.1 Esfera	30



2.3.2 Caixa de acrílico	34
2.3.3 MSGL-RO-01	38
2.4 Considerações parciais	41
<b>CAPÍTULO III – ENSAIOS DE LANÇAMENTO PENDULAR</b>	42
3.1. Montagem do ensaio	42
3.1.1 Sistema de vídeo	43
3.1.2 Instrumentação	44
3.1.3 Cabos de poliéster	44
3.1.3 Lingadas	45
3.1.4 Flutuadores	46
3.1.4 Pára-quedas	47
3.1.5 Placa triangular	47
3.2 Matriz de ensaio	48
3.2.1 Esfera	50
3.2.2 Caixa de acrílico	50
3.2.3 MSGL-RO-01	51
3.3 Resultados	52
3.3.1 Esfera	52
3.3.1.1 Cabo 3mm	52
3.3.1.2 Cabo 6mm	55
3.3.1.3 Cabo 10mm	56
3.3.1.4 Cabo 20mm	59
3.3.1.5 Cabo 25mm	60
3.3.2 Caixa de acrílico	61
3.3.3 MSGL-RO-01	67
3.4 Considerações parciais	69

<b>CAPÍTULO IV – ENSAIOS DE LANÇAMENTO PENDULAR MSGL-RO-02</b>	72
4.1 Modelos reduzidos e instrumentação	72
4.1.1 MSGL-RO-02	72
4.1.2 Linhas	73
4.1.3 Flutuadores e Bombonas	74
4.1.4 Instrumentação	75
4.2 Matriz de ensaios	77
4.2.1 MSGL-RO-02	79
4.3 Resultados	82
4.3.1 lançamento vertical	82
4.3.2 Ensaios MSGL-RO-02 na escala 1:70	86
4.3.3 Ensaios MSGL-RO-02 na escala 1:35	92
4.4 Considerações sobre as rotações excessivas no MSGL-RO-02	104
<b>CAPÍTULO V – CONTROLE DO FLUTTERING POR CONTRA-PESO</b>	112
5.1 Sistema contra-peso	112
5.2 Matriz de ensaios	114
5.3 Resultados	115
5.3.1 Manifold	115
5.3.2 manifold com lingada invertida na sub base	117
5.3.2 Manifold com sistema de contra-peso	122
5.3.2.1 Verificação do sistema com contra-peso	127
5.3.2.2 Montagem do ensaio	127
5.3.2.3 Matriz de ensaio	129
5.3.2.4 Resultados	130
5.4 Considerações parciais	140
<b>CAPÍTULO VI – CONTROLE DO FLUTTERING POR ESTABILIZADOR FLEXÍVEL</b>	141

6.1 Montagem do ensaio no canal de correnteza	141
6.2 Metodologia de análise	142
6.3 Resultados e discussão	143
6.3.1 Placa de alumínio a = 0,6 m	145
6.3.2 Placa de alumínio a = 0,3 m	146
6.3.3 Placa de PVC a1 = 0,3m e a2 = 0,2m	147
6.4 Determinação do centro de pressão vs ângulo de ataque: placa alumínio 0,3m	147
6.4.1 Montagem experimental e instrumentação para medição de cargas	147
6.4.2 Metodologia de análise	150
6.4.3 Resultados e discussão	151
6.5 Solução proposta para minimizar o fluttering: estabilizador flexível	154
6.4 Considerações parciais	159
<b>CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES</b>	160
7.1 Recomendações para trabalhos futuros	161
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	163
APÊNDICE I	166
APÊNDICE II	182
APÊNDICE III	187
APÊNDICE IV	198
APÊNDICE V	210
APÊNDICE VI	216
APÊNDICE VII	221
APÊNDICE VIII	228
APÊNDICE IX	233

## GLOSSÁRIO

*A-frame* – pórtico de içamento posicionado em embarcações do tipo AHTS.

AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) – embarcação de apoio a operações marítimas de manuseio de ancoras.

ANM (Árvores de Natal Molhada) – equipamento mecânico instalado na cabeça do poço composto basicamente de conectores e válvulas, com a finalidade de interligar as tubulações internas e externas ao poço, e de permitir o controle do fluxo de fluidos através dele.

BGL-1 (Balsa Guindaste de Lançamento 1 da Petrobras) – balsa equipada com guindaste de 1000 te, utilizada para a instalação de dutos rígidos, jaquetas e equipamentos submarinos.

Cabideiro – viga instalada no convés da BGL-1 com finalidade de suportar o manifold borda fora da embarcação.

*Data logger* – dispositivo eletrônico que registra dados ao longo do tempo.

ESDV – (*Emergency Shut Down Valve*) – válvula de bloqueio em caso de emergência tipo fail close utilizada para conter fluxo de hidrocarbonetos.

*Fair lead* – ponto de ancoragem na BGL-1

Gás-lift – método de elevação artificial de petróleo, compreendendo basicamente a injeção de gás no fluido produzido, dentro ou fora do poço, com o objetivo de viabilizar ou aumentar a produção.

GB – Diferença entre KG e KB

KB – Centro de Carena do modelo

KG – Centro de Gravidade do modelo

Manifold – equipamento de passagem e de manobra da produção ou injeção, onde o fluido ou gás é agrupado em um mesmo coletor.

*Moon-pool* – abertura no casco e/ou convés das embarcações para permitir a passagem dos tubos e equipamentos do convés para o mar.

PDA – profundidade de água.

*Pig* – dispositivo polimérico que impulsionado pelo fluído transportado no interior dos dutos, efetua a limpeza, separação de produtos e medições

*Pig diverter* – equipamento que permite o direcionamento de *pigs* entre os vários poços interligados o manifold.

PLEM – (*Pipe Line End Manifold*) – conjunto de tubulações e válvulas montado sobre quadro estrutural metálico, instalado na extremidade submarina de um ou mais duto submarino.

PLET (*Pipe Line End Termination*) – estrutura para conexão vertical direta de linhas flexíveis a rígidas ou válvulas de bloqueio.

*Rate-gyro* – sensor eletrônico capaz de medir rotações em torno de um ou mais eixos.

SS (Plataforma Semi-submersível) – estruturas marítimas erguidas sobre grandes submarinos ou flutuadores (também denominado *pontoon*).

## SIMBOLOGIA

$\Theta$  – ângulo de ataque.

$b$  – razão de aspecto da corda.

$n$  – viscosidade cinemática da água.

$r''$  – volume deslocado pela envoltória.

$q_{eq}$  – equivalente harmônico de rotação.

$q_i$  – determinada amostra do sinal temporal de rotação.

$2a$  – largura da placa.

$Ca_Y$  – massa adicional de translação (Y).

$Ca_Z$  – massa adicional de translação (Z).

$f_s$  – frequência de desprendimento de vórtices.

$L$  – calado do canal de correnteza.

$M_{MD}$  – Momento de Munck desestabilizador.

$M_{ME}$  – Momento de Munck estabilizador.

$N$  – número de amostras utilizadas.

$Re$  – número de Reynolds.

$St$  – número de Strouhal.

$U$  – velocidade de correnteza.

$U$  – velocidade de correnteza.

$V_Y$  – velocidade do corpo na direção Y.

$V_Z$  – velocidade do corpo na direção Z.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1a	Arranjo submarino do Campo de Roncador com utilização de manifolds	3
Figura 1.1b	Desenho esquemático do manifold MSGL-RO-02	4
Figura 1.2a	Embarcações utilizadas para instalação de manifolds via cabo (a) AHTS com A-frame e (b) Balsa guindaste BGL-1.	6
Figura 1.2b	Instalação do manifold do Campo de Albacora via BGL-1 com eslinga com eslingas de içamento	7
Figura 1.2c	Instalação de manifold de produção via riser de perfuração no Campo de Marlim	8
Figura 1.2d	Instalação via roldana do manifold MSGL-RO-01 no Campo de Roncador	9
Figura 1.2e	Ilustração esquemática do método de instalação pendular	13
Figura 1.2f	Etapas do processo de desenvolvimento/qualificação do método pendular	14
Figura 2.1a	Desenho esquemático do lançamento vertical no LabOceano	18
Figura 2.1b	Desenho esquemático de posicionamento do sistema de vídeo para o lançamento vertical	19
Figura 2.1c	Representação do eixo local e posicionamento dos acelerômetros (AC1) e (AC2) na interior da esfera de alumínio	20
Figura 2.1d	Representação do eixo local e posicionamento dos acelerômetros (AC1) e (AC2) no interior da caixa de acrílico	21
Figura 2.1e	Representação do eixo local e posicionamento dos acelerômetros (AC1) e (AC2) no modelo 1:35 do MSGL-RO-01	21
Figura 2.2a	Montagem do conector para a célula de carga no interior da esfera de alumínio	23
Figura 2.2b	Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da esfera (REF. VERT-ESF-A-L1)	24
Figura 2.2c	Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo X	25
Figura 2.2d	Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo Y	25

Figura 2.2e	Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo Z	26
Figura 2.2f	Montagem do conjunto caixa, tubo e pinos de içamento com variação da porosidade	26
Figura 2.2g	Montagem do conjunto caixa de acrílico, lingada e pára-quedas tipo gradiado	27
Figura 2.2h	Montagem do conjunto caixa, lingada e pára-quedas tipo prisma	27
Figura 2.2i	Modelo MSGL-RO-01 (1:35)	28
Figura 2.2j	Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo X	29
Figura 2.2l	Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo Y	29
Figura 2.2m	Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo Z	30
Figura 2.3a	Velocidade no lançamento vertical da esfera de aço	31
Figura 2.3b	Coeficiente de arrasto de uma esfera determinado experimentalmente em função do número de Reynolds, (HOERNER, 1958)	31
Figura 2.3c	Detalhe da Figura 2.3b localizando o $Re \times Cd$ (ponto em vermelho) da esfera de aço - $Re = 1,15 \times 10^6$ . Ref. (HOERNER, 1958)	32
Figura 2.3d	Velocidade no lançamento vertical da esfera de alumínio	33
Figura 2.3e	Detalhe da Figura 2.3b localizando o $Re \times Cd$ (ponto em vermelho) da esfera de alumínio - $Re = 5,75 \times 10^5$ . Ref. (HOERNER, 1958)	33
Figura 2.3f	Velocidade no lançamento vertical da caixa sem porosidade – eixo X	34
Figura 2.3g	Velocidade no lançamento vertical da caixa sem porosidade – eixo Y	35
Figura 2.3h	Velocidade no lançamento vertical da caixa com porosidade (25%) – eixo Y	36
Figura 2.3i	Velocidade no lançamento vertical da caixa – eixo Z	37



Figura 2.3j	Velocidade no lançamento vertical do MSGL-RO-01 – eixo X	38
Figura 2.3l	Velocidade no lançamento vertical do MSGL-RO-01 – eixo Y	39
Figura 2.3m	Velocidade no lançamento vertical do MSGL-RO-01 – eixo Z	40
Figura 3.1a	Desenho esquemático do lançamento pendular	42
Figura 3.1b	Desenho esquemático do posicionamento das câmeras para lançamento pendular	43
Figura 3.1c	Montagem do sistema de lingada rígida para içamento na caixa de acrílico	45
Figura 3.1d	Lançamento pendular do manifold MSGL com a configuração F1 de flutuadores	46
Figura 3.1e	Elemento comum ao modelo e ao cabo de instalação pendular – Placa triangular	48
Figura 3.3a	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 3mm	53
Figura 3.3b	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 3mm – Cd 0,10	54
Figura 3.3c	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 6mm	55
Figura 3.3d	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 10mm	56
Figura 3.3e	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 10mm – Cd 0,25	57
Figura 3.3f	Tração na torre para diferentes distâncias de lançamento	58
Figura 3.3g	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 20mm	59
Figura 3.3h	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 25mm	60
Figura 3.3i	Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 10mm	61
Figura 3.3j	Tração verificada na placa triangular no lançamento pendular com cabo 10mm	62
Figura 3.3l	Comparação da tração verificada na torre com o estudo paramétrico – cabo 10mm	63

Figura 3.3m	Comparação da tração verificada na placa triangular com o estudo paramétrico – cabo 10mm	64
Figura 3.3n	Tração na torre para lançamento da caixa com e sem pára-quadras do tipo grade	65
Figura 3.3o	Tração na torre para lançamento da caixa com e sem pára-quadras do tipo prisma	66
Figura 3.3p	Tração na torre para lançamento da caixa com e sem cabo de 40 cm	67
Figura 3.3q	Tração na torre para lançamento do MSGL-RO-01 para diferentes configurações de lingada de içamento	68
Figura 3.3r	Tração na placa triangular para lançamento do MSGL-RO-01 para diferentes configurações de lingada de içamento	69
Figura 4.1a	Modelos reduzidos do MSGL-RO-02 em diferentes escalas (1:35, 1:75 e 1:135)	72
Figura 4.1b	Detalhamento dos módulos de produção do manifold MSGL-RO-02 na escala 1:35	73
Figura 4.1c	Linha de lançamento – escala 1:35	74
Figura 4.1d	Flutuadores distorcidos – escala 1:35	74
Figura 4.1e	Flutuadores lineares – escala 1:35	74
Figura 4.1f	Bombonas com 5 tf de empuxo líquido – escala 1:35	75
Figura 4.1g	Acelerômetros bidirecionais	75
Figura 4.1h	Rate-gyro	76
Figura 4.1i	Instrumentação montada no modelo MSGL-RO-02 – escala 1:35	76
Figura 4.1j	Abas laterais – escala 1:70	79
Figura 4.1l	Abas porosas – escala 1:70	80
Figura 4.1m	Lonas laterais ou placas anti-porosidade– escala 1:70	80
Figura 4.1n	Furos na sub base (máximos) – escala 1:35	80
Figura 4.1o	Furos na sub base (projeto alternativo) – escala 1:35	81
Figura 4.1p	Bombona na lingada de sustentação (5 tf)	81
Figura 4.1q	Bombonas na lingada de sustentação (10 tf)	81
Figura 4.1r	Bombona localizadas nos pontos de içamento (20 tf)	82
Figura 4.3a	Deslocamento do ensaio vertical no eixo X	83
Figura 4.3b	Velocidade do ensaio vertical no eixo X	84

Figura 4.3c	Deslocamento do ensaio vertical no eixo Y	84
Figura 4.3d	Velocidade do ensaio vertical no eixo Y	85
Figura 4.3e	Deslocamento do ensaio vertical no eixo Z	85
Figura 4.3f	Velocidade do ensaio vertical no eixo Z	86
Figura 4.3g	Tração entre ensaios P70C2D1, P70C2D1B1, P70C2D1B2 e P70C2D1B3	88
Figura 4.3h	Tração entre ensaios P70C2D1, P70C2ID1B4, P70C2ID1B4A2 e P70C2ID1B5A3	89
Figura 4.3i	Tração entre ensaios P70C2D1, P70C2D1A e P70C2D1A2	90
Figura 4.3j	Tração entre ensaios P70C2D1, P70C2ID1F, P70C2D1B2 e P70C2D1B2F	91
Figura 4.3l	Tração entre ensaios P70C2D1, P70C2ID1LB5 e P70C2ID1L2B5	92
Figura 4.3m	Velocidade angular para o ensaio P35C1D1	94
Figura 4.3n	Velocidade angular para o ensaio P35C1ID1B4	95
Figura 4.3o	Velocidade angular para o ensaio P35C1D1F2	95
Figura 4.3p	Velocidade angular para o ensaio P35C1ID1F2B5	96
Figura 4.3q	Velocidade angular para o ensaio P35C1ID1B5	97
Figura 4.3r	Velocidade angular para os ensaios P35C1D1 e P35C1D1F2	98
Figura 4.3s	Velocidade angular para os ensaios P35C1D1 e P35C1D1F2	98
Figura 4.3t	Aceleração no eixo Z para os ensaios P35C1D1 e P35C1D1F2	99
Figura 4.3u	Tração para os ensaios P35C1D1 e P35C1D1F2	99
Figura 4.3v	Velocidade angular para os ensaios P35C1D1, P35C1ID1B5 e P35C1ID1B4	100
Figura 4.3x	Aceleração no eixo Z para os ensaios P35C1D1, P35C1ID1B5 e P35C1ID1B4	101
Figura 4.3z	Tração para os ensaios P35C1D1, P35C1ID1B5 e P35C1ID1B4	101
Figura 4.3a1	Velocidade angular para os ensaios P35C1D1, P35C1D1F2, P35C1ID1B5 e P35C1ID1F2B5	102
Figura 4.3b1	Aceleração no eixo Z para os ensaios P35C1D1, P35C1D1F2, P35C1ID1B5 e P35C1ID1F2B5	103
Figura 4.3c1	Tração para os ensaios P35C1D1, P35C1D1F2, P35C1ID1B5 e P35C1ID1F2B5	103

Figura 4.4a	Forças e momentos atuantes e um corpo esbelto imerso em um escoamento	105
Figura 4.4b	Momento de Munk atuante no manifold imerso em um escoamento	105
Figura 4.4c	Comportamento típico da queda de um disco plano em um fluido (BÖNISCH et al., 2004)	106
Figura 4.4d	Regiões típicas do comportamento de um disco circular plano em queda livre (BÖNISCH et al., 2004)	104
Figura 4.4e	Comportamento típico de queda livre de cartas de baralho obtidas experimentalmente (BELMONTE et al., 1998)	108
Figura 4.4f	Comportamento típico de queda livre de cartas de baralho obtidas experimentalmente (PESAVENTO et al., 2006)	109
Figura 4.4g	Série temporal da velocidade angular $\omega$ no regime de fluttering (PESAVENTO et al., 2006)	110
Figura 4.4h	Fluttering do MSGL-RO-02 observado durante ensaios experimental	111
Figura 5.1a	Solução mecânica: sistema de contrapeso	112
Figura 5.1b	Esquemático do método de instalação pendular com utilização do sistema de contra-peso	113
Figura 5.3a	Tração para o ensaio M4S	115
Figura 5.3b	Seqüência fotográfica da rotação de 180° no ensaio M4S L1	117
Figura 5.3c	Utilização de lingada invertida na sub base	118
Figura 5.3d	Tração para o ensaio M4SL30	119
Figura 5.3e	Seqüência fotográfica da configuração M4SL30 L3	121
Figura 5.3f	Transporte dos manifolds de Roncador no convés da BGL-1	122
Figura 5.3g	Ilustração da montagem do sistema de contra-peso na BGL-1	123
Figura 5.3h	Tração para os ensaios M4S e M4SC4	124
Figura 5.3i	Seqüência fotográfica da configuração M4SC4 L3	126
Figura 5.3j	Sistema de coordenadas fixo no tanque para verificação do sistema de contra-peso	127
Figura 5.3l	Sistemas de coordenadas XYZ (tanque) e xyz (condição inicial do modelo)	128

Figura 5.3m	Montagem das células de carga de acordo com as diferentes condições	129
Figura 5.3n	Tração no cabo de fusível, ensaio P35CA	130
Figura 5.3o	Tração na roldana, ensaio P35CA	131
Figura 5.3p	Tração no contra-peso, ensaio P35CB	131
Figura 5.3q	Tração na roldana, ensaio P35CB	132
Figura 5.3r	Tração no cabo de fusível, ensaio P35CC	132
Figura 5.3s	Tração no contra-peso, ensaio P35CC	133
Figura 5.3t	Tração na roldana, ensaio P35CC	133
Figura 5.3u	Tração no cabo de fusível, ensaio P35CD	134
Figura 5.3v	Tração no contra-peso, ensaio P35CD	134
Figura 5.3x	Tração na roldana, ensaio P35CD	135
Figura 5.3z	Tensão máxima no cabo fusível para diferentes configurações de ensaios experimentais	136
Figura 5.3a1	Tensão efetiva no cabo fusível para diferentes configurações de ensaios	136
Figura 5.3b1	Tensão máxima no contra-peso para diferentes configurações de ensaios	137
Figura 5.3c1	Tensão efetiva no contra-peso para diferentes configurações de ensaios	138
Figura 5.3d1	Tensão máxima na roldana para diferentes configurações de ensaios	139
Figura 5.3e1	Tensão efetiva na roldana para diferentes configurações de ensaios	139
Figura 6.1a	Montagem do ensaio no LOC (a) aparato experimental. (b) ilustração dos eixos de referência	142
Figura 6.2a	Número de Strouhal versus coeficiente de arrasto para corpos de diferentes geometrias (HOERNER, 1958)	143
Figura 6.3a	Equivalente harmônico de rotação para diferentes velocidades de correnteza.	144
Figura 6.3b	Número de Strouhal versus número de Reynolds	144
Figura 6.3c	Frequência de oscilação versus frequência de desprendimento de vórtices	145

Figura 6.4a	Esquema do aparato experimental em vista lateral e detalhes da montagem do sensor de torque e da célula de carga	148
Figura 6.4b	Curva de calibração da célula de carga	148
Figura 6.4c	Curva de calibração do sensor de torque	149
Figura 6.4d	Sistema de aquisição para (a) célula de carga. (b) sensor de torque	150
Figura 6.4e	Coeficiente de arrasto para a placa em função do ângulo de ataque	152
Figura 6.4f	Coeficiente de sustentação para a placa em função do ângulo de ataque	152
Figura 6.4g	Coeficiente de torque para a placa em função do ângulo de ataque	153
Figura 6.4h	Centro de pressão em função do ângulo de ataque	154
Figura 6.5a	Ensaio da placa de alumínio com lonas laterais	155
Figura 6.5b	Ensaio da placa de alumínio com estabilizador flexível	155
Figura 6.5c	Equivalente harmônico de rotação para cada velocidade de correnteza para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com estabilizador flexível	157
Figura 6.5d	Número de Strouhal versus número de Reynolds para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com o estabilizador flexível	157
Figura 6.5e	Frequência de oscilação versus frequência de desprendimento de vórtices para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com o estabilizador flexível	158
Figura 6.5f	Comparação do equivalente harmônico de rotação para cada velocidade de correnteza para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com e sem o estabilizador flexível.	158

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo em águas ultra profundas tem trazido uma série de desafios para a indústria petrolífera, principalmente no desenvolvimento de equipamentos submarinos capazes de operar em PDA acima de dois mil metros.

O uso de equipamentos como manifolds submarinos, por exemplo, é cada vez mais necessário no Brasil devido a descobertas de campos gigantes em águas ultra profundas como Roncador na Bacia de Campos, por exemplo. Os motivos da grande utilização destes equipamentos em campos gigantes e em PDA acima de dois mil metros serão abordados neste trabalho. Porém, atualmente, o maior desafio para a utilização destes equipamentos de grande porte em águas ultra profundas é sua instalação.

Atualmente, tem-se utilizado basicamente quatro métodos distintos para instalação de equipamentos submarinos na Bacia de Campos: instalação a cabo utilizando BGL-1, AHTS com *A-frame* ou sondas semi-submersíveis, instalação utilizando Balsa Guindaste com eslinga, instalação através de riser de perfuração e instalação pelo método da roldana.

Entretanto, os métodos mencionados acima possuem limitações de carga e PDA de instalação. Seria inviável a instalação de equipamentos de grande porte em PDA que ultrapassam a barreira dos dois mil metros sem a utilização de embarcações especiais com compensadores de movimento e guindastes de grande porte, capazes de instalar cargas acima de duzentas toneladas. O problema enfrentado neste método é a disponibilidade deste recurso no mundo e, principalmente, o custo (alta taxa diária e mobilização/desmobilização).

Diante deste cenário, resolveu-se desenvolver um método de instalação inovador chamado Método Pendular, que possibilita a instalação de equipamentos de grande porte (carga limitada ao guindaste da embarcação de transporte) em qualquer PDA (limitada à capacidade de bobinamento do cabo no barco de instalação), utilizando embarcações hoje disponíveis de baixo custo.

Este trabalho apresentará as etapas do desenvolvimento e qualificação deste novo método, que foi utilizado pela PETROBRAS pela primeira vez em dezembro de 2006 para a instalação de dois manifolds no campo de Roncador em uma PDA de dois mil metros.

## 1.1. MOTIVAÇÃO

À medida que aumentamos a profundidade de instalação de equipamentos submarinos como dutos rígidos e flexíveis, manifolds, PLEMs, PLETs, ESDVs, válvulas submarinas, flutuadores, separadores submarinos e bombeio multifásico, aumentamos também a complexidade do sistema submarino (equipamentos utilizados e método de instalação), gerando alguns problemas e desafios para o projeto de desenvolvimento do campo. Dentre eles podem-se destacar:

- Ü Aumento do peso da catenária dos risers conectados à plataforma;
- Ü Instalação de equipamentos submarinos acima de dois mil metros de PDA de forma segura e rentável;

Uma das opções adotadas para a diminuição da carga da catenária dos risers na plataforma é a utilização de manifolds submarinos. Os manifolds são equipamentos instalados no solo marinho e um dos seus objetivos é diminuir a quantidade de risers interligados à plataforma.

Existem manifolds que possuem uma ou mais funções abaixo:

- Ü Manifolds de produção: reúnem a produção de alguns poços, geralmente de seis a oito, e enviam para a plataforma utilizando apenas dois ou três risers;
- Ü Manifolds de injeção: utilizando apenas dois risers interligados ao manifold e à plataforma, é possível injetar gás ou água em seis ou oito poços utilizando o manifold de injeção;
- Ü Manifolds de controle: controlam a abertura e fechamento de válvulas de equipamentos submarinos, como exemplo ANMs, utilizando apenas uma unidade eletro-hidráulica conectado à plataforma, também é possível adquirir e transmitir sinais de sensores dos poços e equipamentos submarinos.

Estes equipamentos têm-se tornado cada vez mais complexos devido à incorporação de sistemas de controle submarino para acionamento das válvulas do manifold, das ANMs, transmissão de dados de pressão e temperatura do poço, além de possuir módulos de gás-lift e pig diverter recuperáveis. Esses módulos permitirão substituições futuras por módulos reservas, diminuindo o tempo de parada do

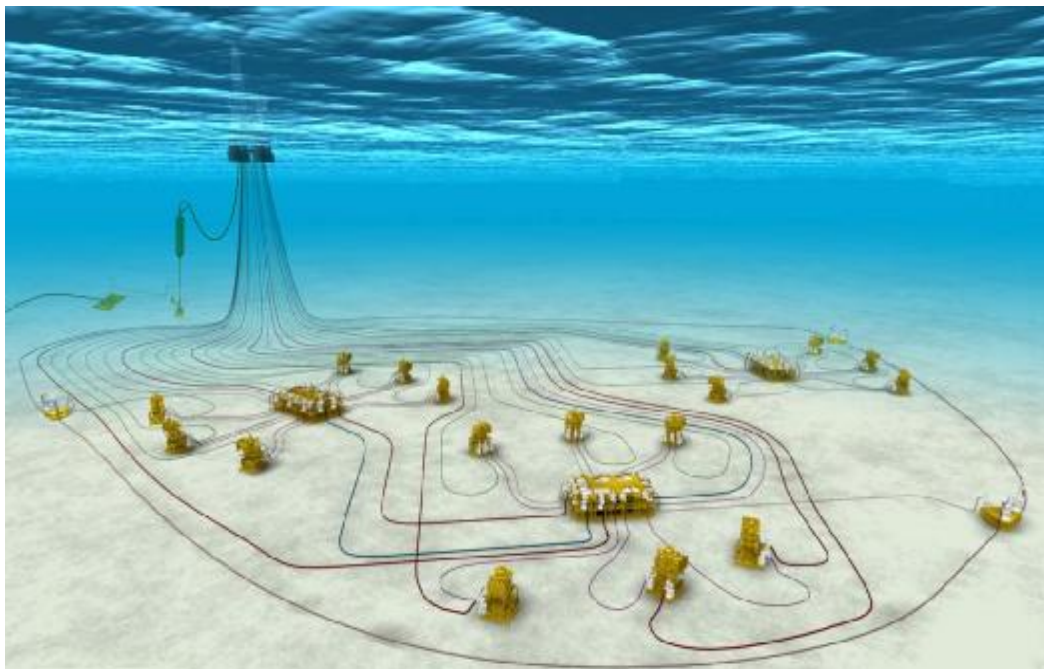


equipamento e, conseqüentemente, minimizando os prejuízos da parada da produção. Em contrapartida, se tornaram equipamentos de grandes dimensões e peso, gerando um desafio para sua instalação em PDA acima de dois mil metros.

Portanto, com a descoberta de campos gigantes (produções elevadas e grande número de poços) em águas ultra profundas (grande carga de risers na plataforma), o uso de manifolds submarinos é uma opção bastante vantajosa devido a fatores, como:

- Ü Otimização do arranjo submarino, diminuindo a quantidade de linhas flexíveis instaladas no campo e, conseqüente redução do custo com linhas flexíveis;
- Ü Antecipação da produção, pois é possível realizar a interligação dos poços ao manifold antes da chegada da plataforma à locação, diminuindo o tempo de interligação dos poços à plataforma.

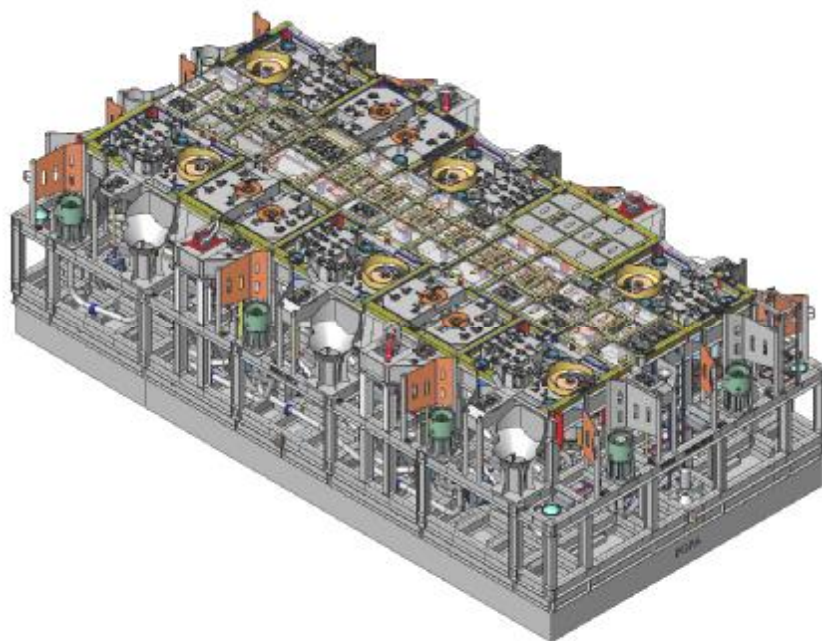
A Figura 1.1a ilustra o detalhamento do campo submarino de Roncador contemplando a instalação dos manifolds de gás lift, ANMs e linhas flexíveis.



**Figura 1.1a – Arranjo submarino do Campo de Roncador com utilização de manifolds.**

Os últimos manifolds submarinos desenvolvidos pela PETROBRAS para instalação no campo de Roncador, chamados MSGL-RO-02 e MSGL-RO-03, possuem as funções de injeção de gas-lift e controle das ANMs dos poços a eles interligados. O maior deles, o MSGL-RO-02, Figura 1.1b, possui 16,5m de comprimento, 8,5m de largura e 5,1m de altura e pesa 280 ton. Já o MSGL-RO-03 pesa 195 ton com dimensões de 12,9m x 8,5m x 5,1m.

A instalação destes equipamentos em águas ultra profundas representa uma parcela significativa do investimento global do projeto do sistema submarino devido à necessidade de contratação de embarcações especiais, com compensadores de movimento e guindastes de grande porte. Estas embarcações são escassas no mundo e possuem altas taxas diárias além do custo de mobilização e desmobilização, pois a grande maioria opera basicamente no Mar do Norte e Golfo do México.



**Figura 1.1b – Desenho esquemático do Manifold MSGL-RO-02.**

Os métodos já utilizados pela PETROBRAS para instalação deste equipamento envolveria risco na operação, devido, principalmente, à efeitos de ressonância do equipamento que podem exceder o limite admissível do cabo de instalação levando à perda do manifold e colocando em risco as embarcações e pessoas envolvidas na operação.

Outra opção seria o uso de cabo de fibras sintéticas, porém é um método ainda não desenvolvido, seu uso seria pioneiro, sem teste de campo e sem cabo disponível no

mercado com todas as características necessárias à instalação dos manifolds de Roncador.

Portanto, para que o uso de manifolds submarinos não fique limitado à sua instalação (peso, dimensões e PDA máximas), uma equipe multidisciplinar iniciou estudos para desenvolver soluções não-convencionais para instalação de equipamentos no fundo do mar. Este estudo foi realizado através do projeto Sistêmico Equipamentos Submarinos para três mil metros de PDA do programa tecnológico da PETROBRAS chamado PROCAP 3000 e de participações em projetos multi-clientes (JIP).

Para que a exploração de petróleo em PDA até três mil metros fosse possível, seria necessário desenvolver um método de lançamento tecnicamente viável e seguro, utilizando embarcações com alta taxa de disponibilidade, como AHTS e a BGL-1, para redução do custo. O objetivo principal deste projeto seria tornar a instalação em maiores PDA menos onerosas e não dependente de recursos críticos, como SS e barcos dotados com compensadores de movimentos.

O primeiro desafio deste projeto seria a instalação dos manifolds MSGL-RO-02 e MSGL-RO-03 de Roncador (280 e 198 toneladas, respectivamente) numa PDA de aproximadamente dois mil metros, inicialmente prevista para dezembro de 2005. Além do custo envolvido nesta instalação, era preciso superar alguns desafios técnicos devido às limitações das embarcações contratadas pela PETROBRAS. Foi preciso inovar na busca de soluções que fossem ao mesmo tempo viáveis e seguras para as pessoas envolvidas, equipamentos e embarcações.

Assim, uma nova tecnologia de instalação para equipamentos de grande porte em grandes PDA foi desenvolvida, chamada de Método de Instalação Pendular. Porém, para que este novo método fosse aprovado para a instalação dos manifolds de Roncador foi necessário submeter à tecnologia a um processo de desenvolvimento e qualificação, que será detalhado no decorrer deste trabalho.

## 1.2. HISTÓRICO

A PETROBRAS já utilizou quatro métodos diferentes para instalação de equipamentos similares aos manifolds submarinos de Roncador, de diversas dimensões, pesos, funções, e em variadas PDA desde 1995.

### 1.2.1 INSTALAÇÃO VIA CABO

Método utilizado para instalação de pequenos equipamentos submarinos, limitado à capacidade do *A-frame* ou da guindaste embarcação, conforme ilustrado na Figura 1.2a. O limite da PDA está relacionado ao peso do equipamento submarino e aos efeitos de ressonância.



**Figura 1.2a – Embarcações utilizadas para a instalação de manifolds via cabo (a) AHTS com A-frame e (b) Balsa guindaste BGL-1.**

A instalação do equipamento desde o convés da embarcação até o leito marinho é realizada através de cabos de aço, sendo que o cabo é desenrolado lentamente pelo guindaste ou guincho da embarcação instaladora até ser posicionado no solo marinho, nas coordenadas e aproamento pré-estabelecidos em projeto.

Problemas técnicos na utilização do cabo de aço em águas ultra profundas:

- Û Perda na capacidade de guincho devido ao peso próprio do cabo;
- Û Problemas de ressonância axial devido ao grande comprimento do cabo.

Problemas de ressonância ocorrem quando o período natural na direção vertical do sistema constituído pelo equipamento e pelo cabo de aço coincide com o período das ondas. Fato este que provoca amplificação dinâmica das forças atuantes no cabo e pode levar à ruptura do mesmo.

### 1.2.2 Balsa Guindaste com Eslinga

Este método foi utilizado em 1995 para instalação do manifold do Campo de Albacora na Bacia de Campos (420 tons), a seiscentos e vinte metros de PDA conforme Figura 1.2b.



Figura 1.2b – Instalação do manifold do Campo de Albacora via BGL-1 com eslinga de içamento.

Esta instalação minimiza os efeitos de ressonância, porém é uma operação bastante demorada e complicada, sendo realizada apenas uma vez pela PETROBRAS.

Para esta metodologia de instalação, faz-se necessário a colocação de duas estruturas fixas no convés denominadas cabideiro. Nesta estrutura será apoiado o conjunto de placas de conexão (*link plates*) com auxílio de uma barra de içamento (*spread bar*). O manifold é instalado por tramos de eslinga de aproximadamente cinquenta metros.

### 1.2.3 RISER DE PERFURAÇÃO

Em 2001, foi instalado o manifold de Marlim pesando duzentas e quarenta toneladas em uma PDA de novecentos e quarenta metros utilizando o riser de perfuração, conforme Figura 1.2c. Nesta alternativa, uma balsa de serviço transporta o manifold até a plataforma, posicionando o manifold sob o *moon-pool* da SS. É então realizada a conexão com a coluna do riser de perfuração e içamento do manifold para que seja realizada a peçação do equipamento na plataforma, permitindo a navegação até a locação.

Após a chegada à locação, o equipamento é descido pela coluna do riser de perfuração até o leito marinho, sendo posicionado nas coordenadas e azimutes pré-estabelecidos.

Para este tipo de instalação, é necessário que a estrutura do manifold esteja dotada de um ponto central, denominado HUB central, para conexão com o riser de perfuração.



**Figura 1.2c – Instalação do manifold de produção via riser de perfuração no Campo de Marlim.**

Limitações deste método para a instalação dos manifolds de Roncador:

- ü O riser de perfuração da SS Pride South América possui capacidade para instalação de equipamentos até mil metros de PDA;
- ü Alta taxa diária da sonda de perfuração, comparado com embarcações tipo AHTS, elevando o custo da instalação;

Ü A grande atividade de perfuração e completação de poços na Bacia de Campos e Santos dificultam o deslocamento de uma sonda de perfuração para realização de outras atividades, como instalação de equipamentos submarinos, que não é sua atividade fim.

#### 1.2.4 MÉTODO DA ROLDANA

O primeiro manifold de Roncador, MSGL-RO-01 (175 toneladas), foi instalado em 2002 a uma PDA de mil oitocentos e oitenta e cinco metros pelo Método da Roldana. A instalação foi realizada por três embarcações: pela utilização da SS Pride South América e dois AHTS de oportunidade. Foi utilizado um cabo de quatro polegadas de diâmetro e uma roldana para descer o manifold. O cabo era suportado pelo guincho de popa do AHTS1, passando pela roldana posicionada acima do manifold e suspenso pela outra ponta pela SS Pride South América. A terceira embarcação, AHTS2 suportou um cabo de três polegadas de diâmetro para prevenir a rotação do sistema. Com esta configuração em forma de “V” a carga no cabo de aço foi reduzida à metade. E com o uso do sistema com compensador de movimentos da SS Pride South América, reduziu-se o risco de ressonância durante a instalação. Um desenho esquemático do Método da Roldana é ilustrado na Figura 1.2d.

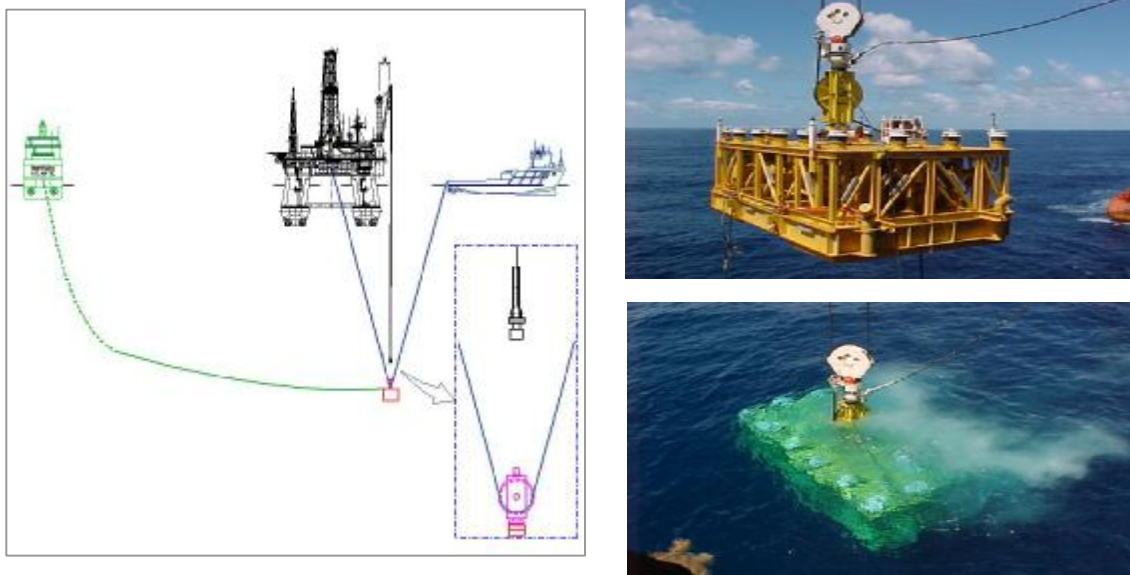


Figura 1.2d – Instalação via roldana do manifold MSGL-RO-01 no Campo de Roncador.

A instalação foi realizada com sucesso, porém várias dificuldades foram enfrentadas, como listadas abaixo:

- Ü Alto custo, devido à alta taxa diária da sonda e número de embarcações envolvidas;
- Ü Recurso escasso;
- Ü Risco de ocorrência de ressonância em uma determinada profundidade;
- Ü Dificuldade de disponibilização da sonda, retirando a mesma de sua atividade de perfuração e completação;
- Ü Janelas de operação restritas para realização da operação.

O uso deste método para instalação dos manifolds MSGL-RO-02 e MSGL-RO-03 estaria limitado à capacidade do guindaste da SS Pride South América. A necessidade para instalação dos manifolds MSGL-RO-02 considerando um Fator de Amplificação Dinâmico de 1,2 é de 336 ton e o guindaste da mesma é capaz de suportar cargas de até 300 ton.

#### **1.2.5 MÉTODO PENDULAR**

As dificuldades e limitações dos métodos apresentados acima motivaram o desenvolvimento de um novo método de instalação de equipamentos submarinos em águas ultra profundas, já que o primeiro desafio já estava sendo enfrentado: instalar os manifolds MSGL-RO-02 e MSGL-RO-03 de Roncador em uma profundidade de água de mil e novecentos metros.

Na busca pelo método de instalação dos manifolds de Roncador foram consideradas as seguintes dificuldades e limitações:

- Ü Peso próprio do cabo de aço, reduzindo a capacidade de carga em grandes PDA;
- Ü Ressonância axial;
- Ü Escassez e altas taxas diárias de embarcações especiais dotadas com guindastes com capacidade requerida e compensador de movimentos.



Para substituição do cabo de aço pelo cabo de fibra sintética alguns cuidados devem ser considerados:

- ü Ressonância axial devido à rigidez do cabo;
- ü Alta susceptibilidade à abrasão;
- ü Aquecimento por atrito devido e a curvatura decorrente da passagem do cabo sobre as polias do guincho ou rolo de popa do AHTS;

Possibilidade de vencer estes desafios:

- ü Utilização de cabo de poliéster sem tensão e fricção;
- ü Prevenir a ressonância ultrapassando a zona crítica sem que haja risco de parada do equipamento;
- ü Uso de embarcações com elevada taxa de disponibilidade, reduzindo assim o custo da instalação.

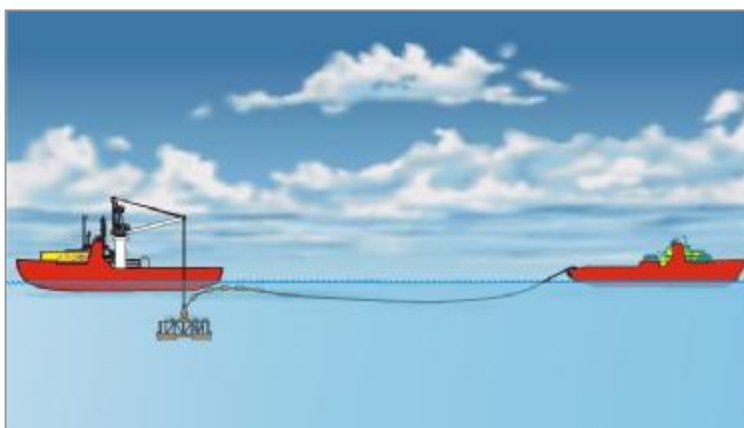
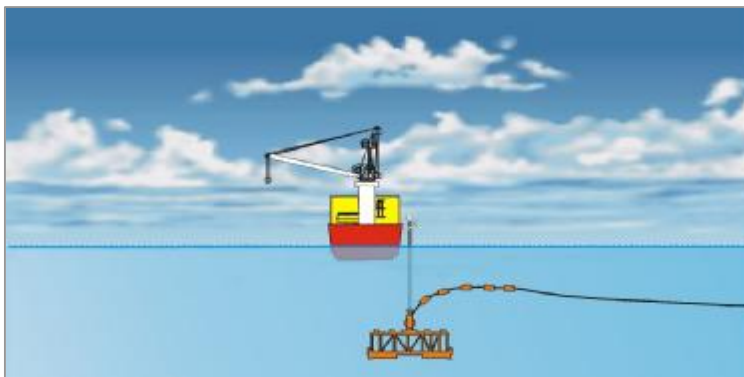
Buscando solucionar todas as dificuldades e limitações apresentadas acima, foi desenvolvido o Método Pendular de Instalação de Equipamentos Submarinos em águas ultra profundas. Este método consiste basicamente em transportar o equipamento até a locação utilizando uma embarcação dotada de um guindaste com capacidade de içamento compatível com a carga do equipamento, esta embarcação foi denominada barco de transporte.

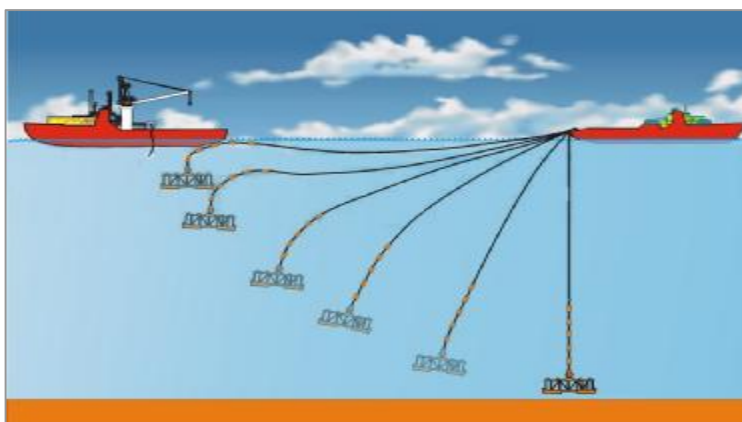
Ao chegar à locação, um cabo de poliéster com comprimento igual a 90% da PDA de instalação é conectado ao equipamento através de um acessório de instalação denominado placa triangular e em outra embarcação, chamada de barco de instalação, que permanece afastada do barco de transporte 95% do comprimento do cabo.

O equipamento é içado e posicionado no costado do barco de transporte, ficando pendurado em aproximadamente cinquenta metros de profundidade utilizando uma lingada de içamento. Esta lingada é composta por trechos de amarras e placa de conexão que se conectarão a um cabideiro instalado na embarcação, deixando assim o equipamento na posição de lançamento.

Em seguida, a lingada de içamento, que está segurando o manifold no cabideiro, é desconectada e o manifold realiza um movimento pendular suave até estacionar na vertical a aproximadamente cem metros do solo marinho.

Após a estabilização do equipamento na vertical, o assentamento no solo marinho será realizado desenrolando um trecho de amarras no guincho do barco de instalação, evitando assim o risco de abrasão do cabo de poliéster no rolo de popa da embarcação. Para maior entendimento, a Figura 1.2e ilustra desenhos esquemáticos das etapas descritas.





**Figura 1.2e – Esquemático do método de instalação pendular.**

Este método reduz significativamente as dificuldades apresentadas anteriormente pelos seguintes motivos:

- ü Não há risco de ocorrência de ressonância em nenhum momento da instalação, pois não há risco de interrupção na instalação, o equipamento passa rapidamente pela zona crítica;
- ü Baixo custo de instalação e facilidade de mobilização e desmobilização de embarcações devido à utilização de barcos de alta disponibilidade. Estima-se que haverá redução de 50% no custo da instalação se comparado à utilização de uma embarcação especial (capacidade de guindastes e compensador de movimento);
- ü Possibilita a utilização de cabos de poliéster sem manuseio sob tensão no guincho ou rolo de popa, pois todo o cabo de poliéster é desenrolado antes do início do movimento pendular;
- ü Não há utilização de recursos críticos como sondas de perfuração ou barcos com compensador de movimentos;
- ü Maior janela de operação se comparado ao Método da Roldana utilizado para a instalação do MSGL-RO-01.
- ü Maior segurança operacional;
- ü Pouca adaptação (ou dependendo da situação nenhuma adaptação) das embarcações que irão realizar o lançamento;

Ü Viabiliza instalação além de 3000m PDA (condicionada a capacidade de bobinamento do cabo de poliéster da embarcação de instalação – sarilho do AHTS).

Devido a todas as vantagens acima explicitadas e por ser uma operação inovadora e pioneira, foi definido que esta nova tecnologia de instalação passaria por um processo de qualificação. Seria necessário verificar e comprovar sua viabilidade técnica para aprovação do uso desta nova tecnologia na instalação dos manifolds de Roncador.

As diversas etapas do processo de qualificação deste método são simplificadas abaixo e algumas serão detalhadas no decorrer deste trabalho.

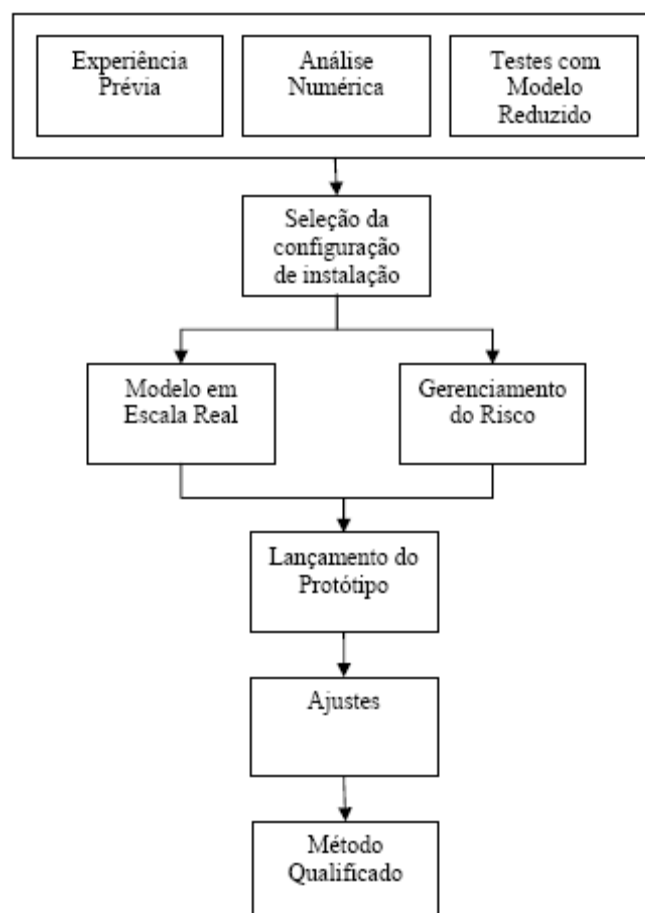


Figura 1.2f – Etapas do processo de desenvolvimento/qualificação do método pendular.

### **1.2.5.1 EXPERIÊNCIA PRÉVIA**

Foi apresentada no item anterior a experiência em instalação de manifolds submarinos. O primeiro passo no processo de qualificação foi mapear as dificuldades e limitações, através do histórico das instalações já realizadas. E com base nas conclusões apresentadas, foi proposto um novo método de instalação.

### **1.2.5.2 ANÁLISES NUMÉRICAS**

Em seguida, iniciou-se uma série de análises numéricas da concepção do método pendular proposto, com o objetivo de demonstrar a sua viabilidade teórica e técnica e suas limitações. Além disso, esta etapa é uma ferramenta importante para que seja possível calibrar as instrumentações a serem utilizadas nos testes experimentais, definindo ordem de grandeza de velocidades, tensões e acelerações, fornecer meios alternativos para extrapolação para a escala real, variar parâmetros importantes da instalação, analisar possíveis otimizações do método, dentre outros. Para a realização das análises numéricas, foi utilizado o *software* ORCAFLEX.

### **1.2.5.2 TESTES COM MODELOS REDUZIDOS**

Os ensaios com modelo reduzidos foram concebidos com o objetivo de aprimorar as análises numéricas realizadas. Foram avaliadas as forças atuantes no cabo de poliéster, além de serem abordadas questões ligadas à definição dos coeficientes hidrodinâmicos dos manifolds como massa adicional e coeficiente de arrasto.

Os ensaios com modelo reduzido foram realizados no Laboratório Oceânico da Universidade Federal do Rio de Janeiro - LabOceano e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT.

No IPT, onde se construíram modelos reduzidos em três diferentes escalas, foram realizados ensaios de oscilação forçada e de arrasto. Estes ensaios tinham como objetivo a determinação das propriedades hidrodinâmicas (coeficiente de arrasto e massa adicional) dos modelos dos manifolds. Informações estas, necessárias para adequar o modelo numérico aos testes com modelo reduzido.

Testes simulando o lançamento pendular com manifolds em escala 1:35, 1:70 e 1:130 foram realizados no LabOceano. A fabricação de várias escalas foi necessária devido à limitação de profundidade do tanque oceânico no LabOceano (quinze metros),

sendo necessárias para analisar os momentos iniciais do lançamento pendular e o movimento completo, até a completa verticalização da lingada de instalação.

Após a verificação de alguns fenômenos hidrodinâmicos, decidiu-se pela realização de ensaios de placa plana no canal do Laboratório de Ondas e Correntes (LOC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro com a finalidade de obter um melhor entendimento da hidrodinâmica envolvida a partir de um corpo extremamente simples.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

O Capítulo 2 deste trabalho apresenta uma abordagem sobre o lançamento vertical para levantamento das propriedades hidrodinâmicas dos modelos testados. Será apresentado um estudo em relação aos efeitos de porosidade nas propriedades hidrodinâmicas de uma caixa de acrílico.

O Capítulo 3 apresenta diversas configurações de estudo para o lançamento pendular.

No Capítulo 4, apresenta-se a solução mecânica adotada para a instalação dos manifolds no Campo de Roncador na Bacia de Campos em uma PDA de aproximadamente dois mil metros.

O Capítulo 5 descreve a solução hidrodinâmica que poderá ser adotada para os próximos manifolds a serem instalados pelo método pendular sem que haja necessidade da utilização do sistema mecânico conforme proposto no Capítulo 4.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

No Apêndice I, encontram-se os desenhos de fabricação dos modelos da esfera de alumínio e da caixa de acrílico assim como os desenhos de fabricação do aparato de ensaio utilizado no Laboratório de Ondas e Corrente – LOC/COPPE/UFRJ.

Os Apêndices II a III ilustram respectivamente os ensaios verticais e pendulares realizados no LabOceano.

Nos Apêndices IV a IX são apresentadas as séries temporais obtidas nos ensaios com placa plana.

## **CAPÍTULO II – ENSAIOS DE LANÇAMENTO VERTICAL**

O lançamento vertical tem com objetivo a determinação da velocidade terminal para a obtenção das propriedades hidrodinâmicas dos modelos.

Nos itens seguintes será abordada a montagem do ensaio, assim como a sua realização e resultados obtidos.

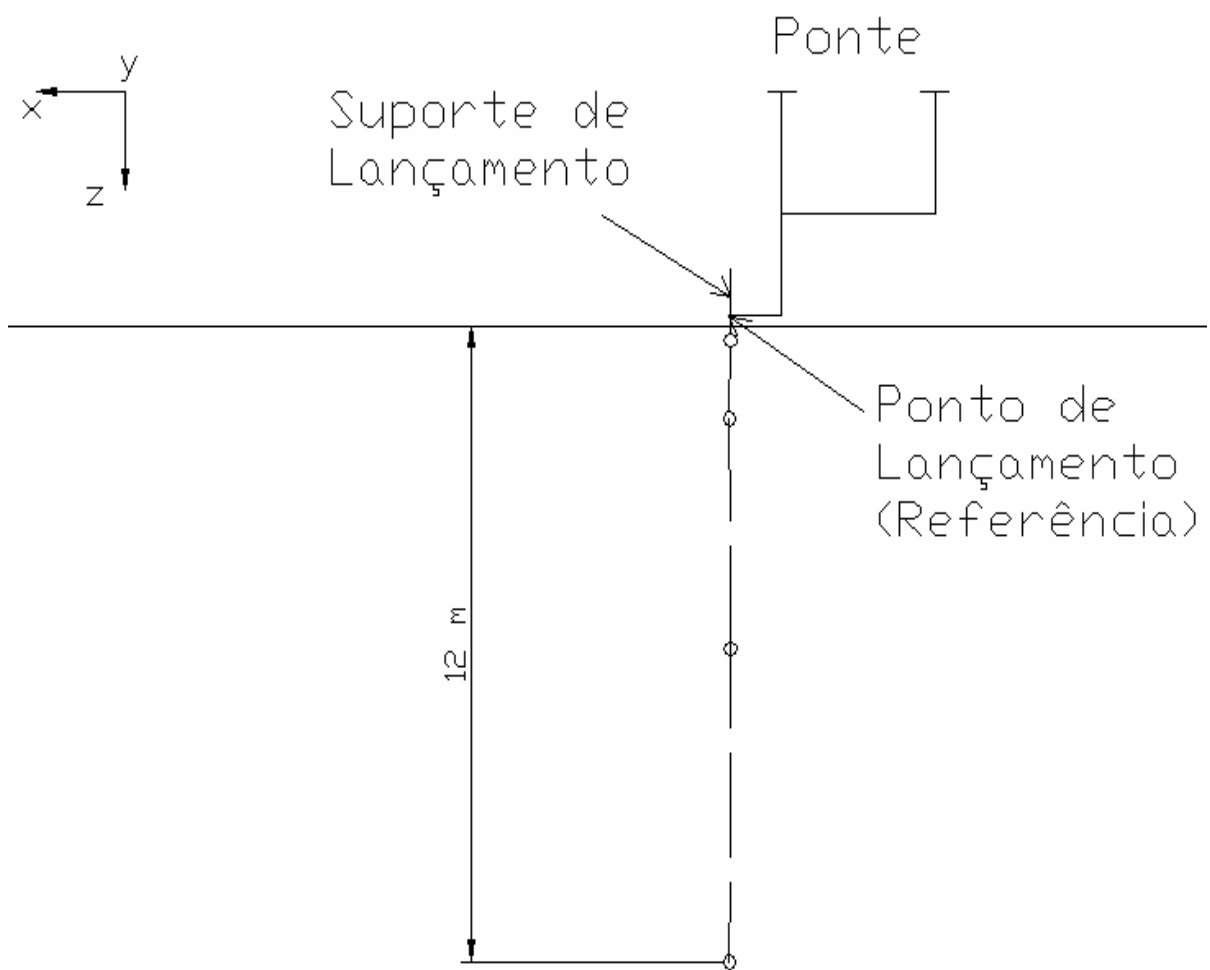
### **2.1. MONTAGEM DO ENSAIO**

O ensaio de lançamento vertical consiste no lançamento em queda livre dos modelos, nos seus três eixos de coordenadas locais (X, Y, Z) no tanque oceânico, a fim de se obter sua velocidade terminal e, conseqüentemente, os coeficientes hidrodinâmicos em cada eixo.

Os eixos locais X, Y e Z são os eixos de referência fixos ao modelo na direção das suas dimensões principais, conforme as Figuras 2.1c, 2.1d e 2.1e.

Os modelos ensaiados no lançamento vertical foram: esferas de alumínio e de aço, caixa de acrílico com variação da porosidade e o manifold MSGL-RO-01. A esfera, dada sua simetria, nos três eixos foi lançada apenas em uma configuração.

A Figura 2.1a ilustra o desenho esquemático do lançamento vertical. No lançamento vertical, para evitar que o modelo fosse de encontro ao fundo do tanque oceânico, utilizou-se um cabo de poliéster, conectado em uma extremidade a uma mola presa à ponte e a outra extremidade conectado ao modelo. O lançamento foi feito manualmente, soltando o cabo à medida que o modelo descia, sem que houvesse interferência na queda do modelo. Além do cabo de poliéster foi utilizada como proteção uma malha de aço no fundo do tanque cobrindo toda região de lançamento. A Figura 2.1a ilustra a metodologia de lançamento vertical no LabOceano.

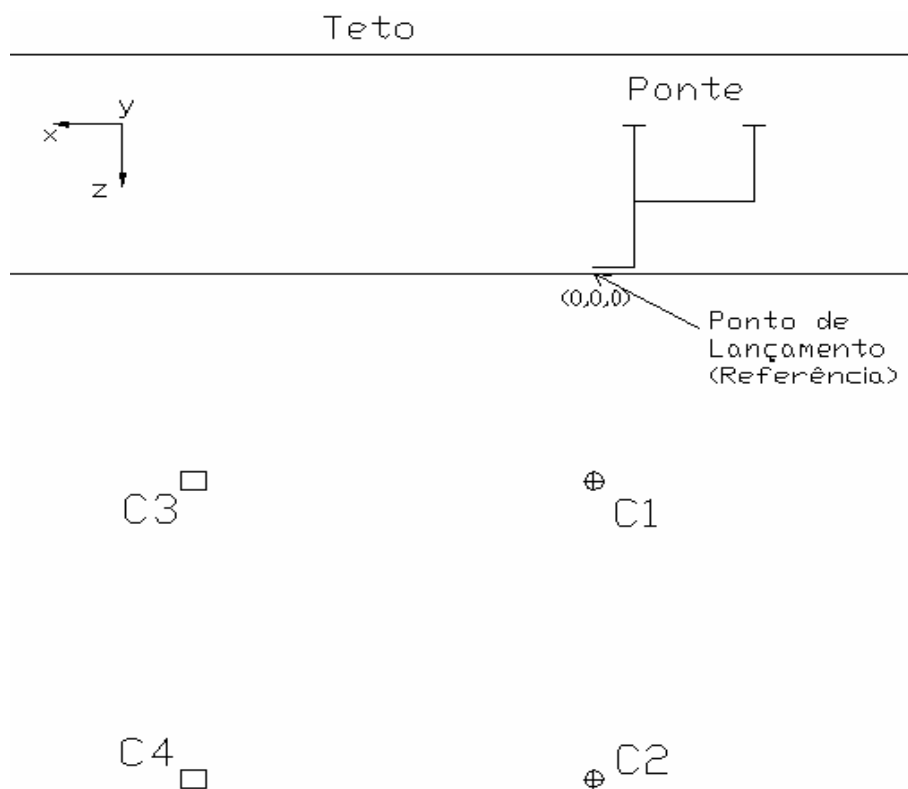


**Figura 2.1a – Desenho esquemático do lançamento vertical no LabOceano.**

### **2.1.1 SISTEMA DE VÍDEO**

Os modelos foram lançados da superfície d' água e para acompanhar a sua trajetória durante a queda foi montado um sistema de câmeras composta por quatro câmeras posicionadas conforme Figura 2.1.b





**Figura 2.1b – Desenho esquemático de posicionamento do sistema de vídeo para o lançamento vertical.**

Foram instaladas duas câmeras posicionadas no eixo X (C3 e C4) e duas no eixo Y (C1 e C2). As coordenadas das posições das câmeras em relação o ponto de lançamento são mostrados na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Posicionamento das câmeras de vídeo no lançamento vertical.**

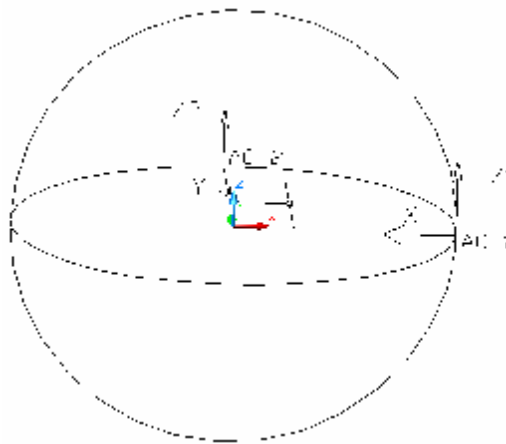
Câmera	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ângulo (grau)	
C1	0,00	- 6,50	3,78	0,00	Frontais (Eixo Y)
C2	0,00	- 6,50	9,22	0,00	
C3	6,50	0,00	3,78	0,00	Frontais (Eixo X)
C4	6,50	0,00	9,22	0,00	

De forma a facilitar a visualização do modelo da caixa de acrílico e do manifold MSGL-RO-01, os mesmos foram sinalizados com fitas refletivas, possibilitando uma maior facilidade na obtenção das coordenadas de deslocamentos no tempo. Com a finalidade de melhorar o contraste dos alvos na câmera e facilitar a filtragem das imagens, lonas plástica preta foram estendidas, com o auxílio de mergulhadores, da linha d'água até o fundo do tanque cobrindo a região de queda dos modelos.

### 2.1.2 INSTRUMENTAÇÃO

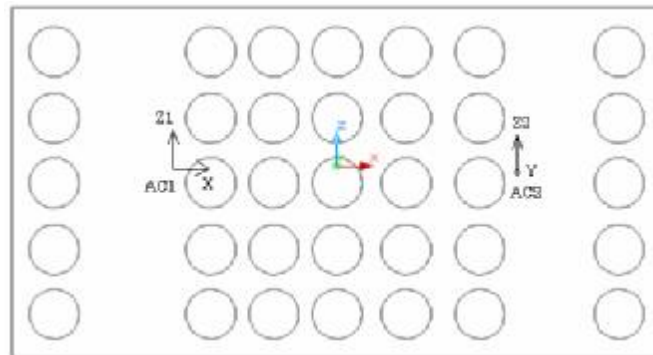
Além do sistema de câmeras, os modelos foram instrumentados por dois acelerômetros biaxiais, montados dentro de uma caixa estanque, cujo sinal passa por um condicionador antes da aquisição, obtendo-se a aceleração na direção da queda e, conseqüentemente, através de integrações deste sinal, sua velocidade e deslocamento.

Os acelerômetros foram posicionados na esfera, um a  $0^\circ$  e outro a  $90^\circ$  de tal forma que tivesse um eixo orientado para a direção  $X$ , um outro para a direção  $Y$  e dois para a direção  $Z$  do modelo.



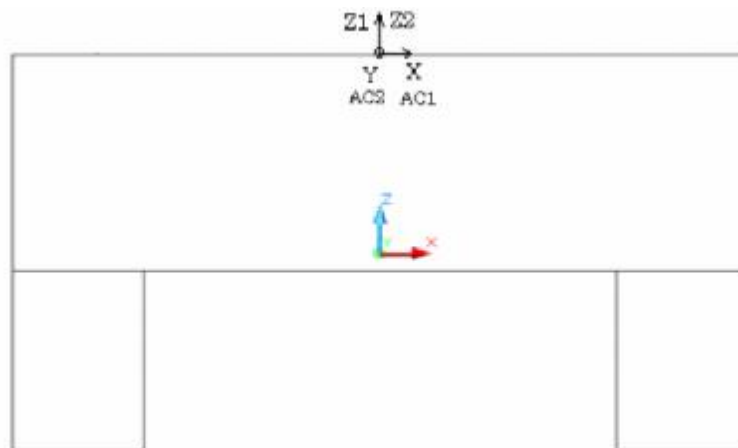
**Figura 2.1c – Representação do eixo local e posicionamento dos acelerômetros (AC1) e (AC2) na interior da esfera.**

Na caixa de acrílico, os acelerômetros foram posicionados como se segue nas figuras abaixo.



**Figura 2.1d – Representação do eixo local e posicionamento dos acelerômetros (AC1) e (AC2) no interior da caixa de acrílico.**

No manifold MSGL-RO-01, os dois acelerômetros foram posicionados no centro do modelo, sendo que o acelerômetro 1 (AC1) obtinha a aceleração na direção Z e X, enquanto o acelerômetro 2 (AC 2) obtinha a aceleração na direção Z e Y, conforme Figura 2.1e.



**Figura 2.1e – Representação do eixo local e posicionamento dos acelerômetros (AC1) e (AC2) no topo do modelo 1:35 do MSGL-RO-01.**

## 2.2. MATRIZ DE ENSAIO VERTICAL

Foram realizadas dez configurações para o lançamento vertical sendo que para cada configuração foram realizados dois lançamentos, totalizando vinte lançamentos verticais.

O modelo da esfera foi ensaiado apenas em uma configuração.

O modelo da caixa de acrílico foi ensaiado para seis configurações diferentes. Duas configurações para o eixo Y, três para o eixo Z e uma para o eixo X. No eixo Y, foi testado com e sem porosidade, no eixo Z, foi testado sem para-queda, com para-queda P1 e P2 e no eixo X, foi testado sem porosidade.

O modelo do manifold MSGL-RO-01 foi testado para três configurações, uma para o eixo X, uma para o eixo Y e outra para o eixo Z.

A Tabela 2.2 apresenta o resumo das configurações para o lançamento vertical.

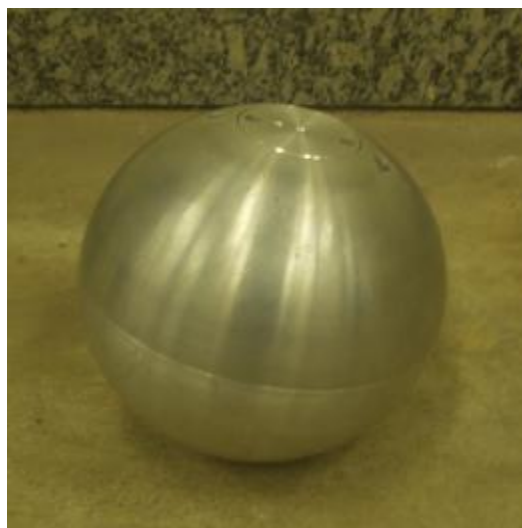
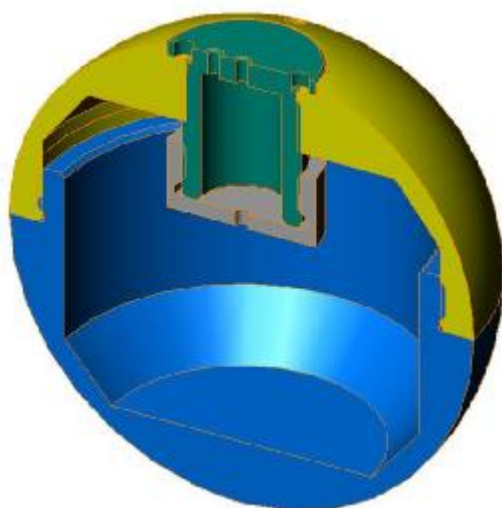
**Tabela 2.2 – Matriz de ensaios para o lançamento vertical.**

Modelo	Ensaio	Posição do eixo			Porosidade		Para-Queda			Código
		X	Y	Z	0%	25%	Sem	P1 ( funil )	P2 ( gradeado )	
<b>Esfera</b>	1			X	X		X			VERT-ESF
<b>Caixa</b>	2		X			X	X			VERT-CAI-Y-PO25
	3		X		X		X			VERT-CAI-Y-PO0
	4			X	X		X			VERT-CAI-Z-PO0
	5			X	X			X		VERT-CAI-Z-PO0-PQ1
	6			X	X				X	VERT-CAI-Z-PO0-PQ2
	7	X				X		X		VERT-CAI-X-PO0
<b>MSGL</b>	8	X			Própria		X			VERT-MSG-X
	9		X		Própria		X			VERT-MSG-Y
	10			X	Própria		X			VERT-MSG-Z

### 2.2.1 ESFERA

O desenho de fabricação no Apêndice I, Figuras A.1 e A.2, exemplifica detalhes da esfera de alumínio utilizada nos ensaios no LabOceano. Uma esfera de aço também foi utilizada.

A Figura 2.2a ilustra a modelagem de conjunto esfera alumínio com conector para uma célula de carga para uma célula de carga.

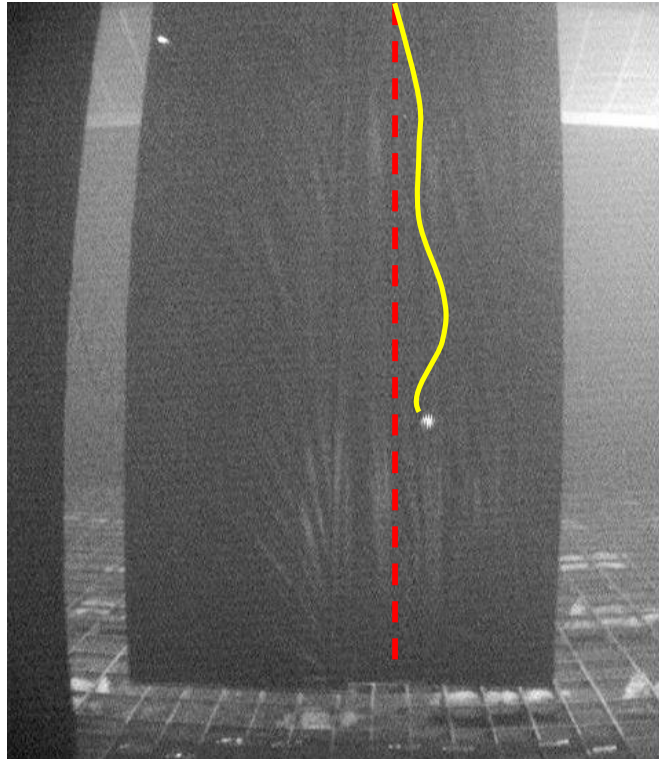


**Figura 2.2a – Montagem do conector para a célula de carga no interior da esfera de alumínio.**

A Tabela 2.3 indica as principais características física e geométrica das esferas utilizadas no lançamento vertical.

**Tabela 2.3 – Propriedades físicas e geométricas das esferas.**

Material	Diâmetro	Peso seco	Peso submerso	Centro de Gravidade		
	(m)	(Kg)	(Kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Alumínio	0,158	3,960	2,120	0,000	0,000	0,000
Aço	0,150	13,23	11,51	0,000	0,000	0,000



**Figura 2.2b – Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da esfera (REF. VERT-ESF-A-L1).**

Observa-se pela Figura 2.2b, que durante o ensaio a esfera descreve uma trajetória fora do eixo vertical de lançamento, fato este associado a fenômenos de turbulência de emissão de vortex. Comportamento hidrodinâmico similar verificado em ensaios verticais com a caixa de acrílico e o MSGL-RO-01.

### **2.2.2 CAIXA DE ACRÍLICO**

O modelo da caixa de acrílico foi lançado em seis configurações diferentes com uma ligada de cabo de aço desprezível ( $\phi 2\text{mm}$ ). As Figuras 2.2c à 2.2d ilustram as condições de lançamento vertical nas direções X, Y e Z, respectivamente.

O modelo da caixa possui as seguintes dimensões, conforme Tabela 2.4.

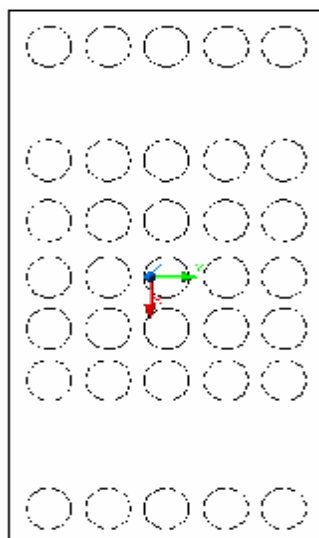
**Tabela 2.4 – Dimensões da caixa de acrílico.**

Dimensão		
X (m)	Y (m)	Z (m)
0,365	0,224	0,196

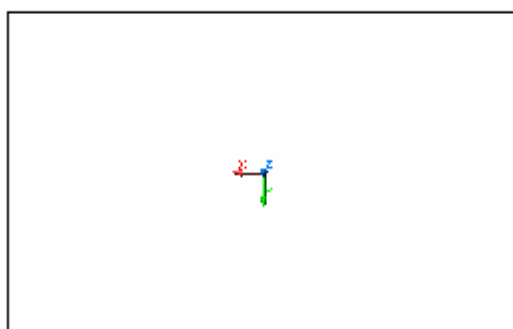
As características físicas da caixa de acrílico estão exemplificadas na Tabela 2.5.

**Tabela 2.5 – Características físicas do modelo com água em seu interior - Ref. CG.**

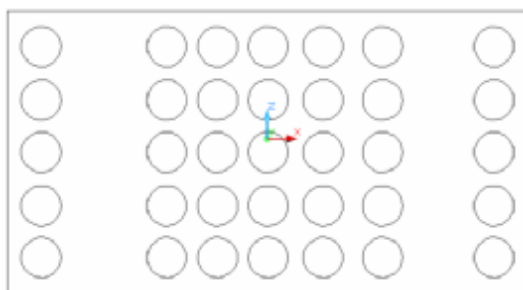
Lançamento	Peso seco	Peso submerso	Centro de Gravidade		
	(Kg)	(Kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Eixo X	15,466	3,659	0,061	0,000	0,000
Eixo Y	15,466	3,659	0,000	0,034	0,000
Eixo Z	15,466	3,659	0,000	0,000	-0,032



**Figura 2.2c – Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo X.**



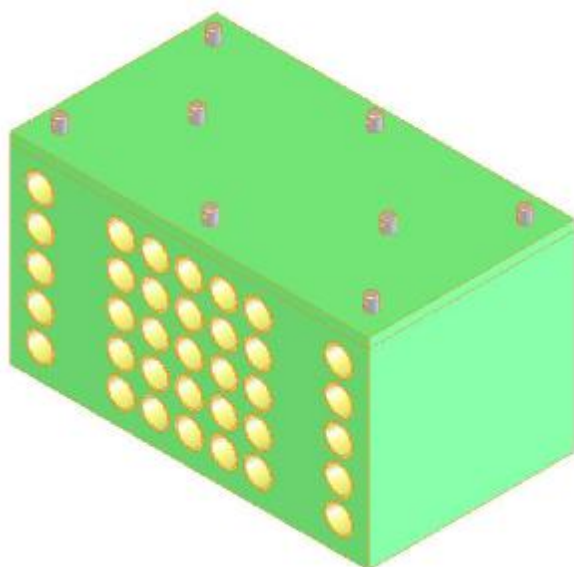
**Figura 2.2d – Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo Y.**



**Figura 2.2e – Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo Z.**

Os desenhos de fabricação, Figura A.3 à Figura A.5, no Apêndice I exemplificam a caixa utilizada nos ensaios no LabOceano. Trinta e cinco tubos paralelos ao eixo Y simulam uma porosidade de 25%.

A Figura 2.2f ilustra a montagem do conjunto caixa, tubos e pinos de içamento com e sem porosidade.

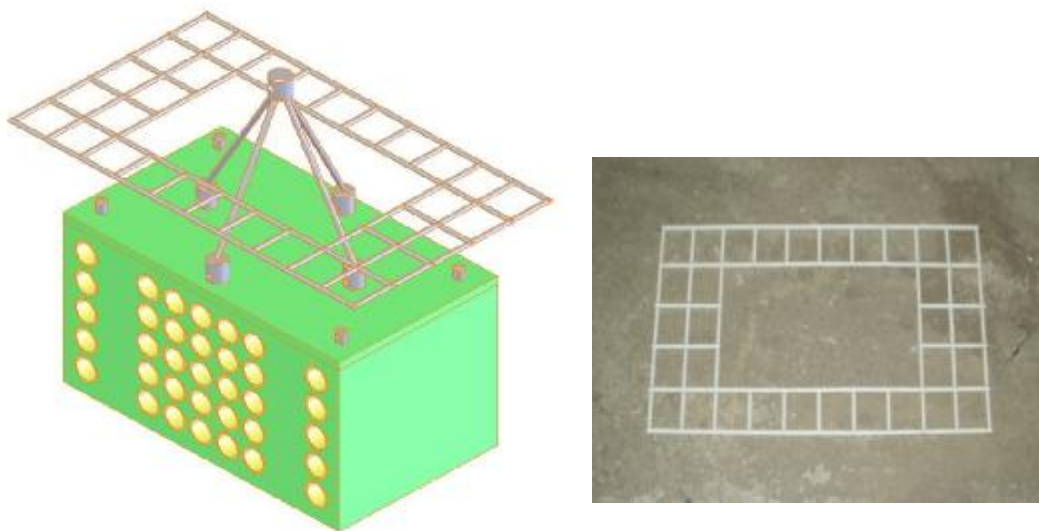


**Figura 2.2f – Montagem do conjunto caixa, tubo e pinos de içamento com variação da porosidade.**

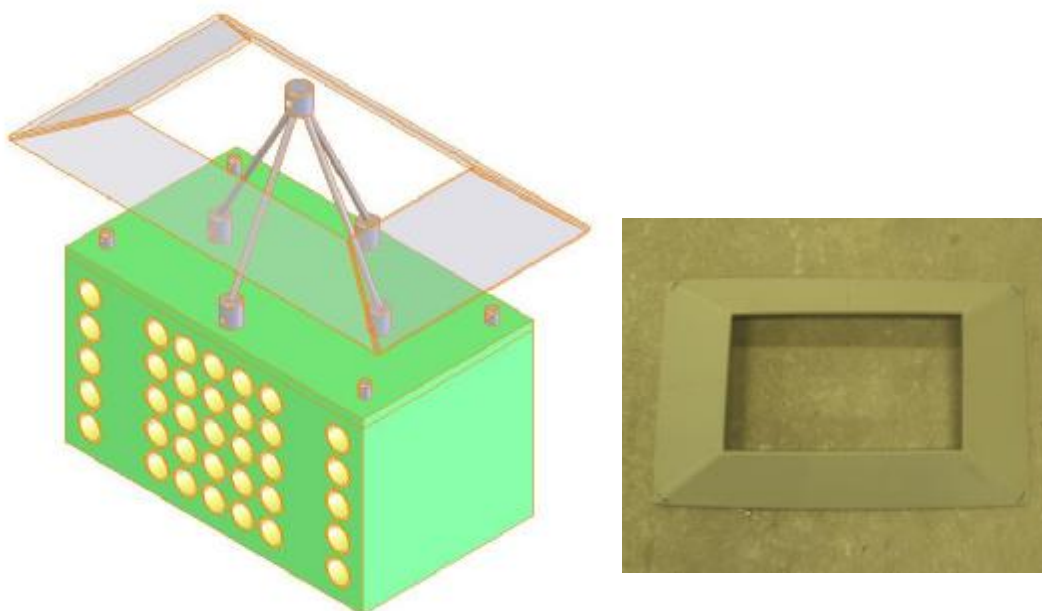


Conforme Tabela 2.2, realizaram-se ensaios verticais da caixa com duas variações de pára-quadras. Os desenhos de fabricação encontram-se no Apêndice I, Figura A.11 e Figura A.12.

As Figuras 2.2g e 2.2h, ilustram a montagem do conjunto. Devido a grande dificuldade de implementação deste sistema em escala real, apenas uma análise visual foi realizada durante o lançamento vertical. Pode-se concluir somente que o mesmo reduz de forma significativa a velocidade de descida.



**Figura 2.2g – Montagem do conjunto caixa, lingada e pára-quadras tipo grade.**



**Figura 2.2h – Montagem do conjunto caixa, lingada e pára-quadras tipo prisma.**

### 2.2.3 MSGL-RO-01

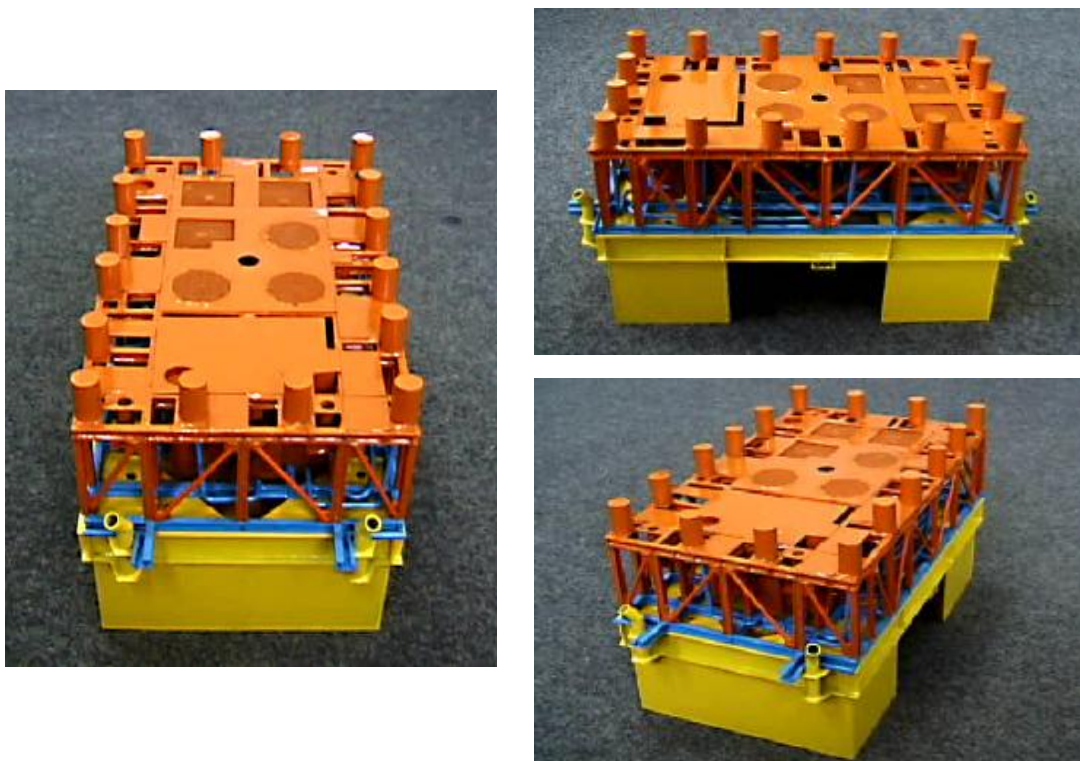
O modelo do manifold MSGL-RO-01, com as mesmas dimensões da caixa de acrílico, foi lançado em três configurações diferentes. Os lançamentos verticais foram realizados em todos os eixos.

As características físicas do modelo para os lançamentos são dadas na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6 – Características físicas do modelo MSGL-RO-01 - Ref. CG.**

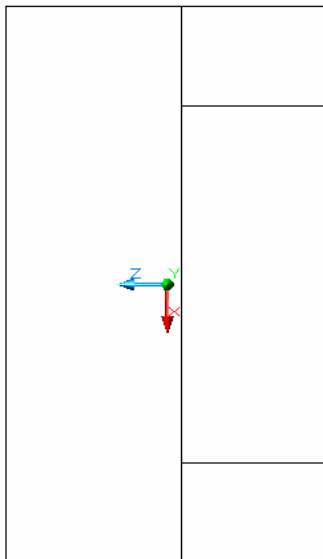
Lançamento	Peso seco	Peso submerso	Centro de Gravidade		
	(Kg)	(Kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Eixo x	5,961	3,394	0,091	0,000	0,000
Eixo y	5,961	3,394	0,000	0,053	0,000
Eixo z	4,561	2,800	0,000	0,000	- 0,010

A figura abaixo ilustra o modelo MSGL-RO-01 em escala reduzida (1:35).

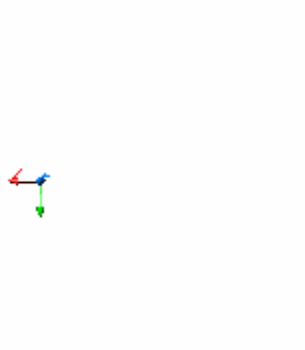


**Figura 2.2i – Modelo MSGL-RO-01 (1:35).**

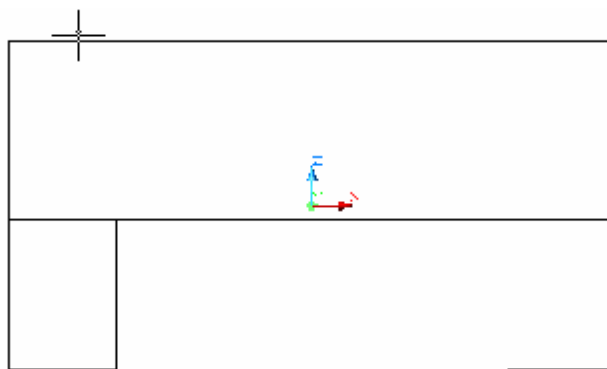
O peso no lançamento nos eixos  $X$  e  $Y$  foram maiores visando estabilizar o eixo requerido na direção da queda, visto que o modelo apresentava rotações excessivas estabilizando-se no eixo de maior estabilidade, o eixo  $Z$ .



**Figura 2.2p – Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo  $X$ .**



**Figura 2.2q – Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo  $Y$ .**



**Figura 2.2r – Desenho esquemático do sistema de coordenadas do lançamento vertical eixo Z.**

## **2.3 RESULTADOS**

A partir das séries temporais obtidas pelos ensaios verticais realizados no LabOceano, analisou-se os resultados de deslocamento em diferentes direções de lançamento através do método analítico sugerido em (FERNANDES *et al.*, 2005a). Na planilha, entrou-se com os dados do modelo e variaram-se os valores dos coeficientes de massa adicional e arrasto de modo a alinhar os coeficientes angulares das curvas de deslocamento e velocidade. Quando a curva do modelo numérico se sobrepõe à curva do modelo experimental obtêm-se os coeficientes de massa adicional e arrasto.

### **2.3.1 ESFERA**

Conforme descrito no item anterior, foram lançadas duas esferas: uma de aço e outra de alumínio.

Na Figura 2.3a, são apresentadas a velocidade obtida do lançamento através do sinal de câmera de vídeo além da velocidade obtida através do modelo analítico desenvolvido para a esfera de aço. Observa-se uma boa aderência entre as curvas apresentadas, demonstrando a consistência do modelo analítico desenvolvido. Para a esfera de aço o número de Reynolds para a velocidade terminal é de  $1,15 \times 10^6$ . As Figuras 2.3b e 2.3c apresentam a localização da esfera de aço na curva  $Re \times C_d$  obtida por (HOERNER, 1958).

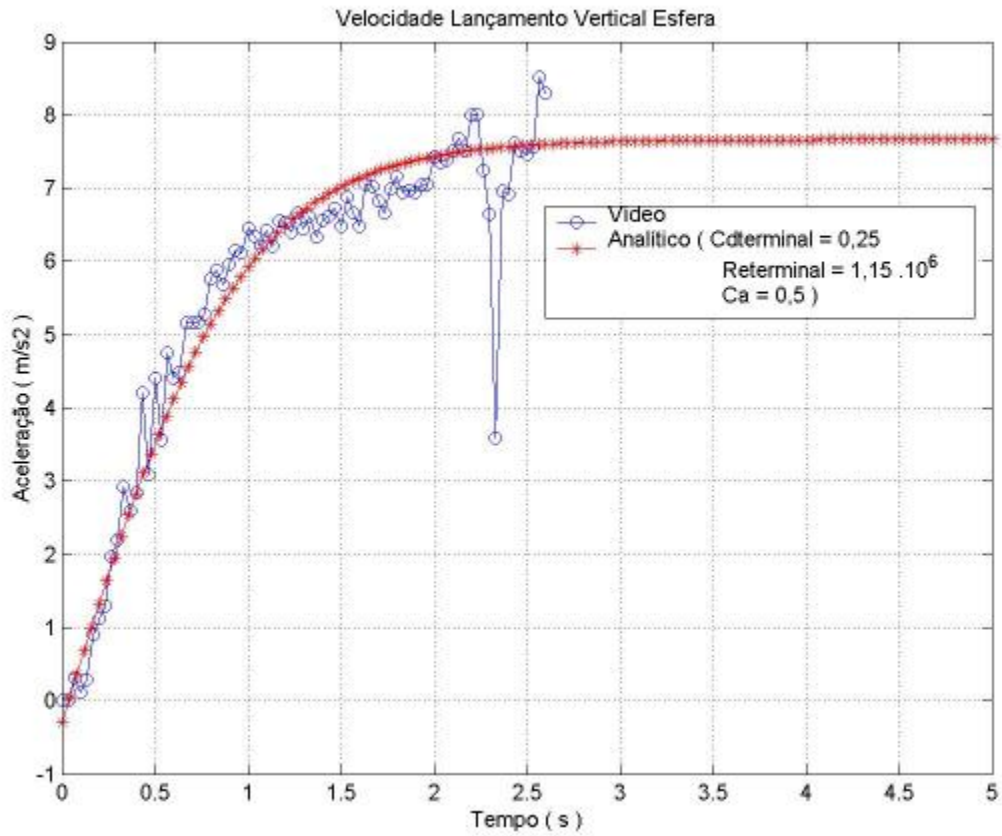


Figura 2.3a – Velocidade no lançamento vertical da esfera de aço. Comparação do sinal de vídeo com o método analítico.

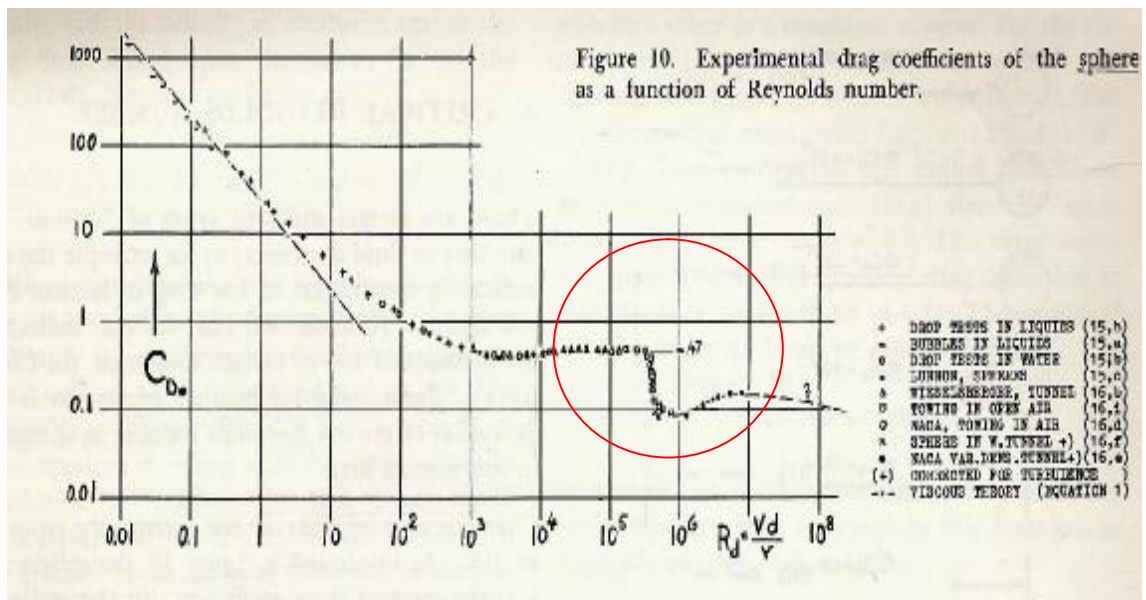


Figura 2.3b – Coeficiente de arrasto de uma esfera determinado experimentalmente em função do número de Reynolds, (HOERNER, 1958).

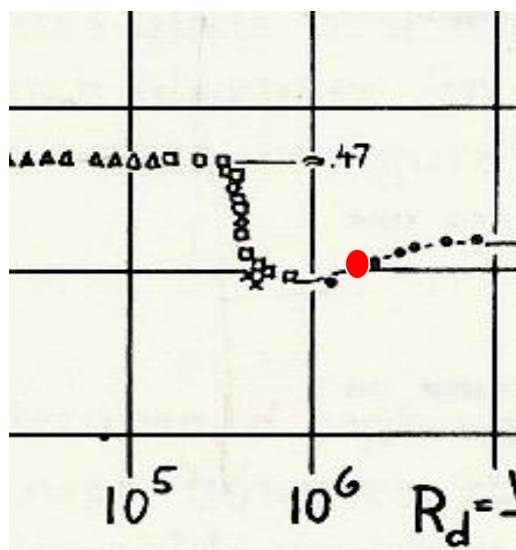


Figura 2.3c – Detalhe da Figura 2.3b localizando o  $Re \times C_d$  (ponto em vermelho) da esfera de aço -  $Re = 1,15 \times 10^6$ . Ref. (HOERNER, 1958).

A Figura 2.3d apresenta a curva de velocidade obtida no lançamento vertical da esfera de alumínio. Observa-se também uma boa consistência nos resultados, principalmente na parte inicial do lançamento, onde a esfera desce na vertical. A partir do tempo dois segundos a esfera, devido à turbulência e emissão de vórtices, inicia um movimento com aspecto helicoidal e saindo fora do plano de lançamento. Este fato foi presenciado pelo acelerômetro, fazendo com que a curva de velocidade obtida pela integração da aceleração apresente oscilações e uma tendência crescente.

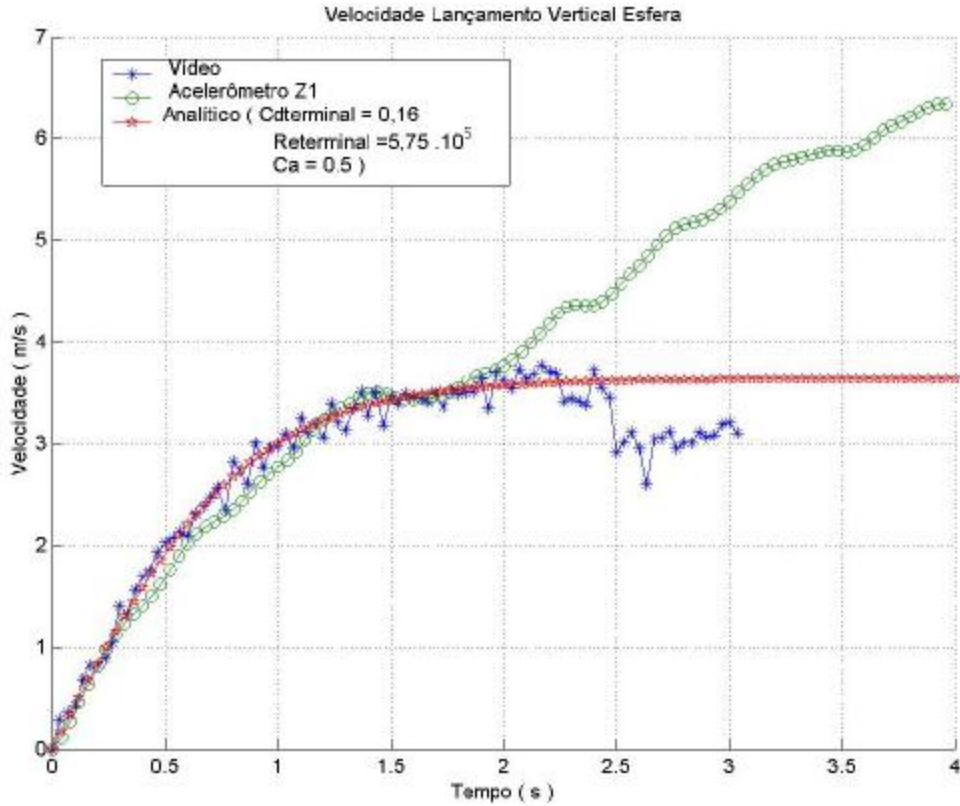


Figura 2.3d – Velocidade no lançamento vertical da esfera de alumínio. Comparação dos sinais dos acelerômetros, vídeo e método analítico.

A Figura 2.3e apresenta a localização da esfera de alumínio na curva  $Re \times Cd$  obtida por (HOERNER, 1958). Observa-se que a esfera de alumínio localiza-se na região de transição laminar-turbulento.

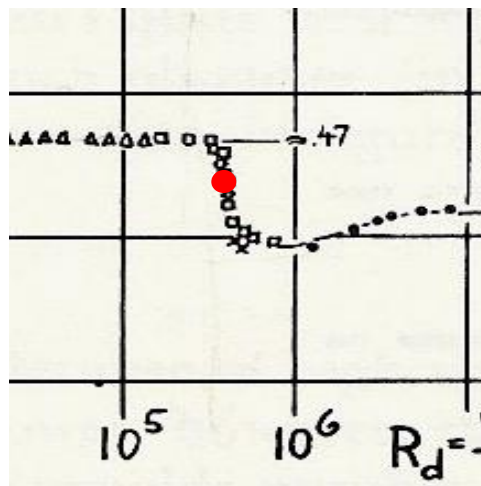


Figura 2.3e – Detalhe da Figura 2.3b localizando o  $Re \times Cd$  (ponto em vermelho) da esfera de alumínio -  $Re = 5,75 \times 10^5$ . Ref. (HOERNER, 1958).

### 2.3.2 CAIXA DE ACRÍLICO

Na seqüência, são apresentadas curvas de velocidade para a caixa nas direções dos eixos X, Y e Z, respectivamente. Algumas curvas são apresentadas com os sinais de vídeo, propiciando um maior grau de certeza quanto aos valores de Cd e Ca obtidos pelo modelo analítico de extrapolação.

Uma vez que a porosidade é um item de grande interesse, decidiu-se priorizar o levantamento dos sinais de vídeo. As Figuras 2.3f e 2.3g apresentam as velocidades da caixa quando do lançamento efetuado na direção do eixo Y, sem porosidade e com porosidade de 25 % respectivamente. Observa-se uma redução do Cd e do Ca quando a caixa apresenta porosidade.

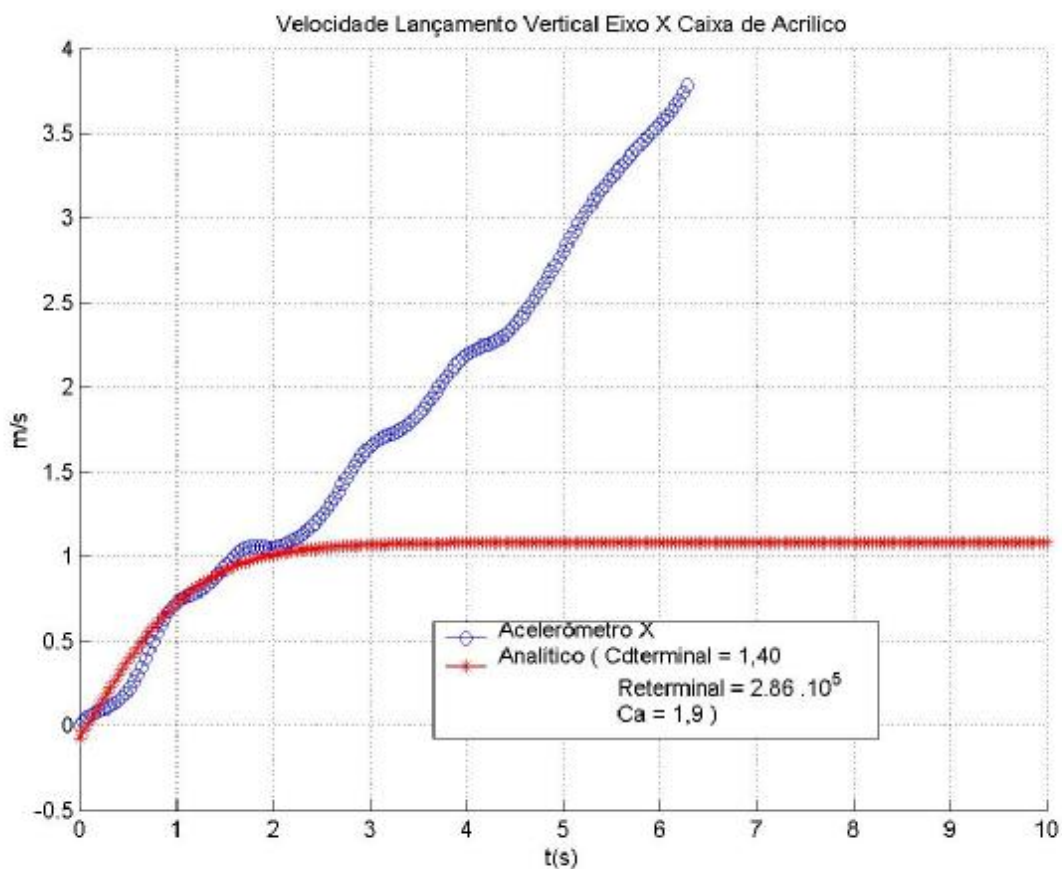


Figura 2.3f – Velocidade no lançamento vertical da caixa sem porosidade – eixo X. Comparação dos sinais dos acelerômetros e método analítico.



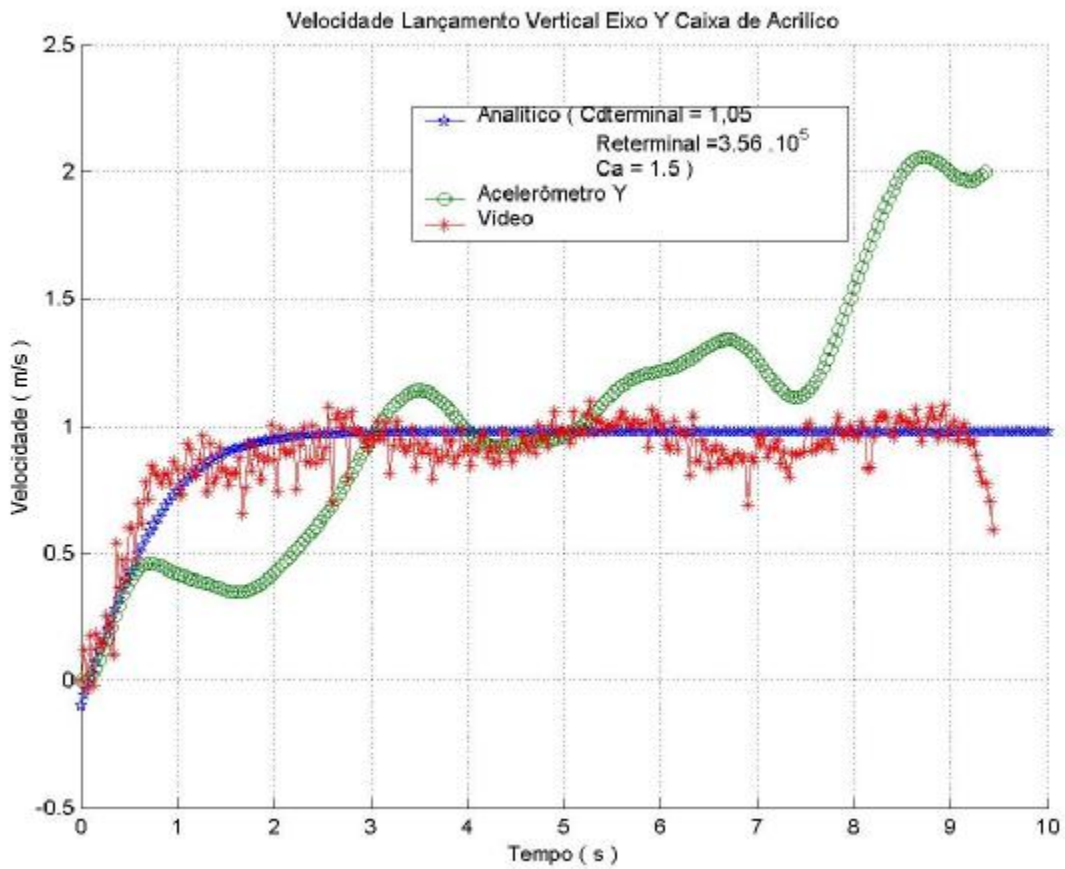


Figura 2.3g – Velocidade no lançamento vertical da caixa sem porosidade – eixo Y. Comparação dos sinais dos acelerômetros, vídeo e método analítico.

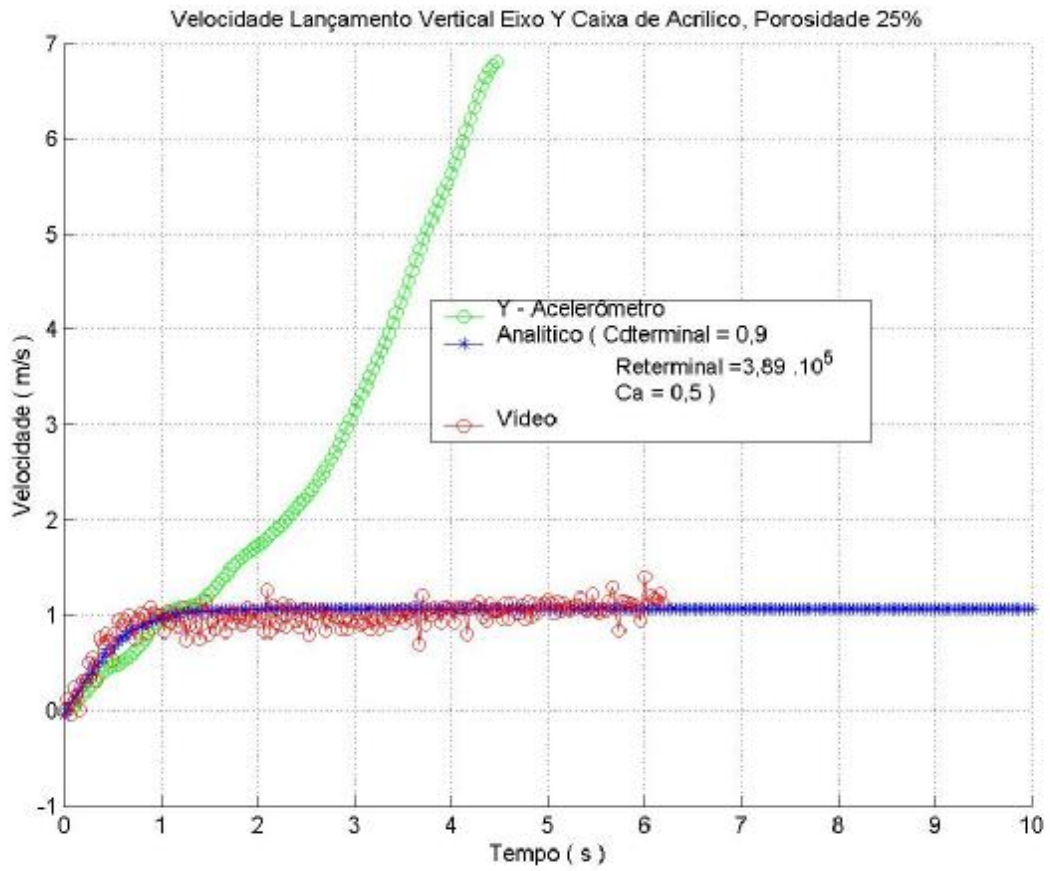


Figura 2.3h – Velocidade no lançamento vertical da caixa com porosidade (25%) – eixo Y. Comparação dos sinais dos acelerômetros, vídeo e método analítico.

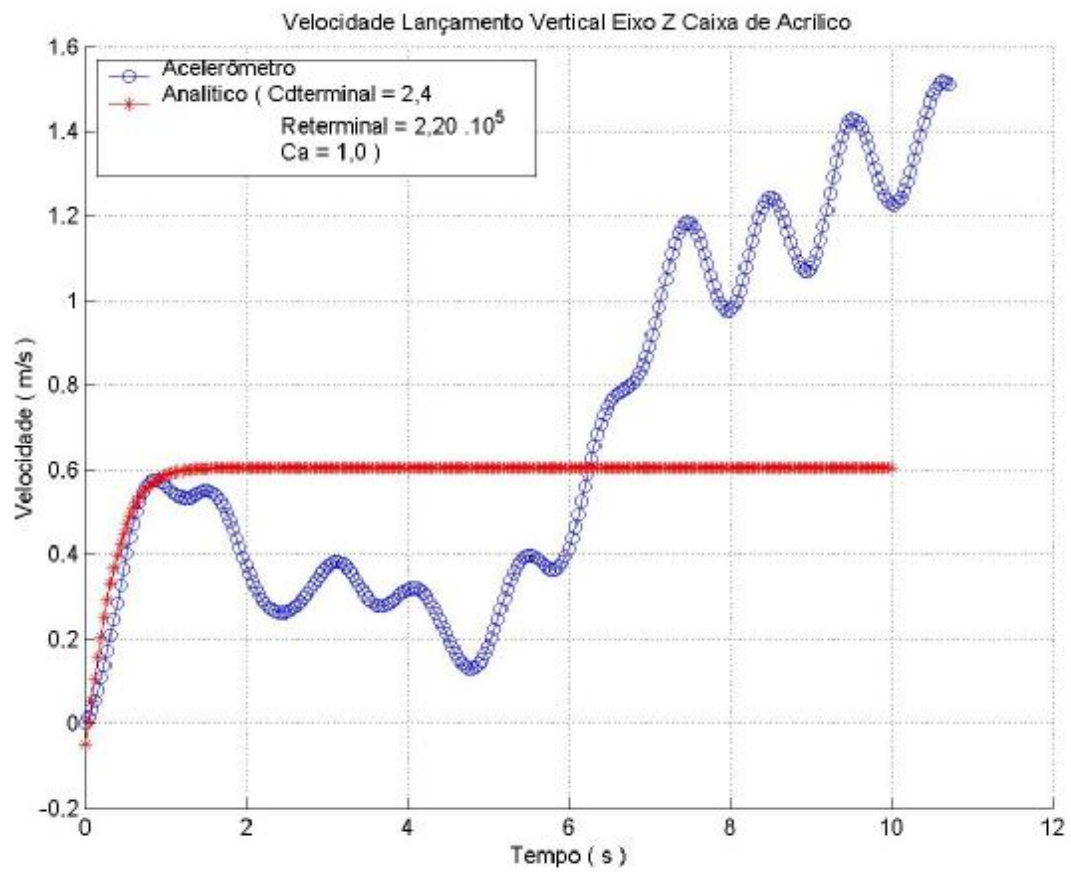


Figura 2.3i – Velocidade no lançamento vertical da caixa – eixo Z. Comparação dos sinais dos acelerômetros e método analítico.

### 2.3.3 MSGL-RO-01

Na seqüência, são apresentadas as curvas de velocidade para o modelo MSGL-RO-01 nas direções dos eixos X, Y e Z, respectivamente. Os resultados apresentados referem-se aos acelerômetros, para uma maior precisão e uma conclusão faz-se necessário o processamento de sinais de vídeo.

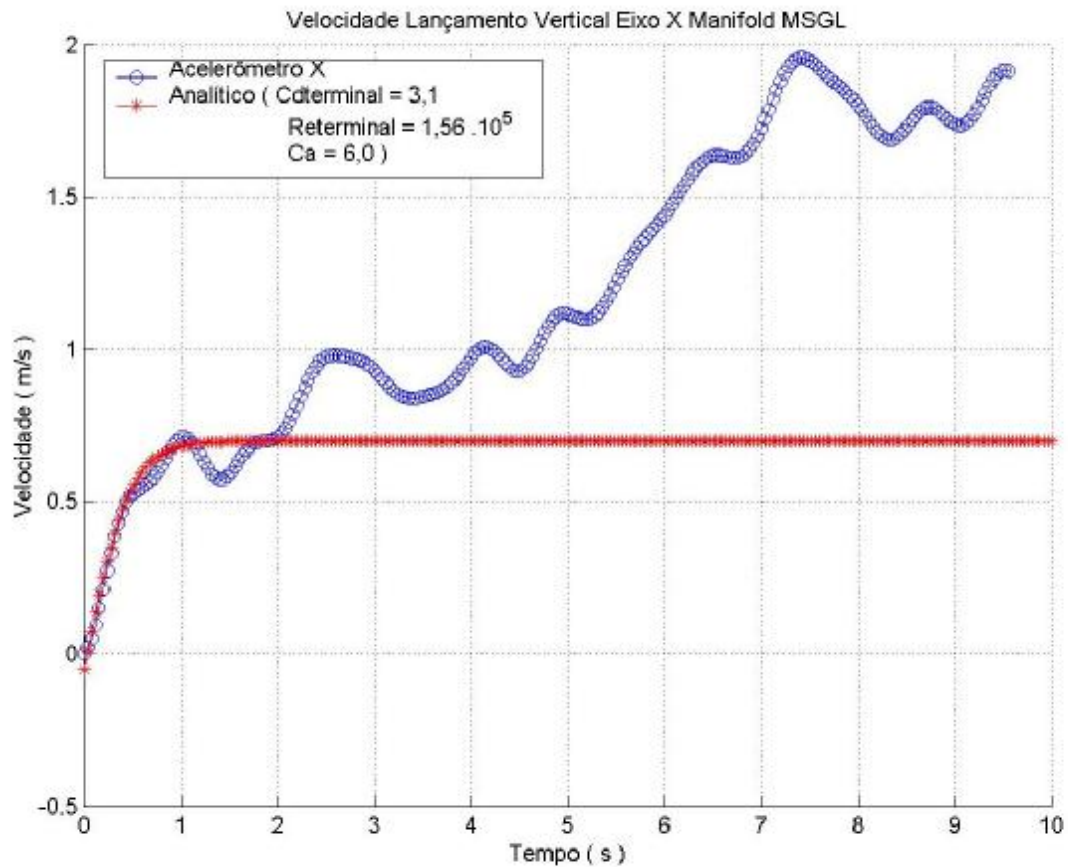


Figura 2.3j – Velocidade no lançamento vertical do MSGL-RO-01 – eixo X. Comparação dos sinais dos acelerômetros e método analítico.

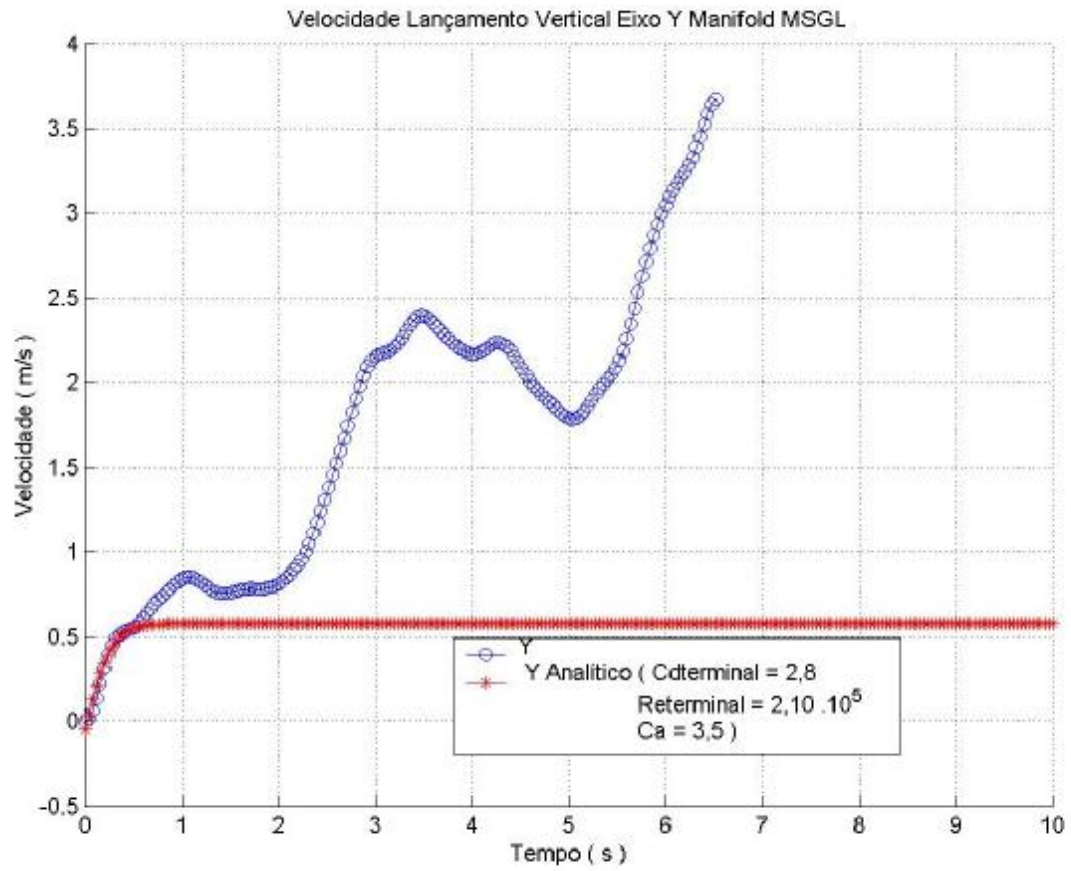


Figura 2.31 – Velocidade no lançamento vertical do MSGL-RO-01 – eixo Y. Comparação dos sinais dos acelerômetros e método analítico.

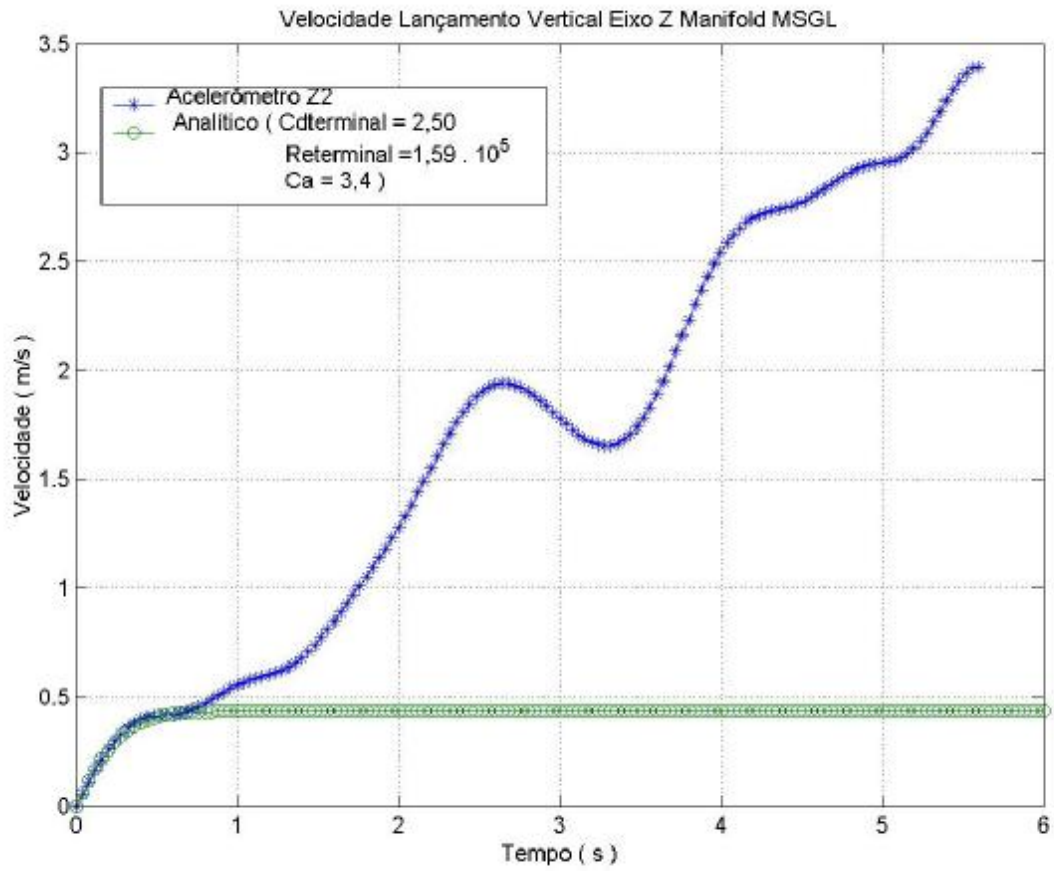


Figura 2.3m – Velocidade no lançamento vertical do MSGL-RO-01 – eixo Z. Comparação dos sinais dos acelerômetros e método analítico.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Através dos ensaios de lançamento vertical, foi possível posicionar este método como uma importante ferramenta para a obtenção de coeficientes hidrodinâmicos de corpos. Nos ensaios de lançamentos verticais, o movimento dos corpos foi determinado por acelerômetros e câmeras de vídeo. Devido ao movimento irregular do corpo, como rotações e translações fora do plano, originados por turbulência e emissão de vórtices, os sinais dos acelerômetros ficaram comprometidos, apresentando grandes oscilações. Esses ruídos nos sinais dos acelerômetros foram amplificados com a integração realizada para obtenção das velocidades, gerando curvas crescentes e apresentando grandes oscilações. Entretanto, os sinais de vídeo permitiram a obtenção de curvas de velocidades bem mais condicionadas, uma vez que através das imagens acompanhou-se a trajetória do centro de massa do corpo na direção vertical, eliminando-se assim a influência dos deslocamentos do corpo na horizontal.

As curvas de velocidade obtidas experimentalmente serviram de base para a obtenção dos coeficientes de arrasto e de massa adicional. Esses coeficientes foram obtidos através de um método analítico que extrapola a velocidade do ensaio para a velocidade terminal. Tomando por base o trabalho desenvolvido pode-se afirmar que os sinais dos acelerômetros não são por si só, suficientes para a obtenção da velocidade, sendo, portanto necessária a obtenção de curvas de velocidade através dos sinais das imagens do ensaio de forma a eliminar as grandes oscilações observadas provenientes de deslocamentos laterais. Dessa forma, os coeficientes  $C_d$  e  $C_a$  para o MSGL-RO-01 apresentados no presente trabalho não são conclusivos, devendo ser levantada a curva de velocidade através dos sinais de vídeo para os lançamentos verticais do MSGL nas direções dos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ .

Um parâmetro importante observado nos resultados dos lançamentos verticais refere-se à comparação dos coeficientes  $C_d$  e  $C_a$  para a caixa lançada sem porosidade e com porosidade de 25%. Observa-se uma pequena redução no coeficiente de arrasto, de 1,05 para 0,9 (aproximadamente 10%) e uma grande redução no coeficiente de massa adicional, de 1,5 para 0,5 (aproximadamente 70%). O comportamento do  $C_d$  condiz com a bibliografia consultada em (FERNANDES *et al.*, 2000) e (SCHACHTER *et al.*, 2002).

### CAPÍTULO III – ENSAIOS DE LANÇAMENTO PENDULAR

O lançamento pendular consiste no lançamento do modelo descrevendo uma trajetória pendular durante sua queda. Tem-se por objetivo analisar o comportamento hidrodinâmico das diversas configurações do lançamento.

Nos itens seguintes, será abordada a montagem do ensaio, assim como a sua realização e resultados obtidos.

#### 3.1. MONTAGEM DO ENSAIO

Para o lançamento pendular foi montada uma haste do lado apostado do ponto de lançamento dos modelos. Na haste foi fixada uma das células de carga projetadas para o lançamento. Uma das pontas do cabo de lançamento era conectada à célula de carga junto à haste enquanto a outra ponta do cabo com outra célula de carga era conectada ao modelo e a partir da plataforma da ponte o modelo era lançado.

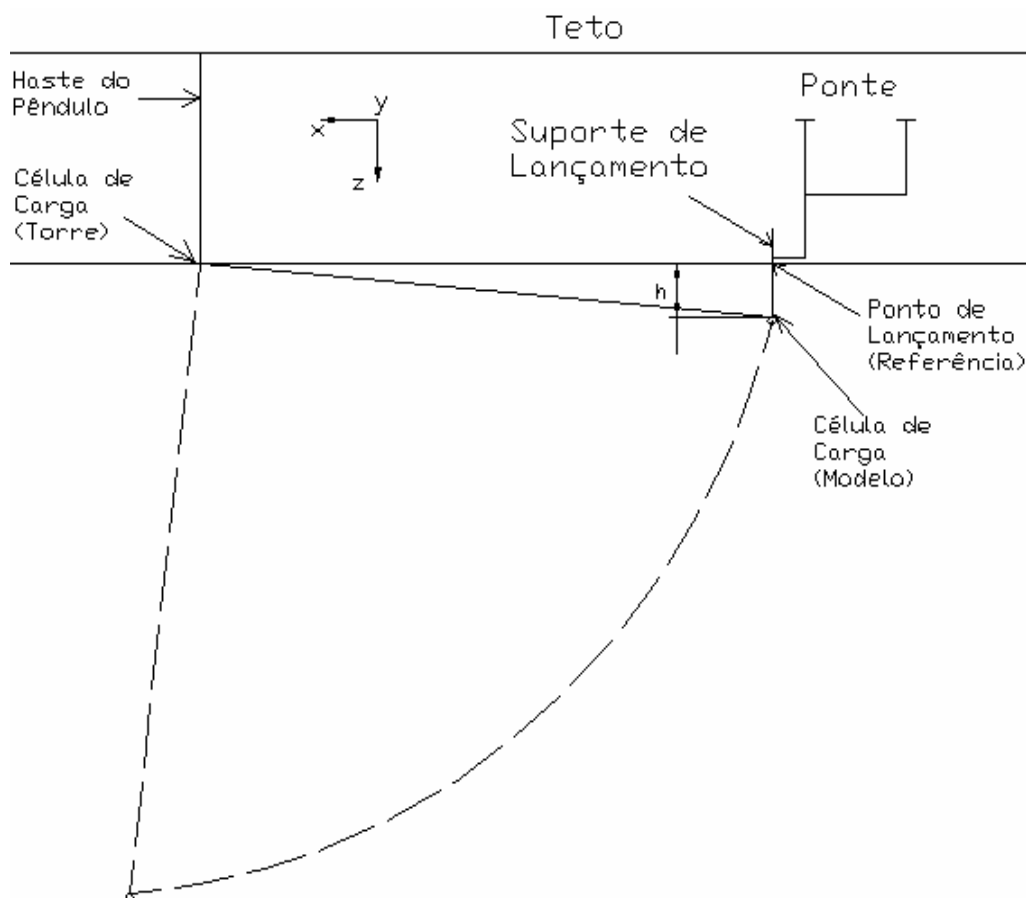
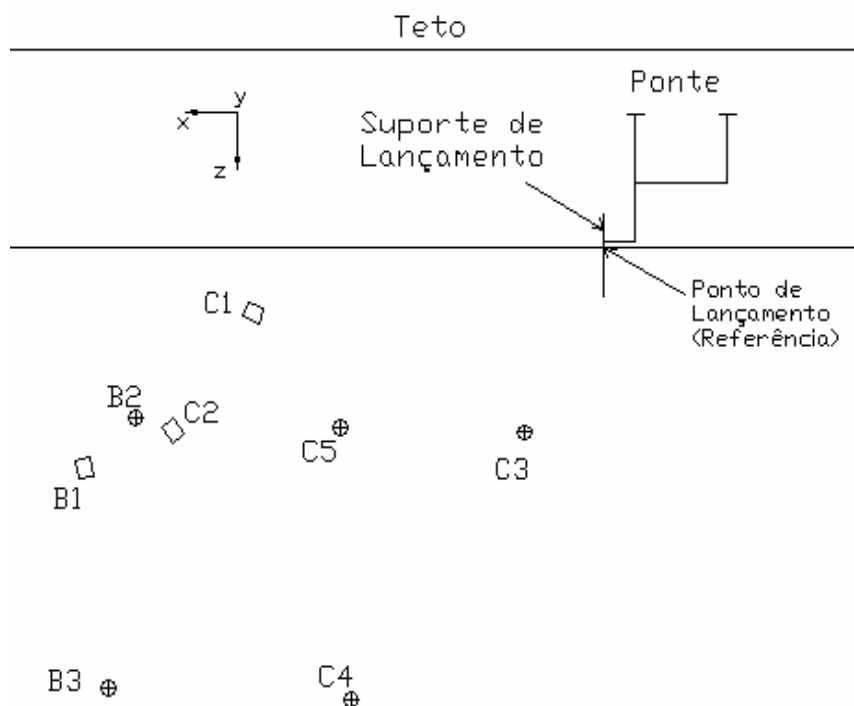


Figura 3.1a – Desenho esquemático do lançamento pendular.



### 3.1.1 SISTEMA DE VÍDEO

Para acompanhar toda trajetória do modelo durante a queda, foi instalado um sistema de câmera, composta por oito câmeras estrategicamente localizadas cobrindo toda a área de lançamento.



**Figura 3.1b – Desenho esquemático do posicionamento das câmeras para lançamento pendular.**

Foram instaladas cinco câmeras horizontais orientadas para o eixo  $Y$  e três câmeras oblíquas possuindo um ângulo de inclinação em relação à horizontal. As coordenadas das posições das câmeras em relação o ponto de lançamento são:

**Tabela 3.1 – Posicionamento das câmeras no lançamento pendular.**

Câmera	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ângulo (grau)	
C1	7,42	0,90	1,41	21	Oblíquas
C2	9,21	0,90	3,89	51	
B1	10,15	0,90	4,69	81	
C3	1,72	-6,50	3,78	0	Frontais (Eixo Y)
C4	5,72	-6,50	9,22	0	
C5	5,72	-6,50	3,69	0	
B2	10,88	-6,50	3,47	0	
B3	11,21	-6,50	8,99	0	

Assim como no lançamento vertical, foram utilizadas lonas e fitas reflexivas de forma a aumentar o contraste dos modelos, melhorando o pós-processamento das imagens.

### 3.1.2 INSTRUMENTAÇÃO

Para não interferir na trajetória do modelo, foram instalados quatro acelerômetros biaxiais, cuja transmissão de dados foi feita via onda de rádio através do sistema de *data-logger*. Os acelerômetros foram posicionados de tal forma que fosse possível, através das leis da cinemática, reproduzir a trajetória dos modelos.

Além dos acelerômetros, utilizaram-se células de carga para medir as trações no cabo de lançamento. Foram utilizadas duas células de carga por redundância, uma junto ao modelo e outra na haste do pêndulo.

Na esfera foi projetado um compartimento interno para alocar a célula de carga, visto a experiência acumulada pelo laboratório mostra que qualquer sobressalência junto à esfera pode causar interferência na trajetória da mesma (vide Figura 2.2a). Uma não deformação uniforme da célula de carga em função do atrito da mesma com a parede do compartimento resultou em resultados de tração não muito confiáveis, sendo estes descartados. Utilizou-se, então, apenas a célula de carga localizada na haste. Para modelos de maiores dimensões, tais como, caixa de acrílico e MSGL-RO-01, um menor efeito hidrodinâmico da célula de carga é esperado. Optou-se por usar a célula de carga exposta junto aos mesmos. Os resultados foram bem consistentes conforme esperados.

### 3.1.3 CABOS DE POLIÉSTER

Para o lançamento pendular foram utilizados os seguintes cabos de poliéster:

**Tabela 3.2 – Características dos cabos de poliéster.**

Diâmetro (mm)	Peso <sub>esp</sub> no ar (g/m)	Peso <sub>esp</sub> na água (g/mm)	Mod. Elast (Kg/m <sup>2</sup> )
3,00	7,25	1,13	3,12E+08
6,00	30,79	6,56	1,72E+08
10,00	74,59	15,44	1,28E+08
20,00	340,00	80,00	6,49E+07
25,00	440,00	90,00	2,58E+07

### 3.1.3 LINGADAS

No lançamento pendular, utilizaram-se quatro tipos de lingadas, duas rígidas e duas flexíveis.

A figura 3.1c ilustra a montagem do sistema de lingadas rígida na caixa de acrílico. É observado a montagem da lingada de içamento em duas configurações diferentes denominadas cruz e retangular. As lingadas flexíveis foram construídas com cabo de aço de 2mm.

O Apêndice I, as Figuras A.7 à A.10, fornecem os desenhos de fabricação das lingadas rígidas para içamento.

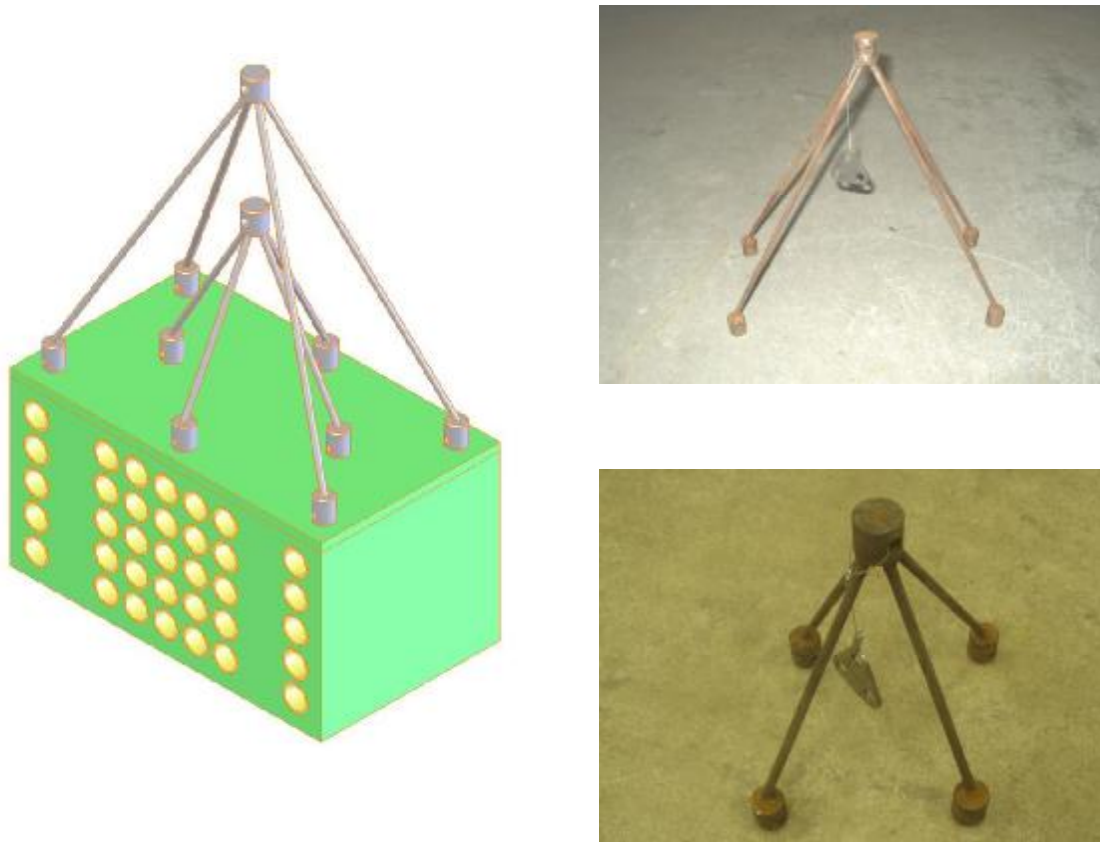


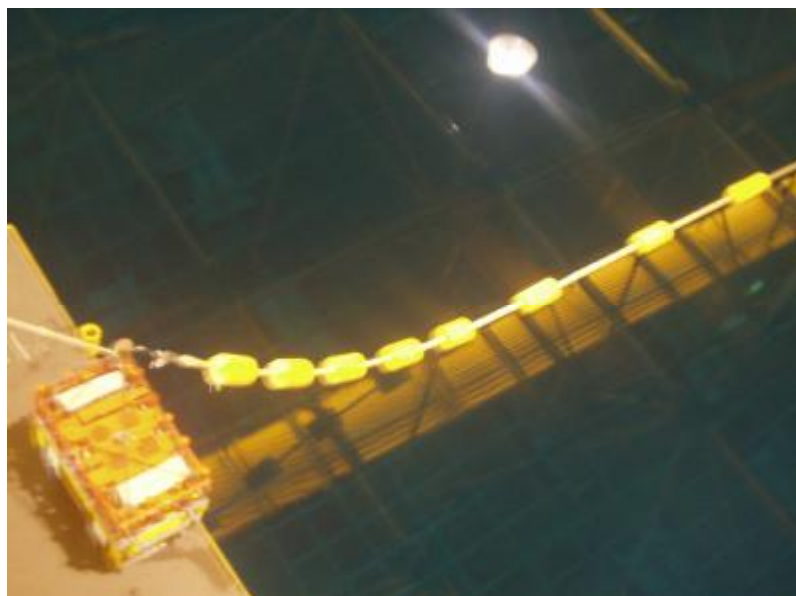
Figura 3.1c – Montagem do sistema de lingada rígida para içamento na caixa de acrílico.

### 3.1.4 FLUTUADORES

Foram utilizadas duas configurações de flutuadores conforme descrito nas tabelas seguintes.

**Tabela 3.3 – Configuração flutuador F1.**

Configuração F1					
Flutuador	Raio	Comp.	Posição	Peso Seco	Peso com absorção
	(cm)	(cm)	(cm)	(Kg)	(Kg)
1	3	8,5	20	0,12	0,125
2	3	8,5	40	0,13	0,130
3	3	8,5	60	0,13	0,125
4	3	8,5	80	0,12	0,120
5	3	8,5	100	0,115	0,125
6	3	12,5	150	0,195	0,160
7	3	12,5	200	0,175	0,190
8	3	16,5	250	0,255	0,225
				Empuxo total =	1,200 Kg



**Figura 3.1d – Lançamento pendular do manifold MSGL com a configuração F1 de flutuadores.**

**Tabela 3.4 – Configuração flutuador F2.**

Configuração F2					
Flutuador	Raio	Comp.	Posição	Peso Seco	Peso com absorção
	(cm)	(cm)	(cm)	(Kg)	(Kg)
1	3	8,5	10	0,12	0,125
2	3	8,5	20	0,13	0,130
3	3	8,5	30	0,13	0,125
4	3	8,5	40	0,12	0,120
5	3	8,5	50	0,115	0,125
6	3	8,5	60	0,12	0,130
7	3	8,5	70	0,13	0,125
8	3	8,5	80	0,12	0,135
9	3	8,5	90	0,12	0,125
10	3	8,5	100	0,12	0,125
11	3	12,5	150	0,195	0,160
12	3	12,5	200	0,175	0,190
13	3	16,5	250	0,255	0,225
				Empuxo total =	1,840 Kg

### **3.1.4 PÁRA-QUEDAS**

Assim como no lançamento vertical descrito no Capítulo 2, utilizaram-se as configurações tipo prisma e grade.

As Figuras A.11 à A.14, localizadas no Apêndice I, ilustram os desenhos de fabricação e montagem dos pára-quedas na caixa de acrílico.

### **3.1.5 PLACA TRIANGULAR**

De forma a criar uma derivação comum ao modelo (caixa de acrílico ou MSGL-RO-01), ao cabo içamento e ao cabo pendular, fez-se necessário a utilização de uma placa triangular conforme ilustrado na Figura 3.1e.

A Figura A.6, Apêndice I, fornece o desenho de fabricação da placa triangular.



**Figura 3.1e – Elemento comum ao modelo e ao cabo de instalação pendular – Placa triangular.**

### **3.2 MATRIZ DE ENSAIO**

No ensaio do lançamento pendular, foram realizadas vinte e uma configurações como pode ser visto na Tabela 3.5, sendo, como no lançamento vertical, realizado no mínimo dois lançamentos para cada configuração.

Tabela 3.5 – Matriz de lançamento pendular.

Ensaio	modelo			diam. do cabo					dist.		CG		altura inicial			lingada				porosidade		para-quadras			flutuador			altura placa triangular		Código	
	esfera	caixa	MSG	3 mm	6 mm	10 mm	20 mm	25 mm	11,5 m	9 m	h/2	h/3	1 m	2 m	3 m	rígida retangular	cabo retangular	rígida cruz	cabo cruz	0%	25%	sem	P1 ( funil )	P2 ( gradeado )	Sem	F1	F2	junto ao modelo	40 cm		
1	X			X					X		X		X							X		X			X						ESF-C3-D12-PO0-H1
2	X				X				X		X		X							X		X			X						ESF-C6-D12-PO0-H1
3	X					X			X		X		X							X		X			X						ESF-C10-D12-PO0-H1
4	X						X		X		X		X							X		X			X						ESF-C20-D12-PO0-H1
5	X							X	X		X		X							X		X			X						ESF-C25-D12-PO0-H1
6	X					X				X	X		X							X		X			X						ESF-C10-D9-PO0-H2
7	X					X			X		X			X						X		X				X					ESF-C10-D12-F1-PO0-H2
8	X					X			X		X				X					X		X				X					ESF-C10-D12-F2-PO0-H2
9	X					X			X		X		X							X		X				X					ESF-C10-D12-PO0-H2
10	X					X			X		X		X							X		X					X				ESF-C10-D12-PO0-H3
11		X				X			X		X			X				X	X	X		X				X		X			CAI-C10-D12-F1-LI4-PO0-H2
12		X				X			X			X						X		X	X	X				X		X			CAI-C10-D12-F1-LI4-PO25-H2-CG3
13		X				X			X			X						X	X	X		X				X		X			CAI-C10-D12-F1-LI4-PO0-H2-CG3
14		X				X			X			X						X	X	X		X				X		X			CAI-C10-D12-F1-LI3-PO0-H2-CG3
15		X				X			X			X						X	X	X		X				X			X		CAI-C10-D12-F1-LI3-PO0-H2-CG3-HT40
16		X				X			X			X						X	X	X			X			X			X		CAI-C10-D12-F1-LI3-PO0-PQ1-H2-CG3-HT40
17		X				X			X			X						X	X	X			X			X			X		CAI-C10-D12-F1-LI3-PO0-PQ2-H2-CG3-HT40
18			X			X			X			X		X		X				própria		X				X		X			MSG-C10-D12-LI1-H2-F1
19			X			X			X			X		X			X			própria		X				X		X			MSG-C10-D12-LI2-H2-F1
20			X			X			X			X		X			X			própria		X				X		X			MSG-C10-D12-LI3-H2-F1
21			X			X			X			X		X			X			própria		X				X		X			MSG-C10-D12-LI4-H2-F1

### 3.2.1 ESFERA

Foram realizadas no lançamento pendular da esfera dez configurações diferentes. Nas cinco primeiras configurações, apenas houve a mudança do diâmetro do cabo de poliéster, mantendo-se constantes as outras variáveis.

Ao final das cinco primeiras configurações, optou-se pelo cabo de poliéster de 10 mm, sendo este utilizado para as outras configurações da esfera e dos outros modelos.

Conforme Tabela 3.5, na configuração seis variou-se a distância de lançamento de 11,5 metros para 9 metros. Da sétima à nona configuração, variaram-se a profundidade de lançamento de 2 metros, 3 metros e 1 metro, respectivamente já utilizando a configuração do flutuador F1. A configuração 10 utilizou o modelo de flutuador F2.

Em todas as configurações do lançamento pendular da esfera, suas características físicas foram mantidas.

**Tabela 2.5 – Características físicas da esfera de alumínio - Ref. CG.**

Peso seco	Peso submerso	Centro de Gravidade		
(Kg)	(Kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
4,05	2,16	0,000	0,000	0,000

### 3.2.2 CAIXA DE ACRÍLICO

Após o lançamento das dez configurações da esfera, optou-se utilizar para todos os lançamentos pendular da caixa de acrílico, a configuração do modelo de flutuador F1, cabo de poliéster de 10 mm, distância do ponto de lançamento de 11,5 metros e profundidade de lançamento de 2 metros. Variou-se o centro de gravidade, lingada, porosidade, pára-quadras e altura da placa triangular.



Para posicionar o centro de gravidade do modelo em  $\frac{H}{2}$  e  $\frac{H}{3}$ , foram projetados dois lastros de chumbo de 0,097 Kg e dois 1,775 Kg, respectivamente. Estes foram posicionados segundo as tabelas abaixo:

**Tabela 2.6 - Lastro CG - H/ 2.**

	Peso (kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
LASTRO 1 TOTAL	0,097	0,000	-0,200	0,004
LASTRO 2 TOTAL	0,097	0,000	0,200	0,004

**Tabela 2.7 - Lastro CG – H/3.**

	Peso (kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
LASTRO 1 TOTAL	1,775	0,000	-0,200	0,012
LASTRO 2 TOTAL	1,775	0,000	0,200	0,012

As características físicas do modelo da caixa para diferentes centro de gravidade são dada na tabela abaixo.

**Tabela 2.8 – Características físicas da caixa de acrílico, lançamento pendular - REF. CG.**

CG	Peso seco	Peso submerso	Centro de Gravidade		
	(Kg)	(Kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
H/2	12,110	3,356	0,000	0,000	0,000
H/3	15,466	3,659	0,000	0,000	-0,032

### 3.2.3 MSGL-RO-01

No lançamento pendular do manifold MSGL-RO-01, variou-se apenas o modelo de lingada sendo realizado as quatro configurações propostas.

O modelo foi lançado com as seguintes características físicas:

**Tabela 2.9 – Características físicas do MSGL-RO-01 no lançamento pendular - REF. CG.**

Peso seco	Peso submerso	Centro de Gravidade		
(Kg)	(Kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
4,561	2,800	0,000	0,000	- 0,010

### **3.3 RESULTADOS**

Apresentam-se por meio de séries temporais, os resultados de tração obtidos experimentalmente.

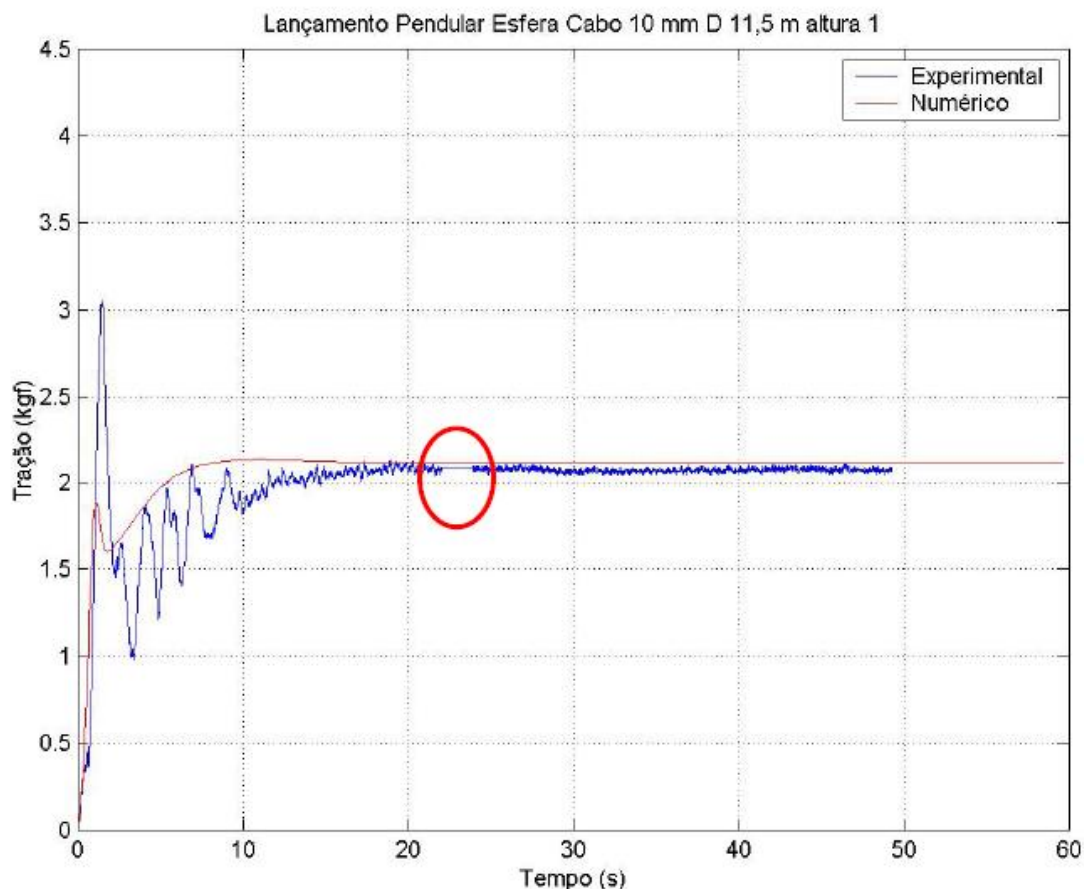
#### **3.3.1 ESFERA**

O objetivo do lançamento da esfera foi retirar a complexidade de um corpo como o manifold. Conforme exemplificado anteriormente, a esfera foi lançada com cabos de poliéster de diâmetros três, seis, dez, vinte e vinte e cinco milímetros, respectivamente. A quantidade destes vários diâmetros possibilita grande clareza do seu papel no comportamento global. Nesta mesma etapa, são avaliados diferentes casos onde a profundidade de lançamento é variada de um, dois e três metros e a distância da torre de fixação ao ponto de lançamento é variada de nove metros para onze metros e meio.

Devido à ênfase na análise da influência no cabo, nos casos analisados não há flutuadores. Todos os resultados experimentais obtidos são comparados com o *ORCAFLEX*. A entrada de dados dos coeficientes hidrodinâmicos no *ORCAFLEX* foi baseada nos resultados dos ensaios de lançamento vertical.

##### **3.3.1.1 CABO 3MM**

A Figura 3.3a apresenta o resultado da tração para o lançamento da esfera efetuado com o cabo de 3 mm de diâmetro.



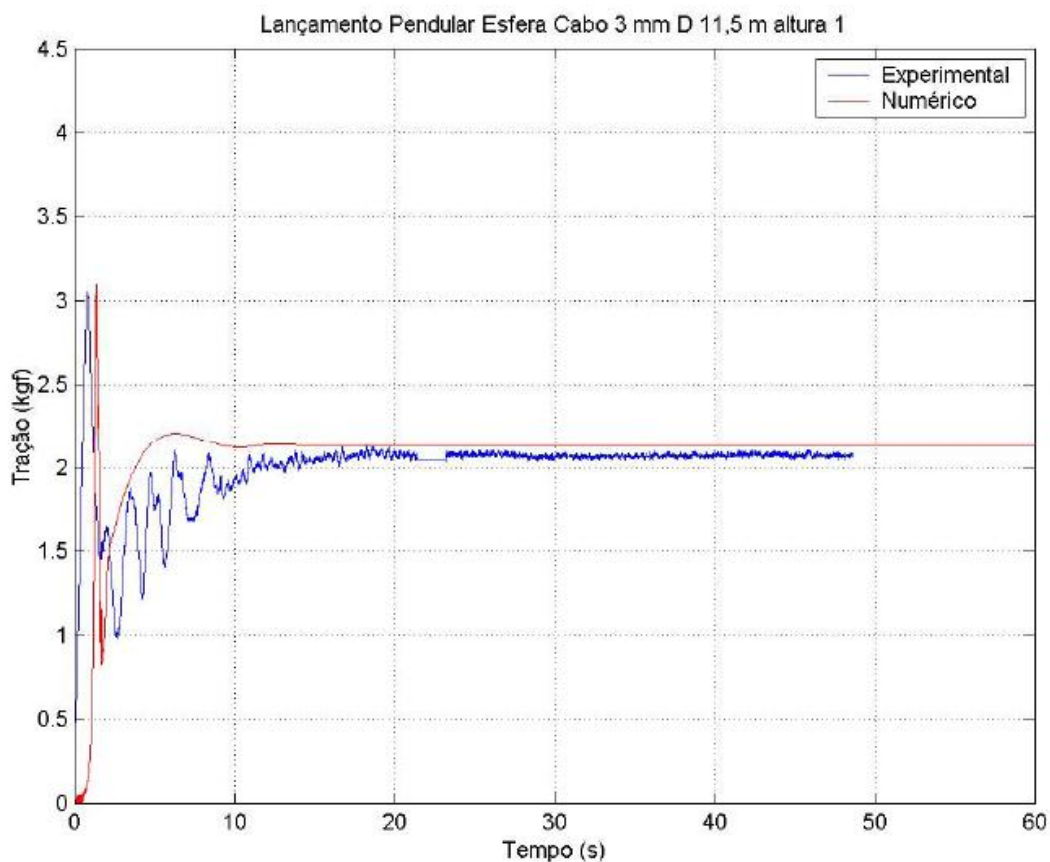
**Figura 3.3a – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 3mm.**

Verifica-se um acentuado pico de tração inicial causado pela condição de praticamente de queda livre do corpo. Através do *ORCAFLEX*, utilizando-se um coeficiente de arrasto para o cabo de 1,19 conforme (HOERNER, 1958), não foi possível reproduzir este pico obtido experimentalmente. Entretanto, variando-se o  $C_d$  do cabo, pode-se obter este pico inicial de tração via *ORCAFLEX* como será apresentado a seguir. Ainda com o resultado da Figura 3.3a em mente, notam-se picos subsequentes. As oscilações de baixa amplitude e alta frequência verificada no sinal da tração devem-se ao fenômeno de VIV (Vortex Induced Vibration) observados em praticamente todos os lançamentos.

Durante a realização dos ensaios no LabOceano, foram verificados alguns ruídos de forma bem específica (quase retangular) nos sinais das células de carga. Esses ruídos foram eliminados nas análises realizadas. Na Figura 3.3a, a região onde foi observado o ruído característico está circundada por uma elipse em vermelho. Nos demais resultados

apresentados também foram eliminados os ruídos. Uma justificativa sobre esses ruídos podem ser encontrada em (FERNANDES *et al.*, 2004).

A Figura 3.3b mostra a tração na torre para o cabo de 3 mm com Cd de 0,10. Observa-se que o pico de tração no início do lançamento da esfera, obtido através do *ORCAFLEX*, aumentou em aproximadamente 40% quando comparado com a Figura 3.3a, onde o Cd do cabo utilizado é de 1,19. A justificativa para o Cd de 0,10 pode estar relacionada ao deslocamento do corpo sobre a sua própria esteira. O coeficiente de arrasto do cabo é um parâmetro de grande importância para lançamentos pendulares realizados sem a utilização de flutuadores, onde o pico de tração inicial é mais acentuado. Como indicado em seguida, a presença dos flutuadores diminui a importância do Cd.



**Figura 3.3b – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 3mm – Cd 0,10.**

### 3.3.1.2 CABO 6MM

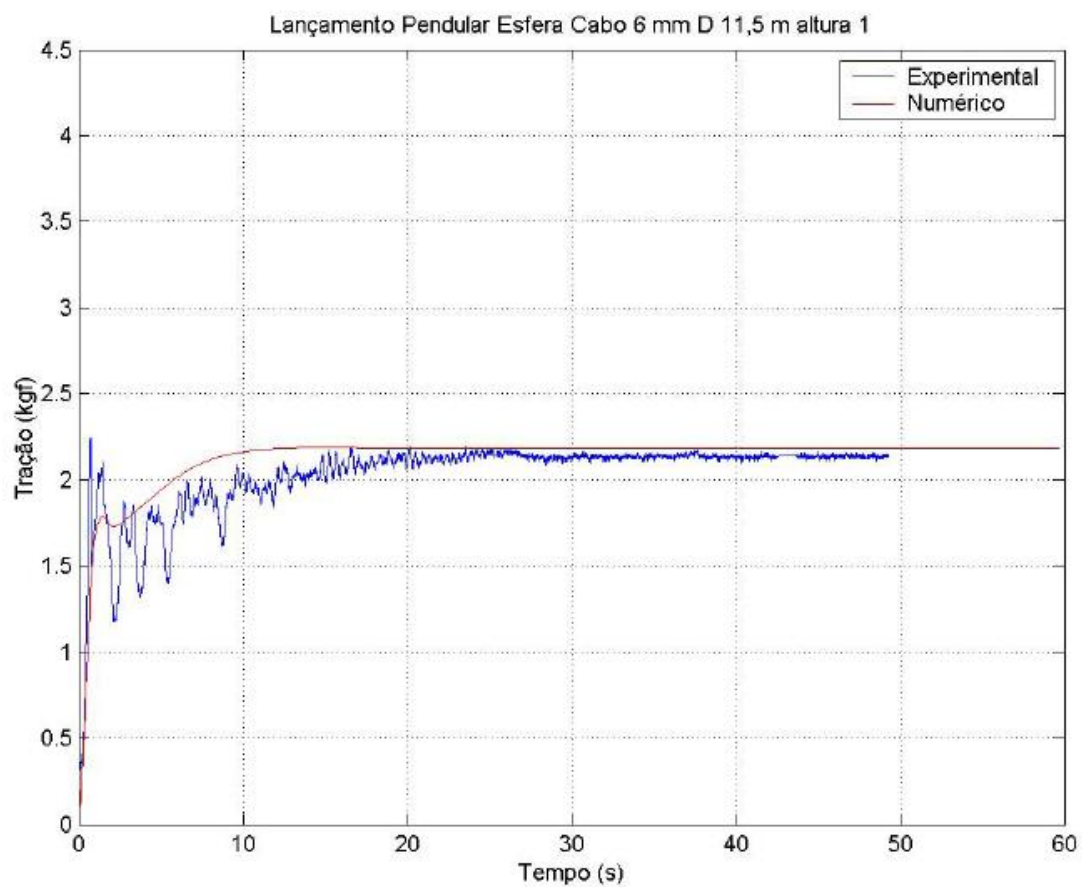


Figura 3.3c – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 6mm.

### 3.3.1.3 CABO 10MM

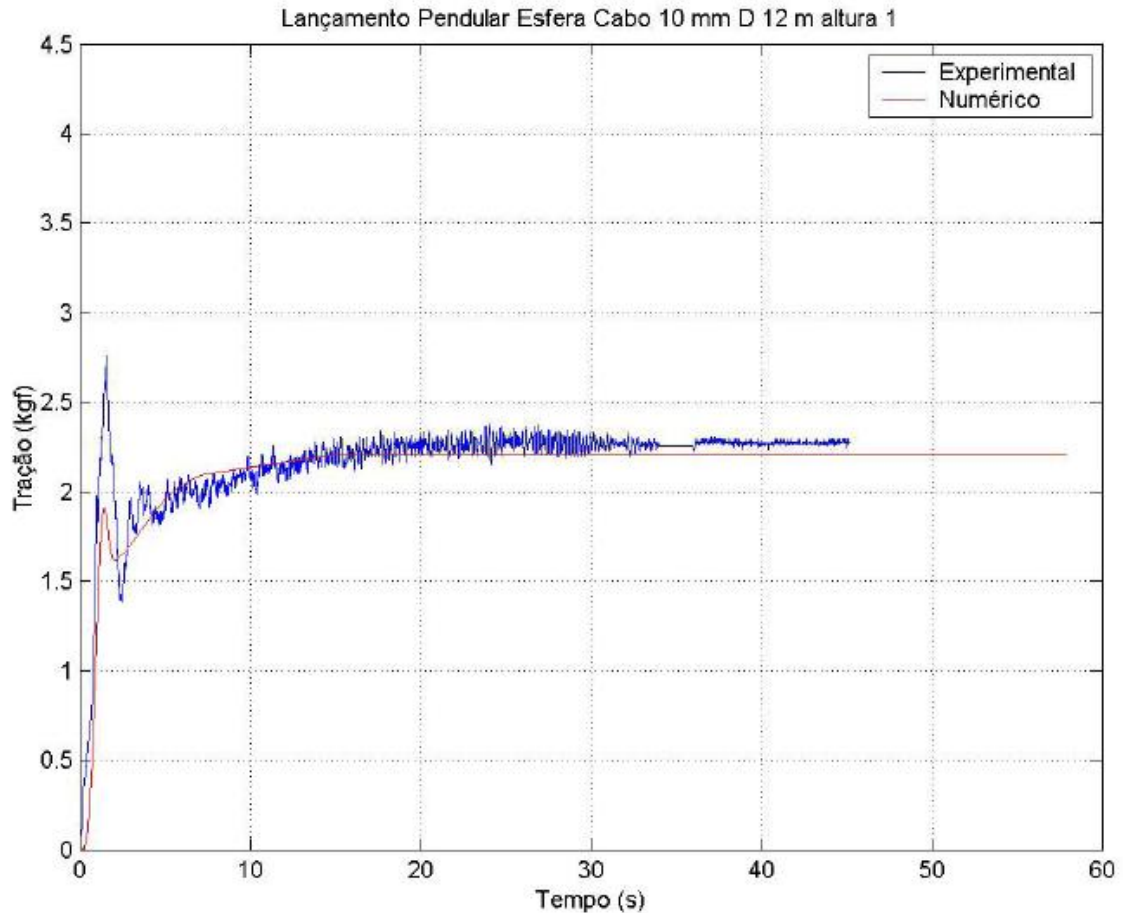
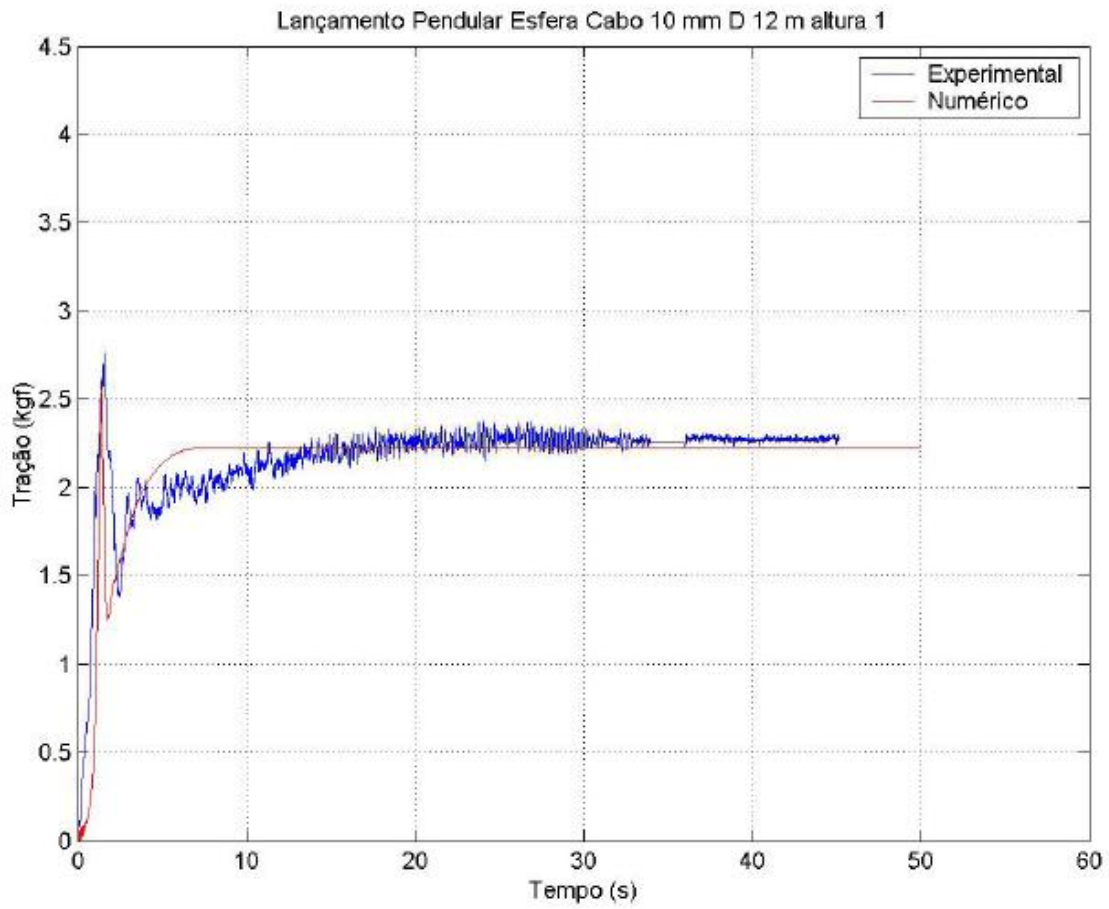


Figura 3.3d – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 10mm.

A Figura 3.3e mostra a tração na torre para o cabo de 10 mm com  $C_d$  0,25. Observa-se que o pico de tração no início do lançamento da esfera, obtido através do *ORCAFLEX*, aumentou em aproximadamente 30% quando comparado com a Figura 3.3d, onde o  $C_d$  do cabo utilizado é de 1,19. Novamente, se verifica que o coeficiente de arrasto do cabo é um parâmetro de grande importância para lançamentos pendulares realizados sem a utilização de flutuadores, onde o pico de tração inicial é mais acentuado.



**Figura 3.3e – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 10mm – Cd 0,25.**

A Figura 3.3f apresenta uma comparação da tração na torre para diferentes distâncias do ponto de fixação, 9 e 11,5 metros, respectivamente. Observa-se que a tração efetiva máxima inicial ocorre para uma distância de lançamento menor, devida a queda livre mais acentuada.

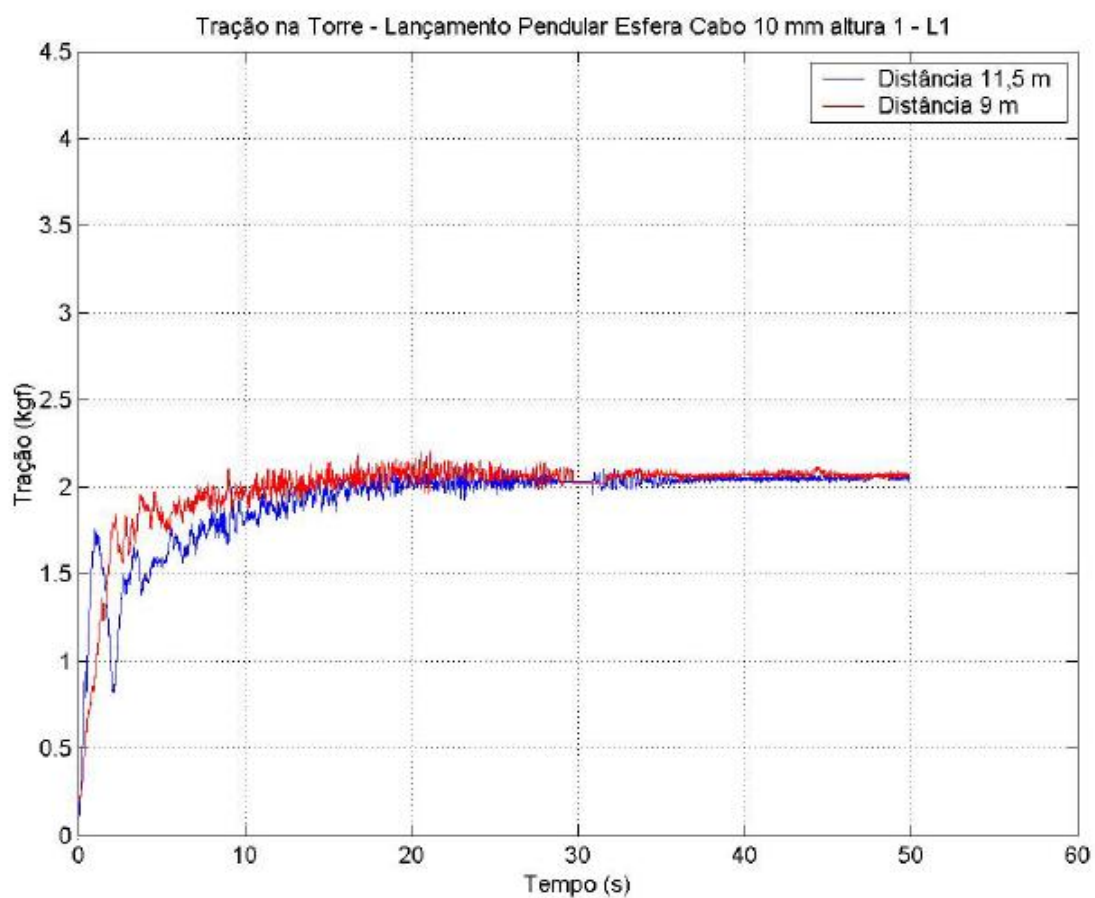


Figura 3.3f – Tração na torre para diferentes distâncias de lançamento.



### 3.3.1.4 CABO 20MM

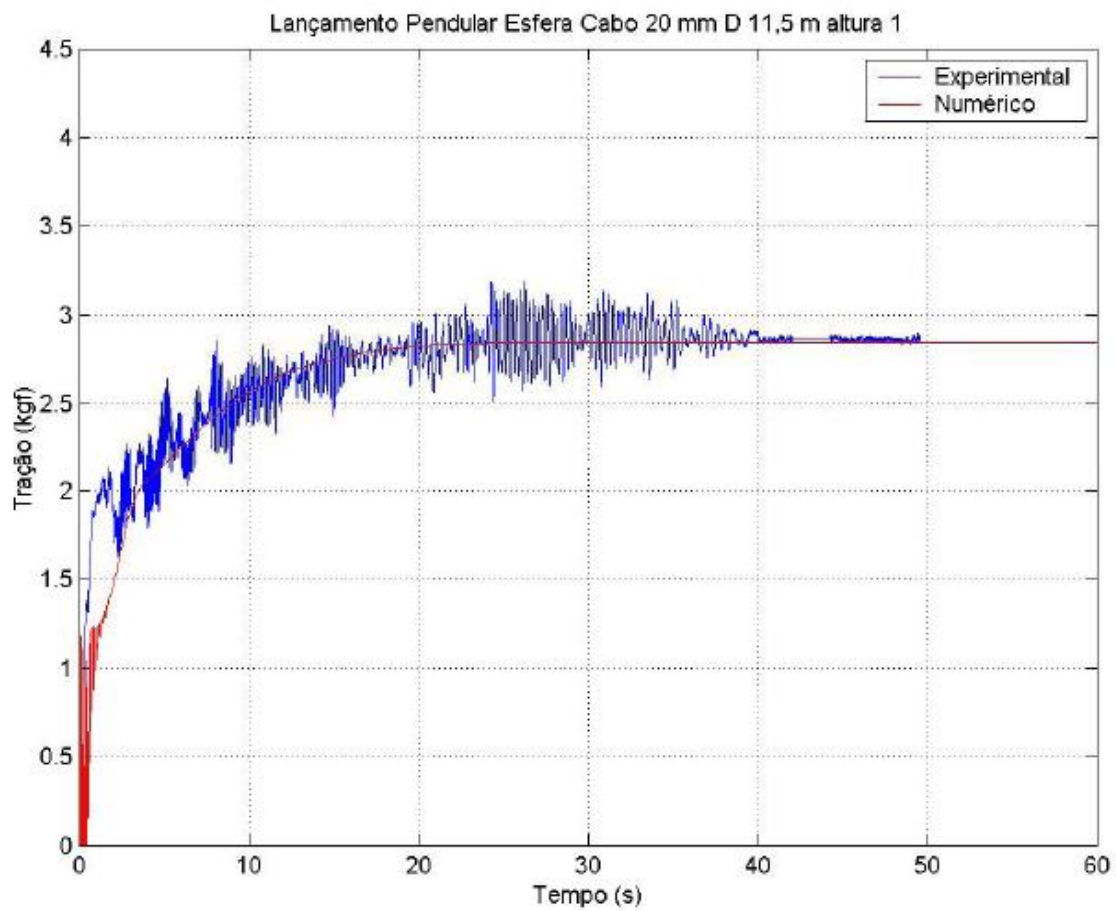


Figura 3.3g – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 20mm.

### 3.3.1.5 CABO 25MM

A Figura 3.3h apresenta as curvas de tração para o cabo de 25 mm de diâmetro. Comparando-se os resultados de tração apresentados até o momento, observa-se que à medida que se aumenta o diâmetro do cabo, menor é o pico de tração verificado no início do lançamento. Isto se deve a maior força de arrasto provocada com o aumento do diâmetro, que sustenta o cabo na água, diminuindo sua velocidade de descida e com isso tem-se um movimento amortecido.

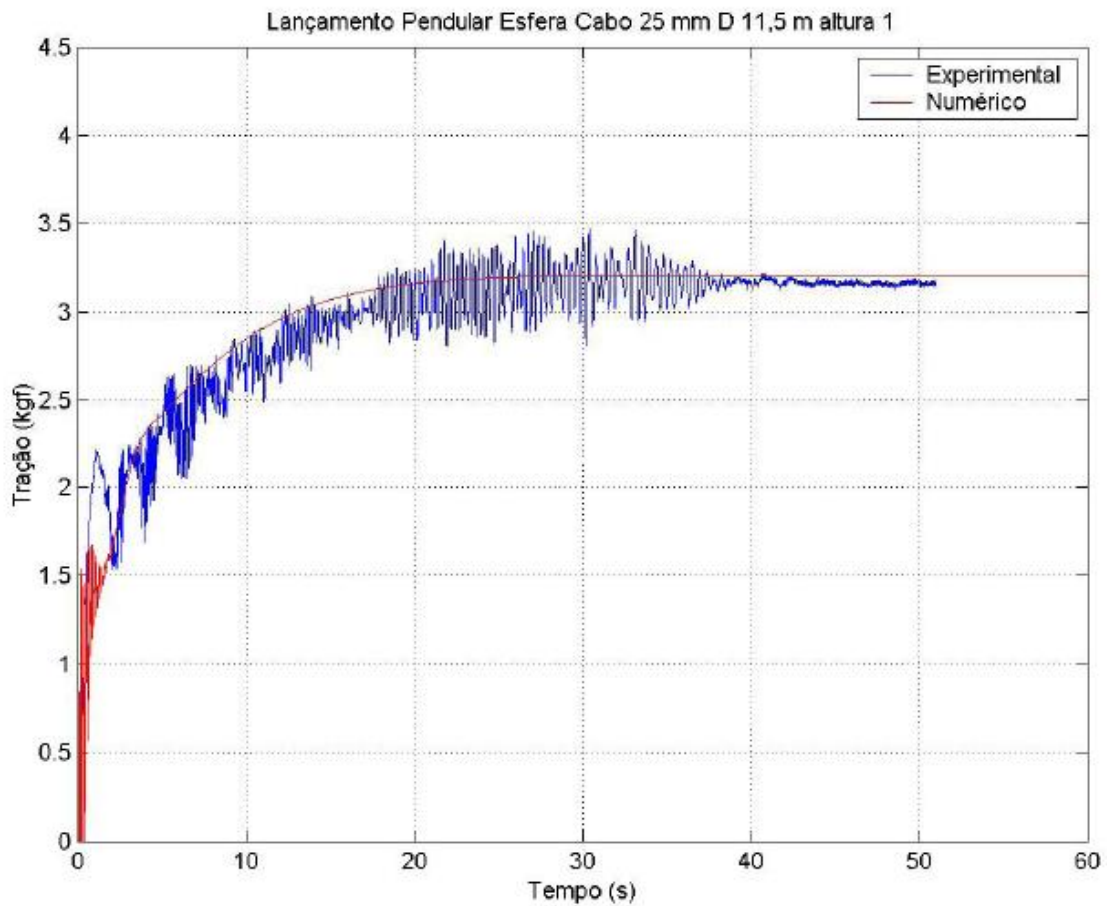


Figura 3.3h – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 25mm.

### 3.3.2 CAIXA DE ACRÍLICO

As Figuras 3.3i e 3.3j apresentam os sinais da célula de carga no lançamento da caixa com porosidade 0%, com medições da carga na torre e junto da placa triangular.

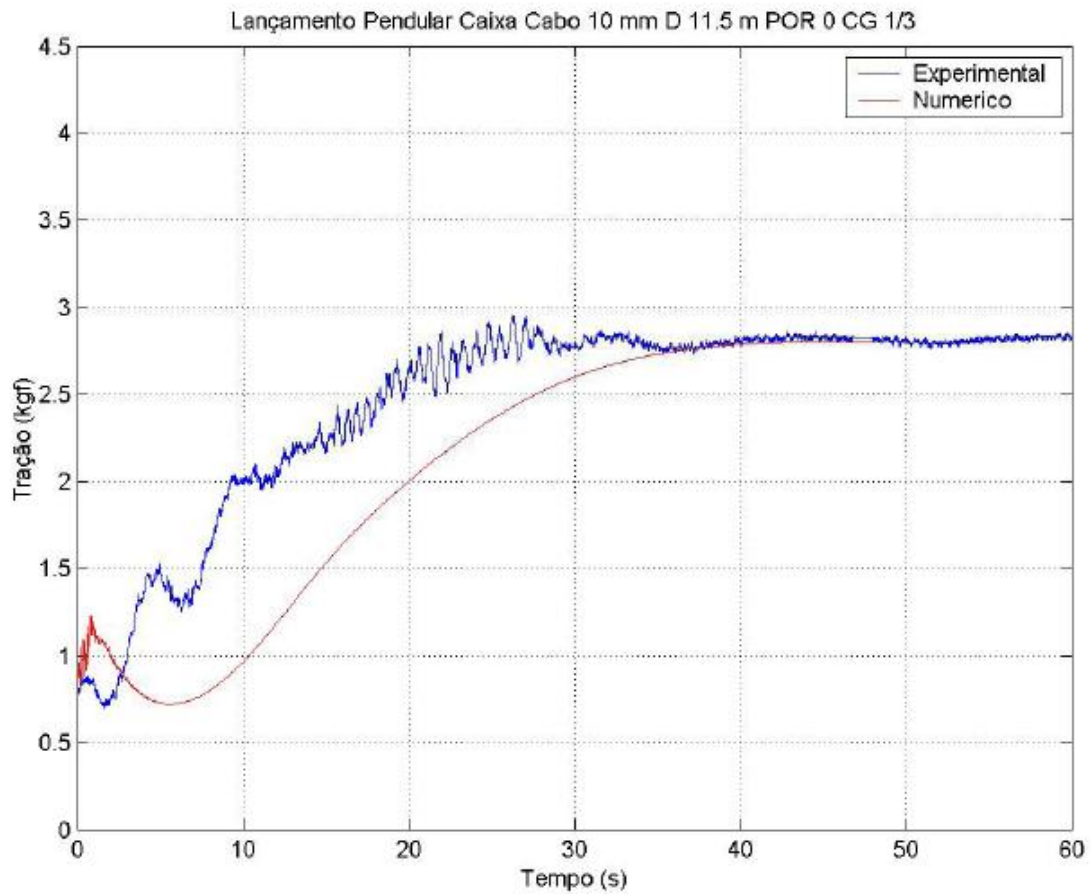
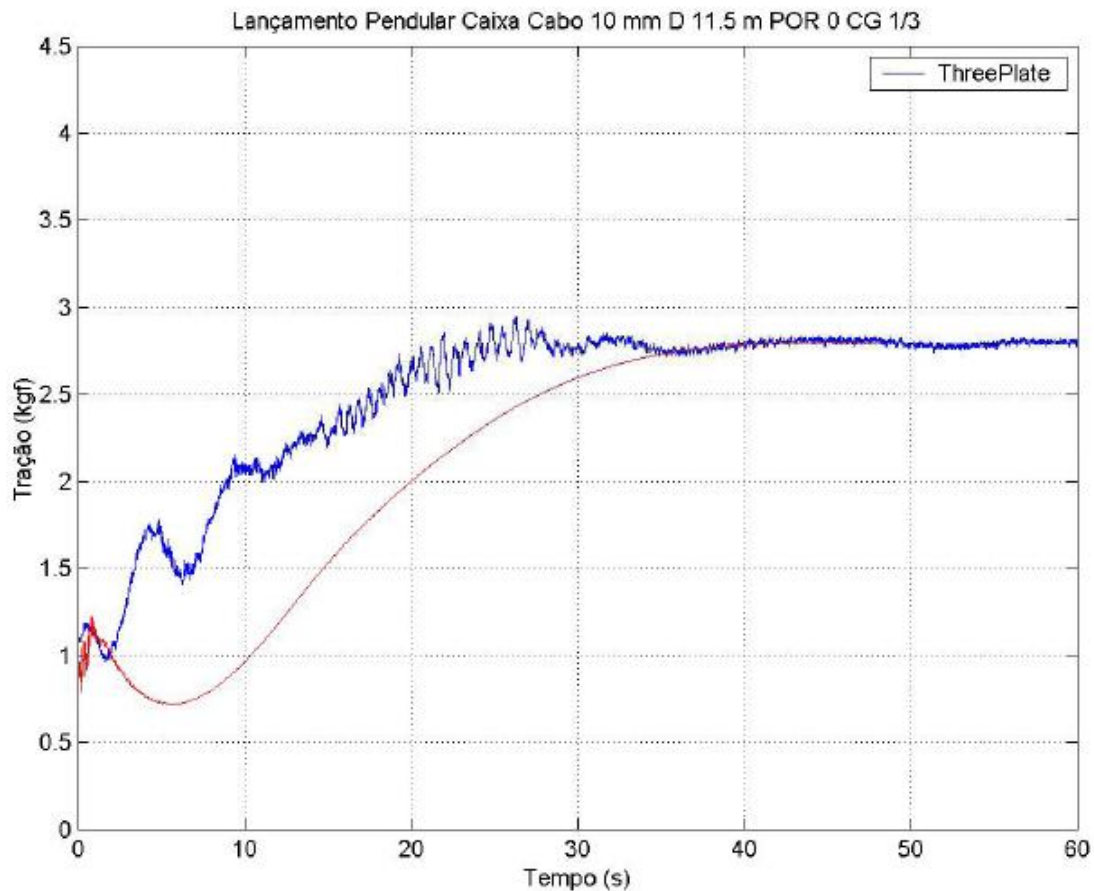


Figura 3.3i – Tração verificada na torre durante o lançamento pendular com cabo 10mm.



**Figura 3.3j – Tração verificada na placa triangular no lançamento pendular com cabo 10mm.**

Analisando as Figuras 3.3j e 3.3l, observa-se a grande influência do flutuador diminuindo os picos iniciais. Por outro lado, nota-se uma discrepância entre os resultados experimentais e as simulações via *ORCAFLEX*. As propriedades hidrodinâmicas para rotação da caixa foram calculadas, como sugerido pela (ORCINA, 2003), aproximando-se a caixa por um esferóide conforme sugerido em (NEWMAN, 1978). Desenvolvendo um estudo paramétrico tomando-se por base o coeficiente de massa adicional, obtiveram-se as curvas apresentadas nas Figuras 3.3l e 3.3m. Conclui-se que os parâmetros hidrodinâmicos relacionados à rotação são extremamente relevantes no lançamento pendular.

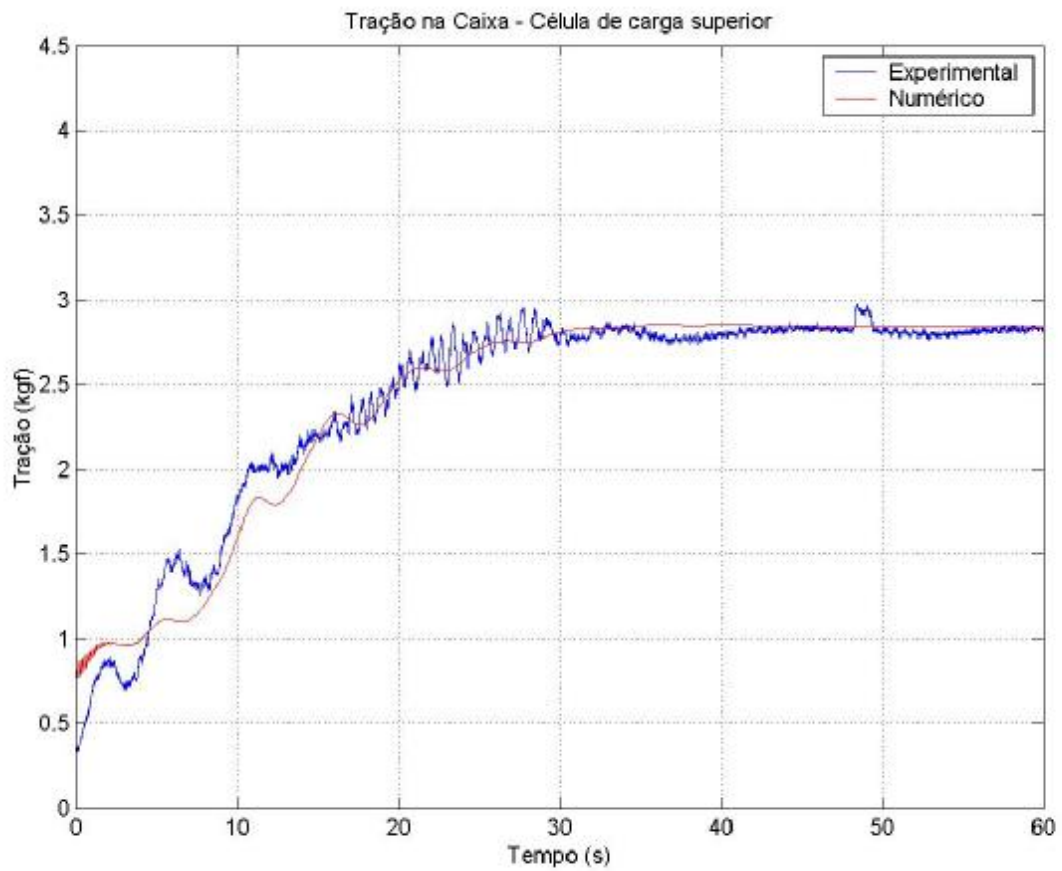
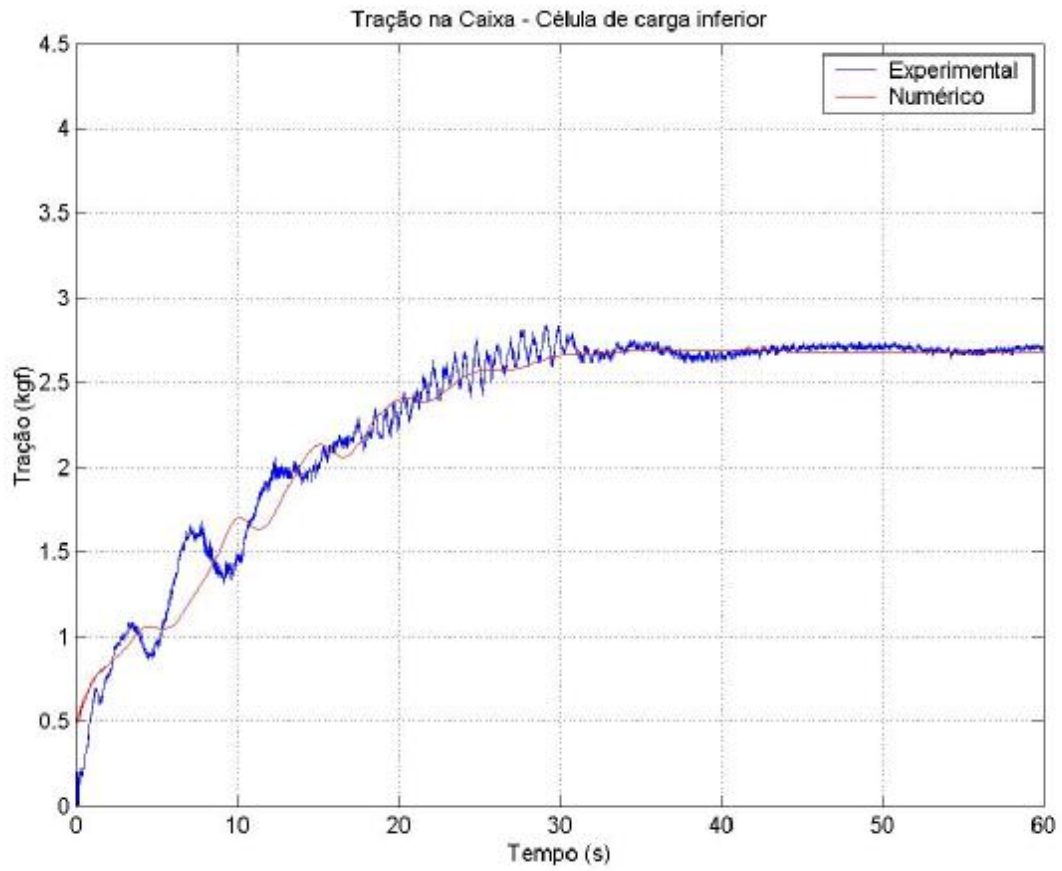
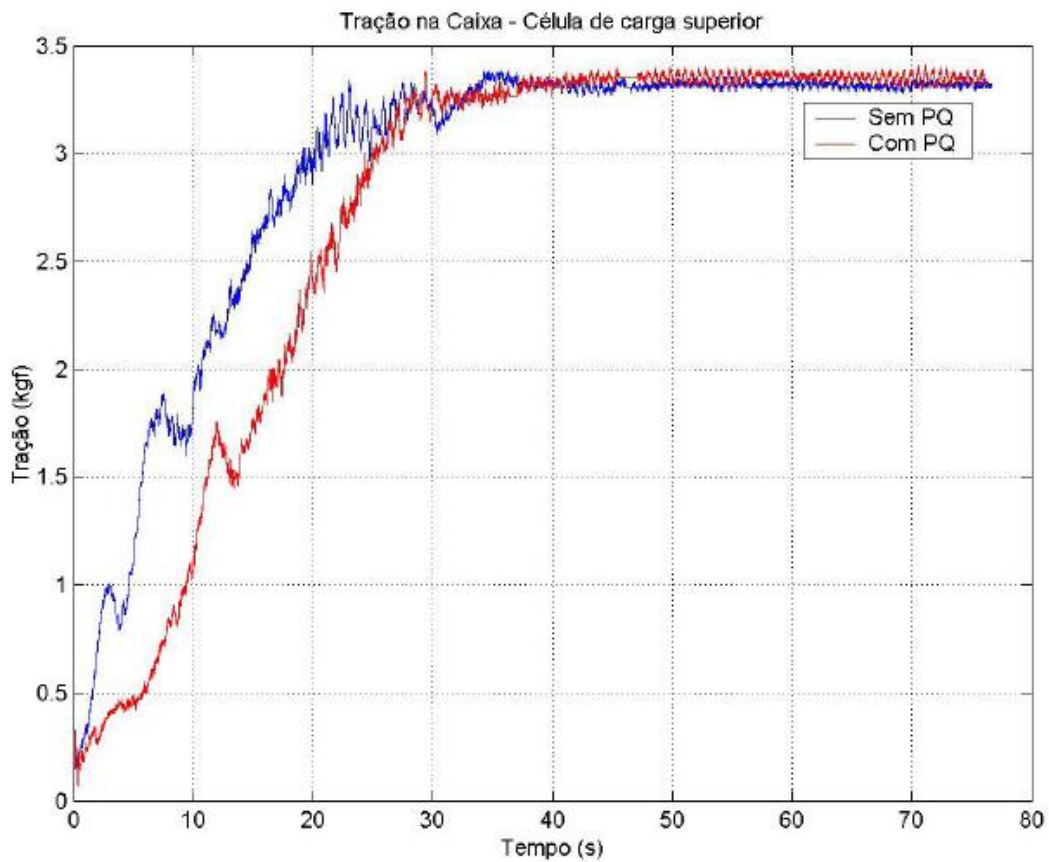


Figura 3.31 – Comparação da tração verificada na torre com o estudo paramétrico – cabo 10mm.

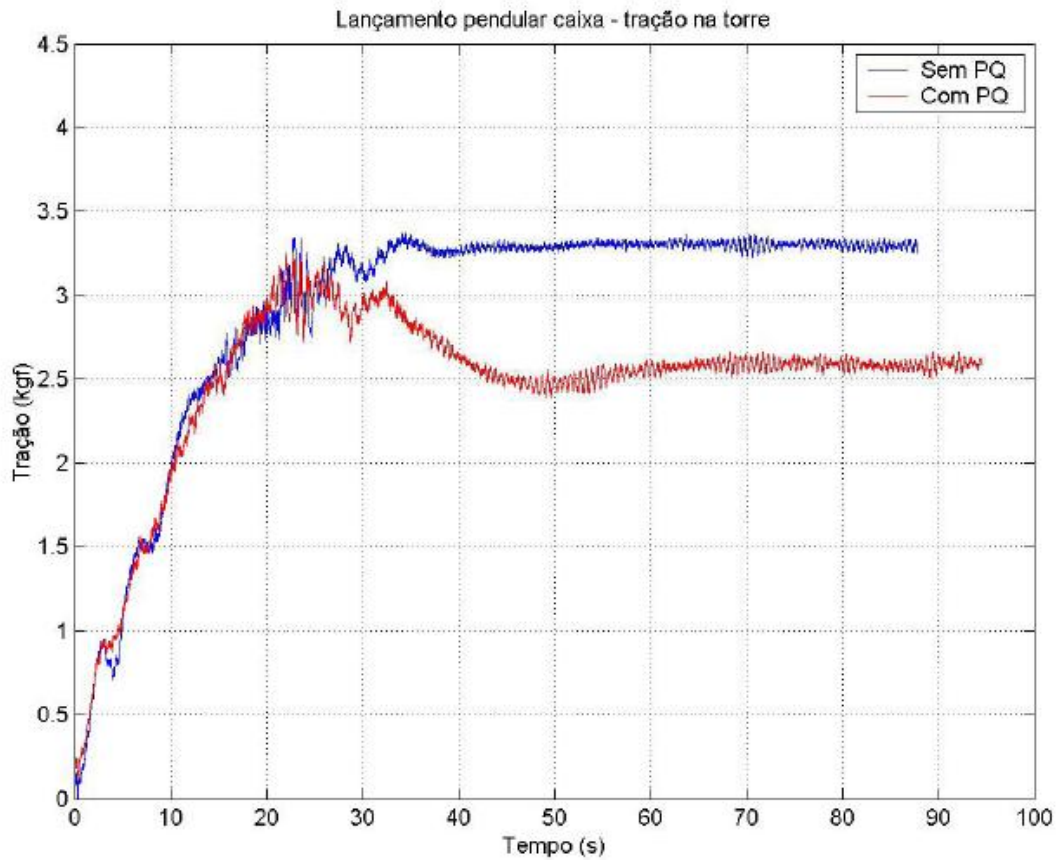


**Figura 3.3m – Comparação da tração verificada na placa triangular com o estudo paramétrico – cabo 10mm.**



**Figura 3.3n – Tração na torre para lançamento da caixa com e sem pára-quadras do tipo grade.**

A Figura 3.3n apresenta uma comparação da tração na torre para o lançamento pendular da caixa nas situações com e sem o uso de pára-quadras tipo grade. Observa-se, que a tração efetiva sofre poucas alterações em valores absolutos quando do lançamento do sólido com pára-quadras devido ao tipo de fixação do mesmo por meio da utilização de cabos de aço.

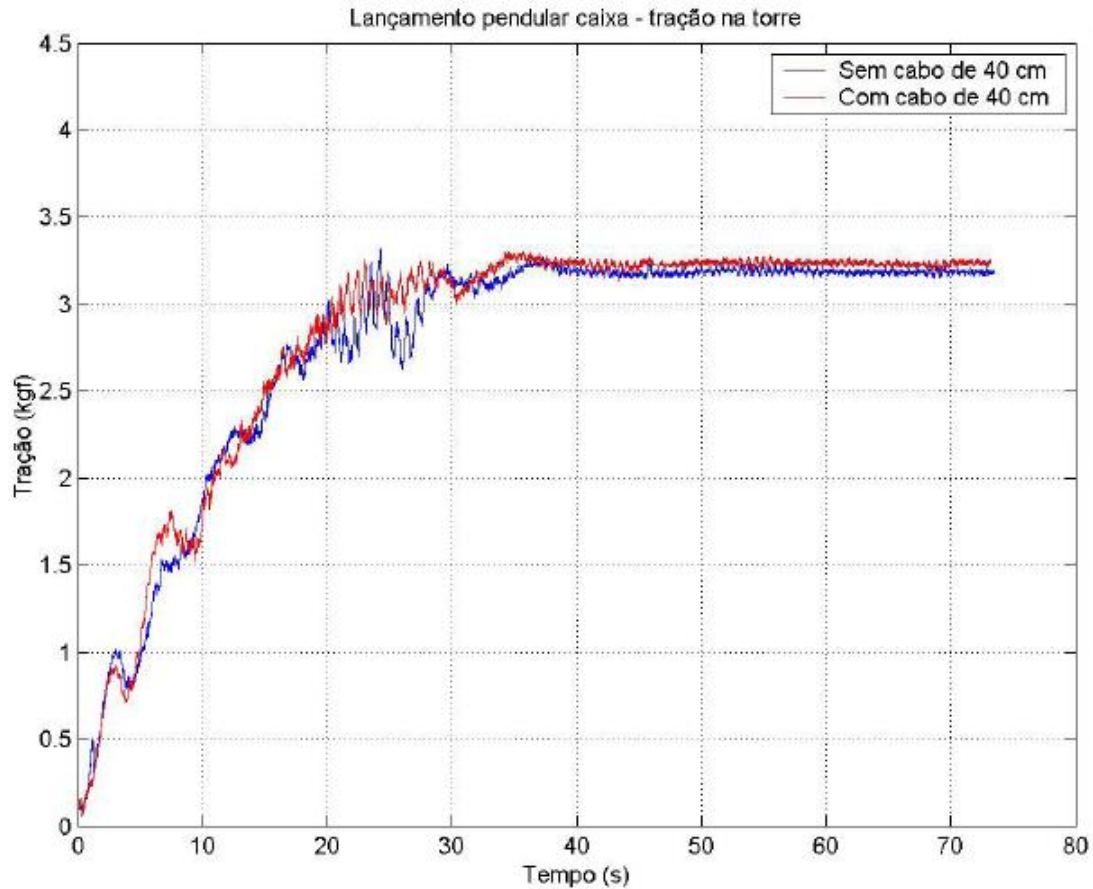


**Figura 3.3o – Tração na torre para lançamento da caixa com e sem pára-quadras do tipo prisma.**

A Figura 3.3o apresenta uma comparação da tração na torre para o lançamento pendular da caixa nas situações com e sem o uso de pára-quadras tipo prisma. Observa-se, que devido ao formato do pára-quadras tipo prisma, há uma elevação do coeficiente de arrasto do sistema, implicando em uma menor tração atuante no cabo.

O material utilizado na fabricação do pára-quadras apresenta uma leve flutuabilidade, fato este, explica a observação de oscilações de menores intensidades durante o lançamento e diferença no valor da tração estática final medida.





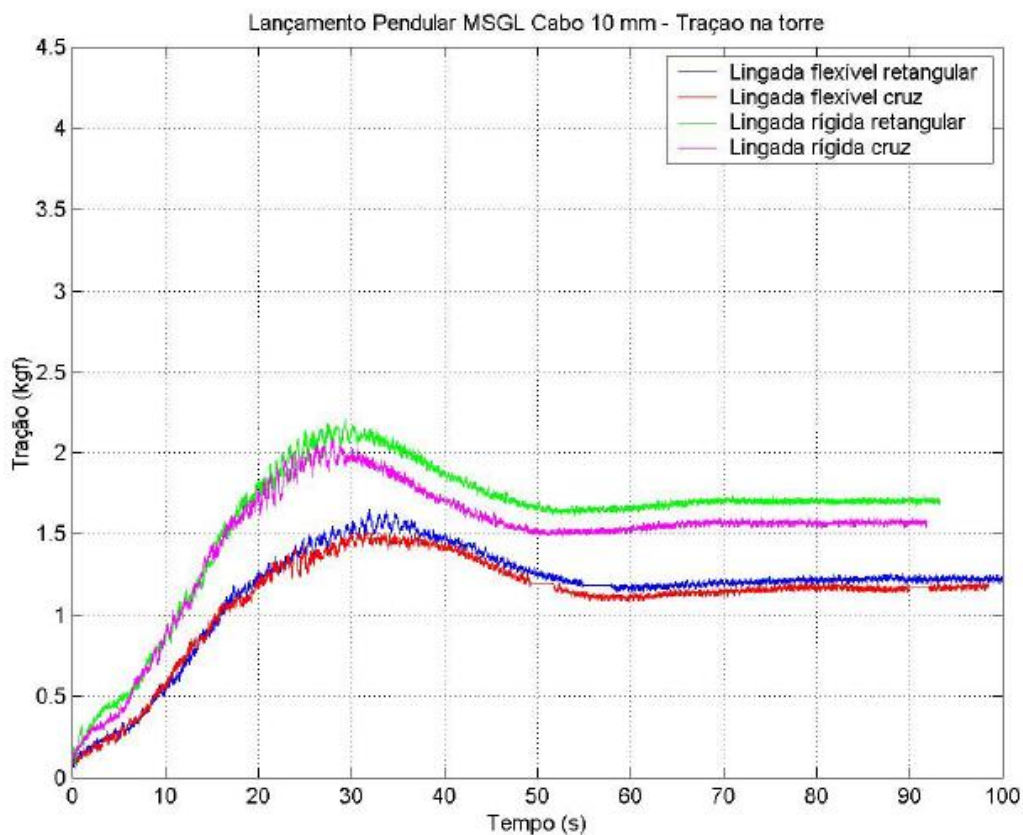
**Figura 3.3p – Tração na torre para lançamento da caixa com e sem cabo de 40 cm.**

A Figura 3.3p apresenta uma comparação da tração na torre para o lançamento pendular da caixa com e sem o uso de um cabo intermediário entre o ponto de içamento e a placas triangular. Não é observado um resultado de interesse na tração.

### **3.3.3 MSGL-RO-01**

As Figuras 3.3q e 3.3r apresentam a série temporal da tração na torre e na placa triangular respectivamente, para o lançamento pendular do manifold MSGL-RO-01. A Figura 3.3q mostra uma comparação para a tração na torre considerando os quatro tipos de lingadas ensaiadas. Verifica-se uma perfeita coerência dos resultados considerando-se os pesos e empuxos dos elementos do sistema. Confrontando-se as Figuras 3.3q e 3.3r, observa-se uma elevação da tração no primeiro gráfico, que registra a tração na torre. Simulando o ensaio no *ORCAFLEX* e utilizando o coeficiente de arrasto e de massa adicional obtidos através dos resultados do lançamento vertical, verificou-se uma

dificuldade na reprodução dos resultados experimentais. Mediante a este fato, optou-se pela realização de um estudo paramétrico das propriedades hidrodinâmicas dos manifold através do próprio *software ORCAFLEX*, a fim de verificar os parâmetros envolvidos na determinação da curva experimental.



**Figura 3.3q – Tração na torre para lançamento do MSGL-RO-01 para diferentes configurações de lingada de içamento.**

Mediante ao resultado do estudo paramétrico, pode-se associar este efeito a porosidade do modelo. Variando os valores de  $C_d$  e  $C_a$  é possível a reprodução similar deste gráfico. Ressalvo que neste trabalho os coeficientes de arrasto e de massa adicional foram obtidos através dos resultados de velocidades terminais (integrando-se os sinais dos acelerômetros) nos lançamentos verticais conforme exemplificado em (FERNANDES *et al.*, 2005b).

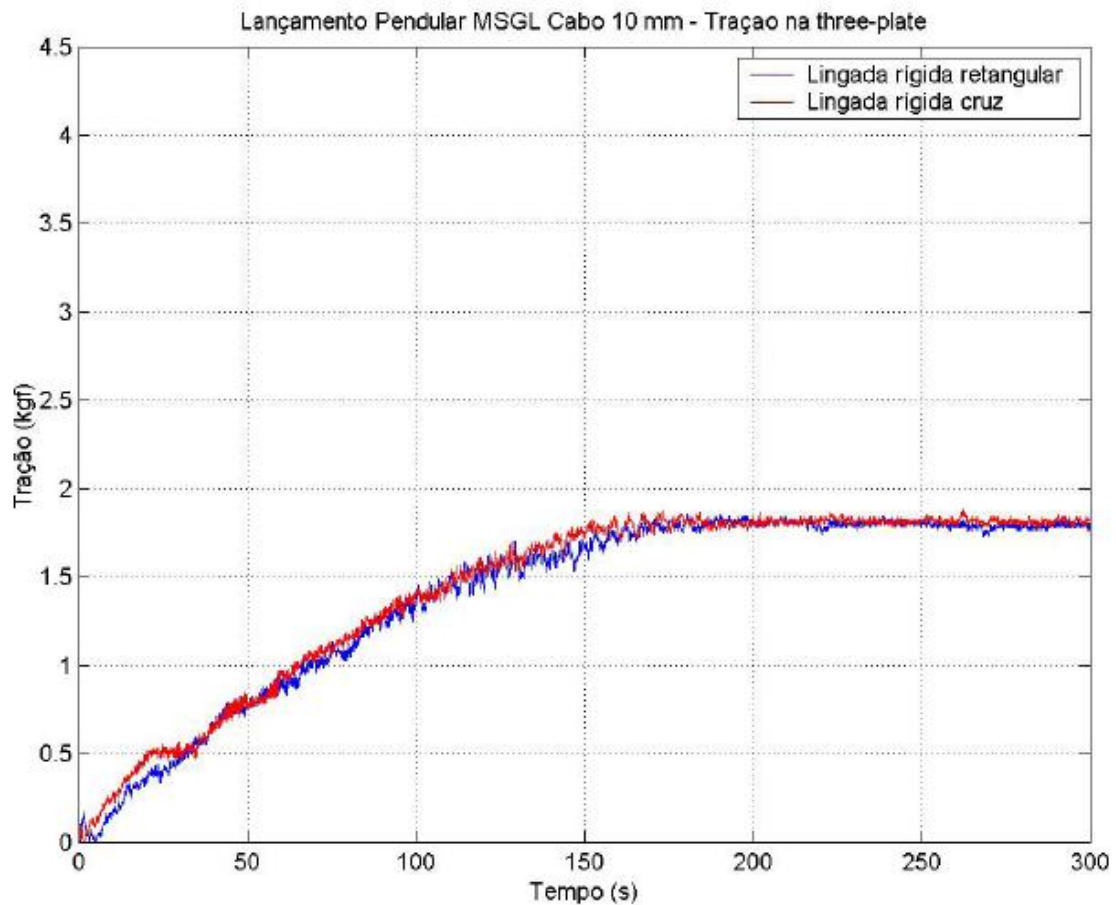


Figura 3.3r – Tração na placa triangular para lançamento do MSGL-RO-01 para diferentes configurações de lingada de içamento.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Através dos resultados de tração dos lançamentos pendulares, onde foram comparadas as trações obtidas experimentalmente e numericamente, verifica-se que foi alcançada uma boa concordância entre as curvas, principalmente porque os dados de entrada do *software* foram tomados baseados nos lançamentos verticais realizados.

Nas curvas de tração dos lançamentos pendulares da esfera, onde não há flutuadores, verifica-se um pico de tração inicial, devido à inércia do sistema. Esse pico de tração é crítico para menores diâmetros no cabo de sustentação. Para o cabo de 3 mm de diâmetro, por exemplo, esse pico é responsável por um máximo de tração 50%

superior ao patamar da curva. Esse pico é reduzido conforme se aumenta o diâmetro do cabo, devido ao maior arrasto provocado. Constata-se com isso a importância dos flutuadores, que contribuem para a redução destes picos para níveis de tração inferiores ao patamar da curva.

A existência desses picos de tração no início do lançamento explicitou uma limitação numérica, uma vez que essa subida acentuada na tração não foi detectada pelo *software ORCAFLEX*. Através de estudos paramétricos, verificou-se que o pico só era detectado para valores bem baixos de Cd. Para o cabo de 10 mm de diâmetro, por exemplo, o Cd conforme (HOERNER, 1958) é de 1,19. Entretanto, para conseguir com que o programa *ORCAFLEX* reproduza o pico, necessitou-se reduzir este coeficiente para 0,25. Para o caso de 3 mm, reduziu-se o Cd para 0,10. Isso indica que ou o algoritmo do *Orcafex* possui limitações para reproduzir o pico ou há necessidade de se levantar experimentalmente o coeficiente de arrasto para o cabo de poliéster nas situações encontradas no lançamento pendular. O fato de o cabo oscilar na própria esteira pode reduzir o Cd, embora não tanto.

Através dos resultados de tração apresentados para o lançamento pendular da caixa, percebe-se a importância das propriedades de rotação dos corpos não simétricos submetidos a lançamentos do tipo pendular. Apesar das propriedades de rotação não alterarem os níveis de tração do sistema, as mesmas causam mudanças na forma do gráfico conforme verificado em estudos paramétricos realizados.

Analisando-se as curvas de tração para o lançamento pendular da caixa com e sem a presença de pára-quedas, observa-se que este elemento não produziu alterações significantes na resposta do sistema, podendo o mesmo ser dispensado. Apesar de o pára-quedas tipo prisma reduzir um pouco o patamar da curva de tração, observa-se que o máximo da curva permaneceu o mesmo.

A caixa também foi lançada com um cabo de 40 cm, colocado entre o ponto de içamento e a placa triangular. Pelos resultados mostrados, verifica-se desnecessário o emprego de tal dispositivo.

Nos lançamentos pendulares do manifold, observou-se a existência de uma “saliência” considerável no sinal da tração, acima do patamar da curva. Pelo fato dessa saliência determinar o máximo da tração no projeto e também porque o programa *ORCAFLEX* não ter conseguido reproduzi-la, decidiu-se investigá-la de forma incisiva. Dessa forma, decidiu-se por realizar uma análise paramétrica em relação aos

coeficientes de massa adicional nas direções dos eixos Y e Z. Os resultados obtidos foram qualitativos e apontam o efeito da porosidade no manifold no gráfico de tração.

É importante deixar registrada a observação de que a posição estável do manifold durante a sua trajetória pendular é paralela ao seu próprio eixo Y devido às propriedades de estabilidade direcional.

## CAPÍTULO IV – ENSAIOS DE LANÇAMENTO PENDULAR MSGL-RO-02

Os ensaios experimentais descritos neste Capítulo 4, foram realizados no tanque oceânico do LabOceano e consistiram na simulação experimental em escala reduzida do procedimento de instalação do manifold MSGL-RO-02 baseado nas conclusões apresentadas no Capítulo 3.

### 4.1 MODELOS REDUZIDOS E INSTRUMENTAÇÃO

#### 4.1.1 MSGL-RO-02

Foram construídos modelos em diferentes escalas do MSGL-RO-02 conforme Figura 4.1a. Os principais elementos estruturais e equipamentos residentes no manifold também foram representados em escala, de forma a se obter um comportamento hidrodinâmico semelhante entre o manifold real e os modelos conforme ilustrado na Figura 4.1b.

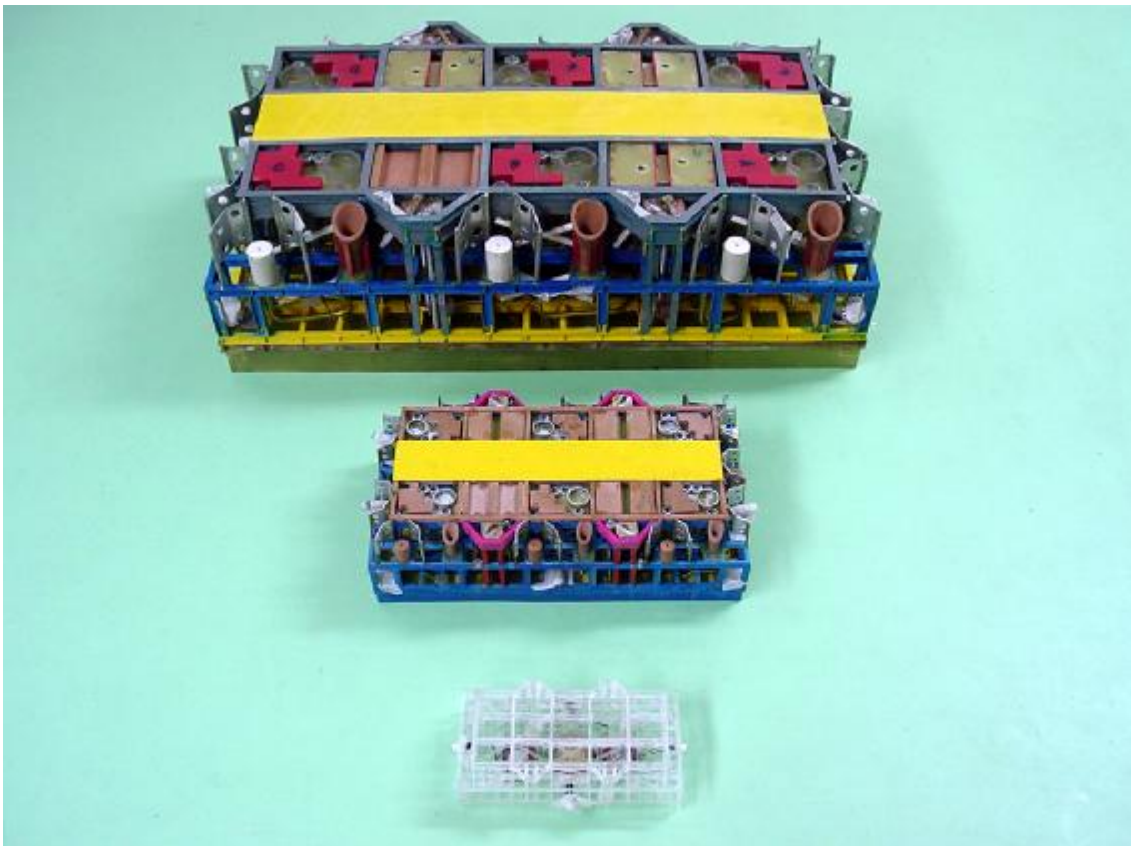
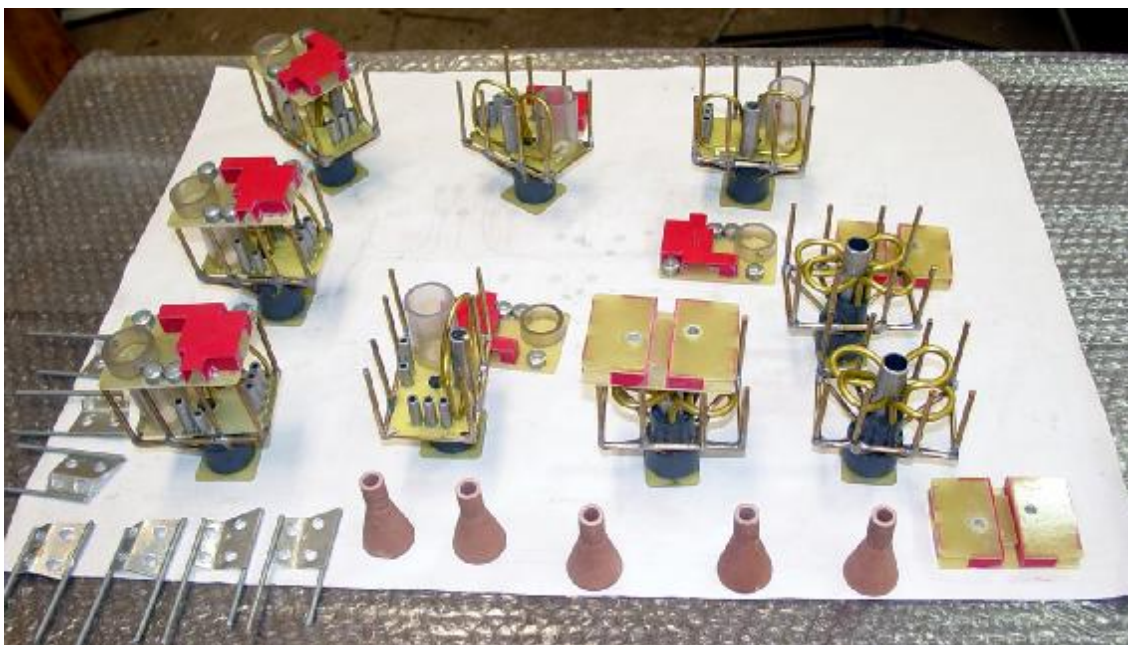


Figura 4.1a – Modelos reduzidos do MSGL-RO-02 nas seguintes escalas: 1:35 (no alto), 1:75 (no meio) e 1:135 (em baixo).



**Figura 4.1b – Detalhamento dos módulos de produção do manifold MSGL-RO-02 na escala 1:35.**

#### **4.1.2 LINHAS**

Os modelos foram projetados de acordo com a análise dimensional realizada conforme (NEVES, 2005). Os cabos de poliéster foram fornecidos pela Cordoaria São Leopoldo - CSL.

Os cabos são analisados através de dois tipos de modelagem. Uma modelagem linear, isto é adotando semelhança geométrica, e uma modelagem distorcida (Distorção do Cd). No caso linear, a relação com a escala real é através da igualdade do número de Froude. Este número identifica a relação entre esforços inerciais e esforços gravitacionais. No caso do modelo distorcido, adota-se a distorção no diâmetro dos cabos e dos flutuadores de tal modo a manter a relação adicional entre esforços viscosos e esforços gravitacionais.

Em ambos os casos, os subsistemas que não foram levados em conta na análise dimensional serão dimensionados na escala de Froude.

Os trechos de amarra foram construídos no LabOceano, e seus pesos submersos foram corrigidos através da colocação de lastros de chumbo nos elos.



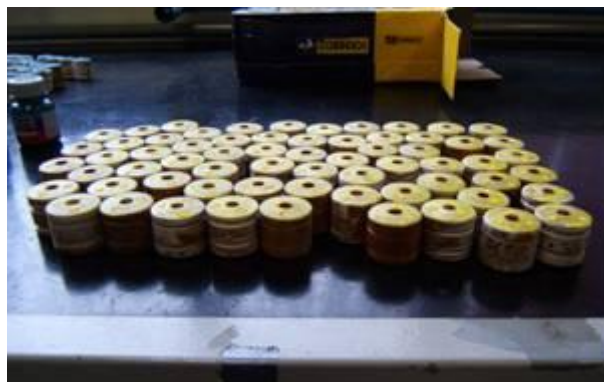
**Figura 4.1c – Linha de lançamento - escala 1:35.**

### **4.1.3 FLUTUADORES E BOMBONAS**

Os flutuadores também obedecem à análise dimensional de (NEVES, 2005).



**Figura 4.1d – Flutuadores distorcidos – escala 1:35.**



**Figura 4.1e – Flutuadores lineares – escala 1:35.**





Figura 4.1f – Bombonas com 5 tf de empuxo líquido – escala 1:35.

#### 4.1.4 INSTRUMENTAÇÃO

A seguinte instrumentação foi utilizada:

- ü 02 Células de carga com capacidades para 7kgf e 0.5 kgf.
- ü 04 acelerômetros biaxiais
- ü 3 rate-gyro;
- ü 08 câmeras de vídeo para o registro do deslocamento do modelo do manifold;
- ü 18 LEDs para o sistema de medição de movimento por imagem
- ü 01 câmera de vídeo para registro dos lançamentos qualitativos;

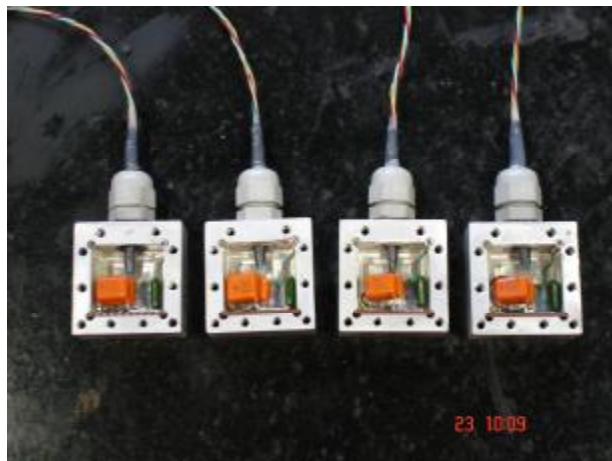
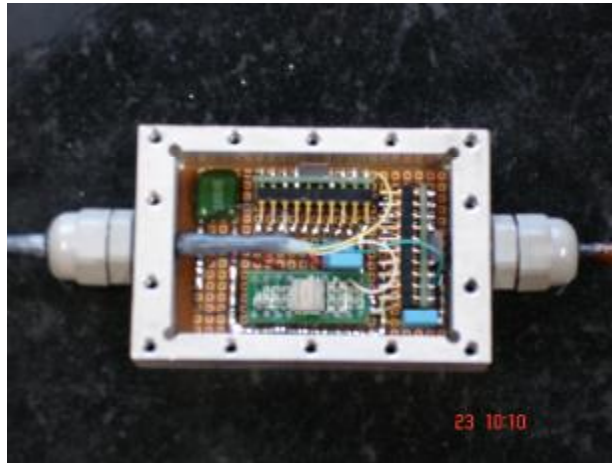
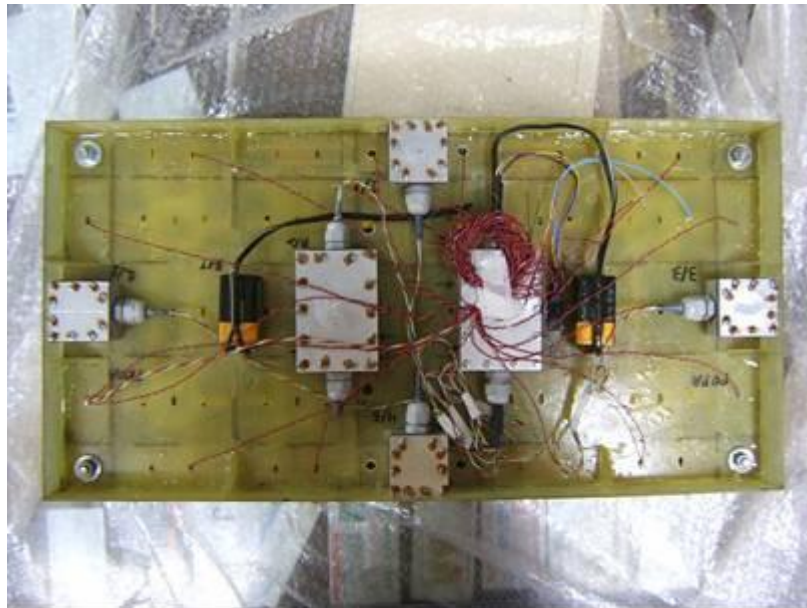


Figura 4.1g – Acelerômetros bidirecionais.



**Figura 4.1h – Rate-gyro.**



**Figura 4.1i – Instrumentação montada no modelo MSGL-RO-02 – escala 1:35.**

## **4.2 MATRIZ DE ENSAIOS**

No ensaio do lançamento pendular, foram realizadas trinta e uma configurações como pode ser visto na Tabela 4.1, sendo realizado no mínimo dois lançamentos para cada configuração de forma a obter uma consistência dos resultados experimentais.

**Tabela 4.1 – Matriz de ensaio MSGL-RO-02.**

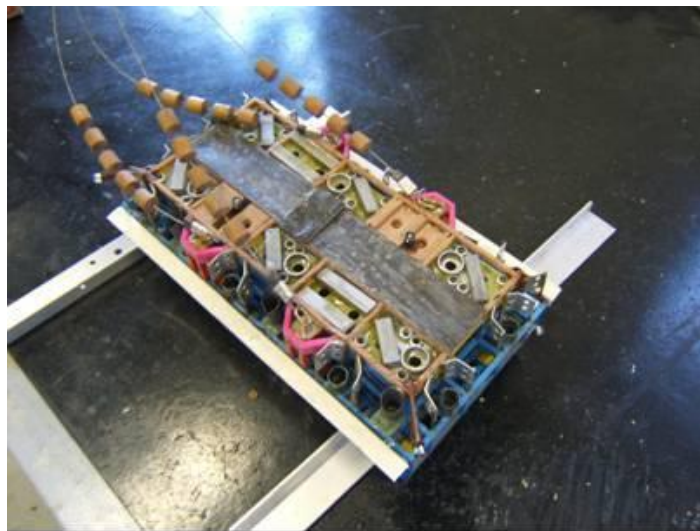
ENSAIO	REPETIÇÕES	NOME	TIPO	ESCALA	PONTO		TIPO DE CABO	CABO N.	ESTABILIZADOR
					DE ANCORAGEM	FINAL			
1	4	P70C2D1	P E N D U L A R E S M O N T A G E M	70	P3	1900	distorcido	8	-
2	4	P70C2D1B1		70	P3	1900	distorcido	8	bombonas 5 tf
3	3	P70C2D1B2		70	P3	1900	distorcido	8	bombonas 10 tf
4	2	P70C2D1B3		70	P3	1900	distorcido	8	bombonas 20 tf
5	3	P70C2D1F		70	P3	1900	distorcido	8	furos na sub base
6	3	P70C2D1B2F		70	P3	1900	distorcido	8	bombonas 10 tf + furos na sub base
7	2	P35C2D1		35	P1	1900	distorcido	2	-
8	3	P35C2D1F		35	P1	1900	distorcido	2	furos na sub base
10	4	P70C2D1A		70	P3	1900	distorcido	8	asas laterais
11	4	P70C2D1A2		70	P3	1900	distorcido	8	abas completas
12	3	P70C2ID1B4A2		70	P3	1900	distorcido	8	cabo invertido 10 tf + abas completas
13	3	P70C2ID1B4		70	P3	1900	distorcido	8	cabo invertido 10 tf
14	4	P35C1D1		35	P1	1900	linear	1	-
15	4	P35C1ID1B4		35	P1	1900	linear	1	cabo invertido 10 tf
16	4	P70C2ID1LB5		70	P3	1900	distorcido	8	lona lateral + cabo invertido 5 tf
17	3	P70C2ID1B5A3		70	P3	1900	distorcido	8	abas porosas + cabo invertido 5 tf
18	4	P35C1ID1B5		35	P1	1900	linear	1	cabo invertido 5tf
19	4	P35C1D2		35	P2	1022	linear	3	-
20	4	P35C1ID2B4		35	P2	1022	linear	3	cabo invertido 10 tf
21	5	P35C1ID3B4		35	P6	511	linear	5	cabo invertido 10 tf
22	5	P35C2D1		35	P1	1900	distorcido	2	-
23	4	P35C2ID1B5		35	P1	1900	distorcido	2	cabo invertido 5tf
24	4	P35C2ID1B4		35	P1	1900	distorcido	2	cabo invertido 10 tf
25	4	P35C1D1F2		35	P1	1900	linear	1	furos de projeto na sub base
26	4	P35C1ID1F2B5		35	P1	1900	linear	1	furos de projeto na sub base + cabo invertido 5tf
27	4	P35C1ID1B5		35	P1	1900	linear	1	cabo invertido 5tf
28	4	P35C2D2		35	P2	1022	distorcido	4	-
29	4	P35C2ID2B4		35	P2	1022	distorcido	4	cabo invertido 10 tf
30	4	P35C2ID3B4		35	P6	511	distorcido	6	cabo invertido 10 tf
31	4	P70C2ID1L2B5		70	P3	1900	distorcido	8	lonas centrais + cabo invertido 5 tf
32	4	V35Z		VERTICAIS	35	P10	-	-	-
33	4	V35X	VERTICAIS	35	P10	-	-	-	-
34	3	V35Y	VERTICAIS	35	P10	-	-	-	-

**Tabela 4.2 – Legenda para a matriz de ensaio do MSGL-RO-02.**

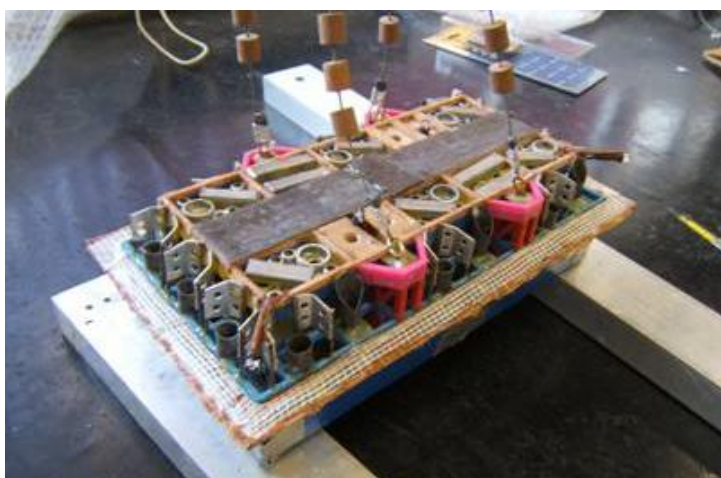
P ou V	Lançamento Pendular ou Vertical
35 ou 70	Escala do modelo (1:35 ou 1:70)
C1 ou C2	Cabos lineares (C1) ou distorcidos (C2)
I	Inversão do cabo de lançamento
D1 ou D2 ou D3	Profundidades de 1900m (D1), 1022m (D2) ou 511m (D3)
B1 ou B2 ou B3	Bombonas auxiliares na lingada com 5, 10, ou 20tf (respectivamente)
B4 ou B5	Bombonas auxiliares na amarra intermediária, 10 e 5tf
F ou F2	Perfuração máxima (F1) ou de projeto (F2) na sub-base
A ou A2 ou A3	Abas laterais (A1) completas (A2) e porosas (A3)
L	Lonas laterais no Modelo

#### **4.2.1 MSGL-RO-02**

As Figuras 4.1j à 4.1r, a seguir, ilustram diferentes configurações ensaiadas conforme Tabela 4.1.



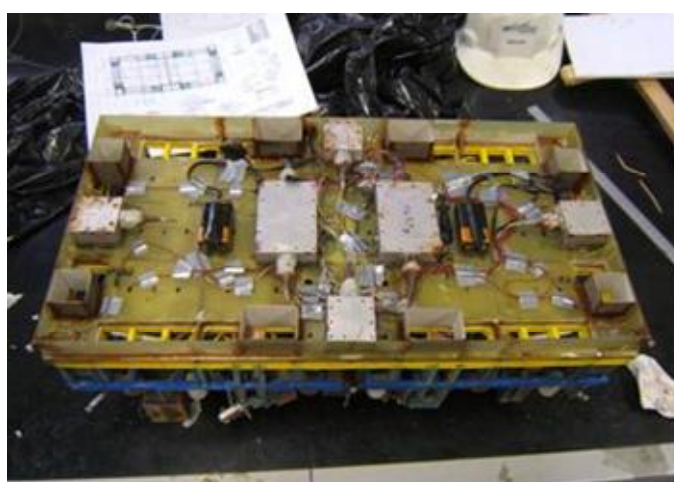
**Figura 4.1j – A1, abas laterais – escala 1:70.**



**Figura 4.1l – A3, abas porosas – escala 1:70.**



**Figura 4.1m – L, lonas laterais ou placas anti-porosidade – escala 1:70.**



**Figura 4.1n – F, furos na sub base (máximos) – escala 1:35.**



**Figura 4.1o – F2, furos na sub base (projeto alternativo) – escala 1:35.**



**Figura 4.1p – B1, bombona na lingada de sustentação (5 tf).**



**Figura 4.1q – B2, bombonas na lingada de sustentação (10 tf).**



**Figura 4.1r – B3, bombona localizadas nos pontos de içamento (20 tf).**

## **4.3 RESULTADOS**

### **4.3.1 LANÇAMENTO VERTICAL**

A discussão mais detalhada da obtenção dos coeficientes a partir do lançamento vertical está presente no Capítulo 2. O método de obtenção é feito a partir das séries temporais obtidas pelos ensaios verticais que são comparadas com a previsão decorrente de método analítico sugerido por (FERNANDES *et al.*, 2005a). A previsão analítica depende dos dados da massa adicional e do coeficiente de arrasto na velocidade terminal. Os coeficientes iterativamente são variados até que a previsão analítica tenha uma aproximação consistente com dados registrados no ensaio. Quando isso acontece, os coeficientes estão definidos.

Aqui, entretanto, não se usou esse processo iterativo e decidiu-se adotar um caminho mais pragmático, na medida em que os ensaios do IPT tanto de velocidade constante quanto de aceleração constante já tinha sido realizados e também devido à instabilidade da trajetória do lançamento vertical no LabOceano. Na verdade, durante esses últimos lançamentos, notou-se a oscilação excessiva a partir de certo instante da trajetória e para os casos dos lançamentos na direção  $X$  e  $Y$ , uma trajetória não vertical (observação de grandes planeios) conforme se pode observar em vídeos referentes aos ensaios 32, 33 e 34 da Tabela 4.1. De forma a evitar grandes oscilações na trajetória vertical no lançamento em  $Z$ , usou-se um lastro de chumbo de 3,2 kgf de modo a abaixar o centro de gravidade evitando assim as capotagens e as oscilações excessivas.



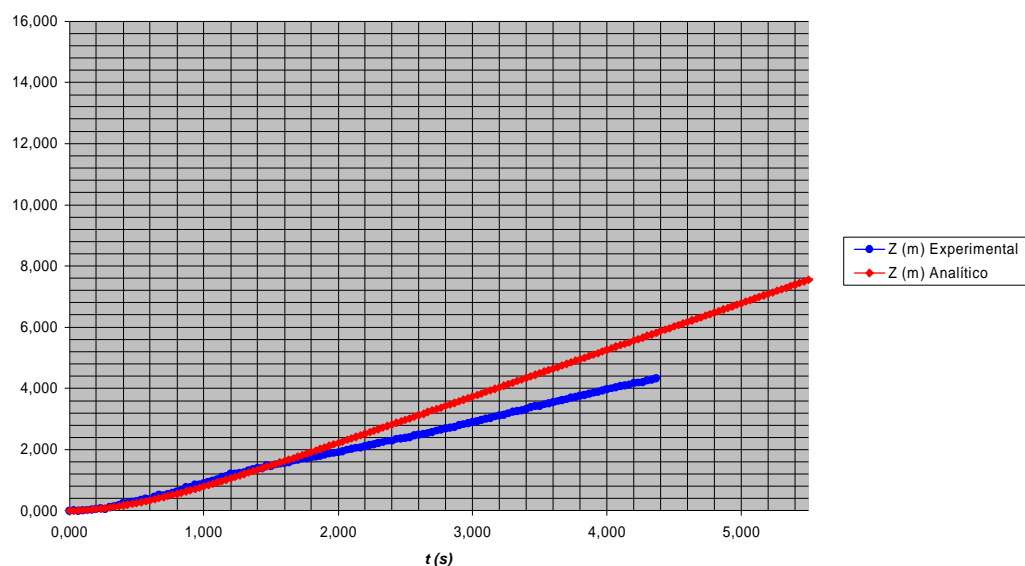
É importante notar que esse comportamento oscilatório (mas sem capotagem) foi reportado no caso dos lançamentos verticais nos ensaios do MSGL-RO-01, em (FERNANDES *et al.*, 2004). Esse peso de lastro foi colocado de modo a não interferir na forma do manifold. O mesmo cuidado deveria ter sido usado nos ensaios nas direções *X* e *Y* e algumas repetições na direção *Z* deveriam ter sido buscadas. Entretanto, não houve tempo hábil devido ao cronograma do LabOceano.

Assim, por esses motivos, decidiu-se exibir aqui as séries temporais (sem tratamento) dos registros das trajetórias medidas pelo sistema de vídeo em comparação com a previsão analítica com os coeficientes já reportados em (FERNANDES *et al.*, 2005c) e (FERNANDES *et al.*, 2005d). Os resultados e os coeficientes seguem abaixo.

A Figura 4.3a apresenta as curvas de deslocamento para o ensaio vertical com o manifold lançado na direção do seu eixo *X*, ensaio V35ZL4. A previsão analítica usou  $C_a$  igual a 1,24 e  $C_d$  igual a 1,23. Os valores de  $C_a$  e  $C_d$  são os mesmo dos ensaios com regime permanente.

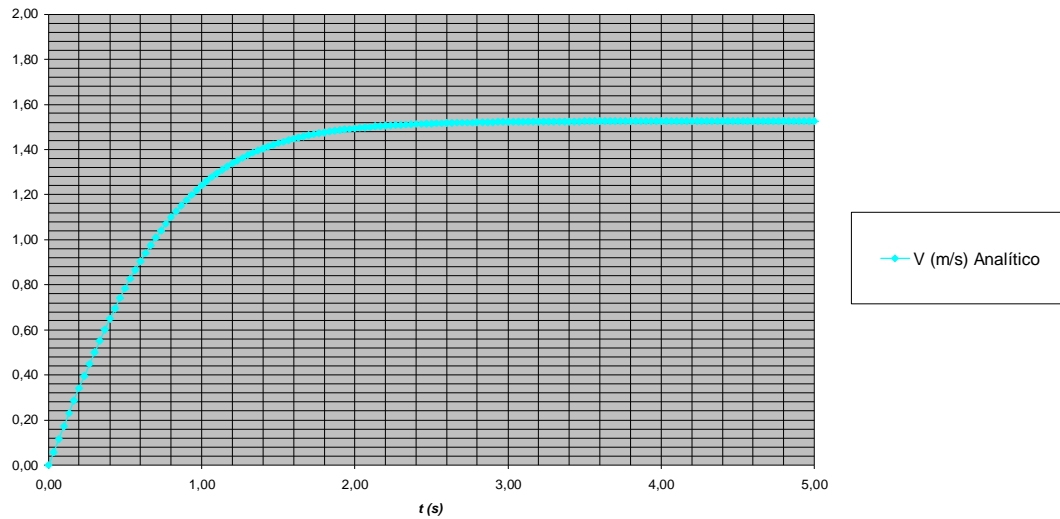
Note que o grande deslocamento lateral a partir de mais ou menos dois segundos, não permite melhor aderência nos instantes seguintes. A Figura 4.3b apresenta o resultado analítico com os coeficientes citados. Note que a velocidade terminal ocorre em torno de dois segundos e vale 1,51 m/s (modelo).

**Ensaio V35XL1 - Deslocamento em X**



**Figura 4.3a – Deslocamento do ensaio vertical no eixo X.**

*Ensaio V35XL1 - Velocidade em X*

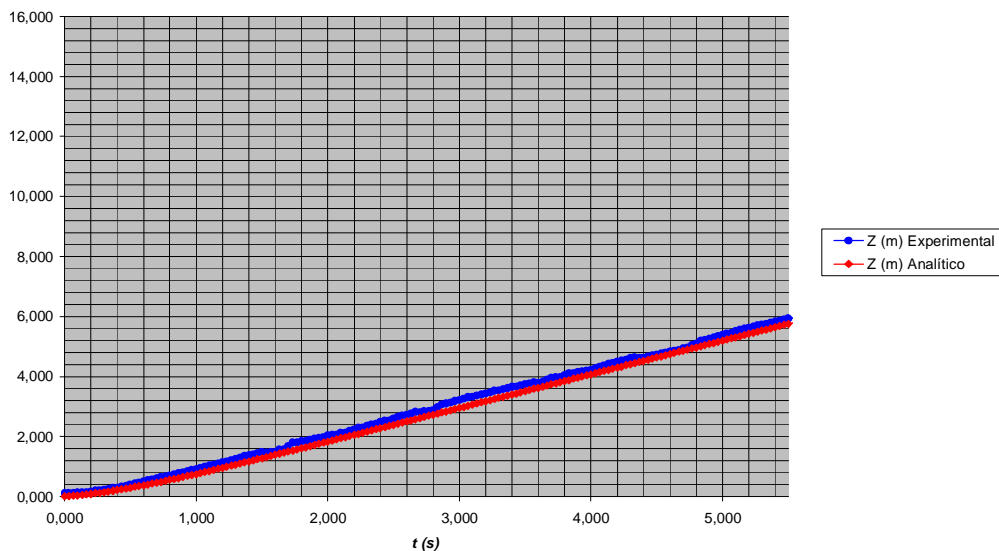


**Figura 4.3b – Velocidade do ensaio vertical no eixo X.**

A Figura 4.3c, de modo análogo, apresenta as curvas de deslocamento para o ensaio vertical com o manifold lançado na direção do seu eixo Y, V35ZL4. A previsão analítica assume  $C_a$  igual a 1,71 e  $C_d$  igual a 1,16. Esses coeficientes são para regime permanente.

A Figura 4.3d apresenta o resultado analítico com os coeficientes citados. Note que a velocidade terminal ocorre em torno de dois segundos e vale 1,11 m/s na escala do modelo.

*Ensaio V35YL2 - Deslocamento em Y*



**Figura 4.3c – Deslocamento do ensaio vertical no eixo Y.**

Ensaio V35YL2 - Velocidade em Y

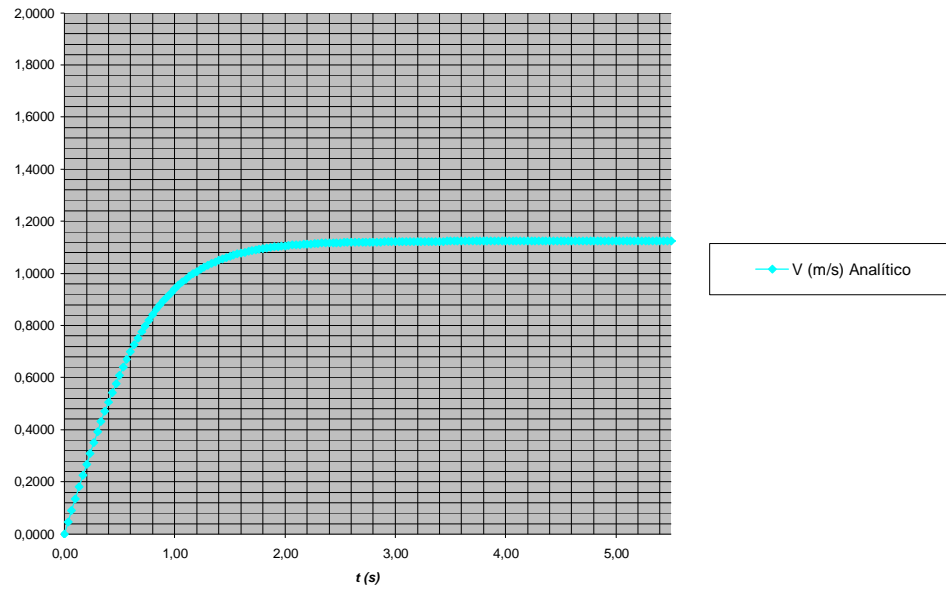


Figura 4.3d – Velocidade do ensaio vertical no eixo Y.

Finalmente, a Figura 4.3e apresenta a curva de deslocamento para o ensaio vertical com o manifold lançado na direção do seu eixo Z, V35ZL4. A previsão analítica tem  $C_a$  igual a 2,26 e  $C_d$  igual a 1,43. Os coeficientes são os mesmos dos casos em regime permanente. Note que a descontinuidade observada em torno de oito segundos corresponde à entrada em oscilação já citada.

Ensaio V35ZL4 - Deslocamento em Z

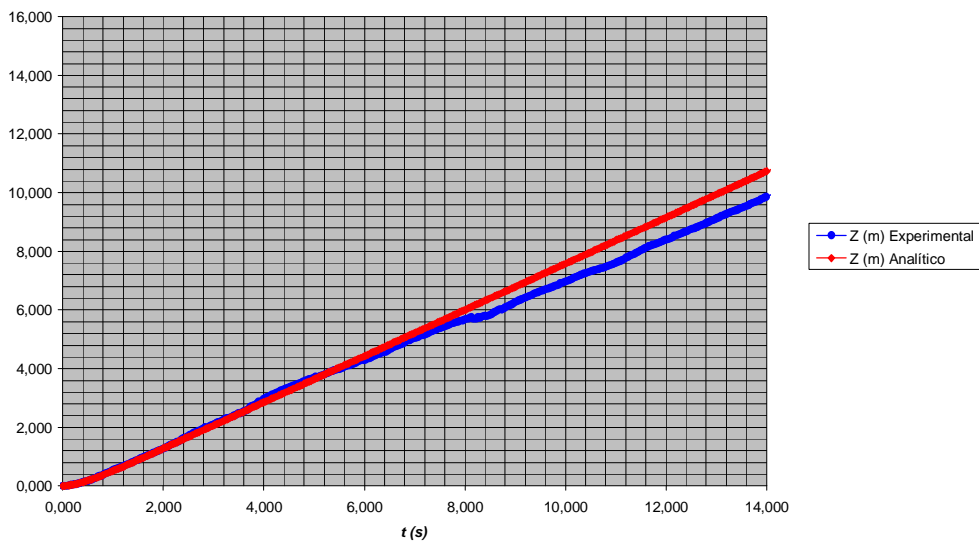
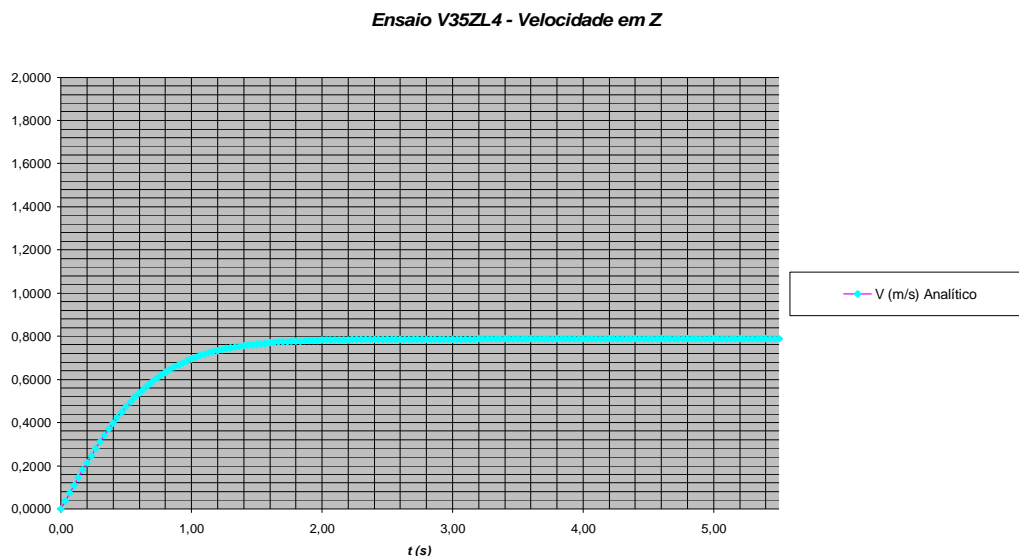


Figura 4.3e – Deslocamento do ensaio vertical no eixo Z.

A Figura 4.3f apresenta o resultado analítico com os coeficientes citados. Note que a velocidade terminal ocorre em torno de dois segundos e vale 0,78 m/s na escala do modelo.



**Figura 4.3f – Velocidade do ensaio vertical no eixo Z.**

O lançamento vertical, assim, produz resultado compatível com os resultados publicados em (FERNANDES *et al.*, 2005b) e (FERNANDES *et al.*, 2005d). Estes últimos resultados foram obtidos por ensaios com velocidade constante e aceleração constante no IPT e através do método da Teoria do Potencial usando o programa WAMIT conforme apresentado em (MINEIRO, 2006).

#### **4.3.2 ENSAIOS MSGL-RO-02 NA ESCALA 1:70**

No caso dos ensaios na escala 1:70, as observações foram essencialmente qualitativas e podem ser observadas através dos vídeos. Durante esses ensaios decidiu-se medir as trações que ilustram (quantitativamente) alguns comentários a seguir.

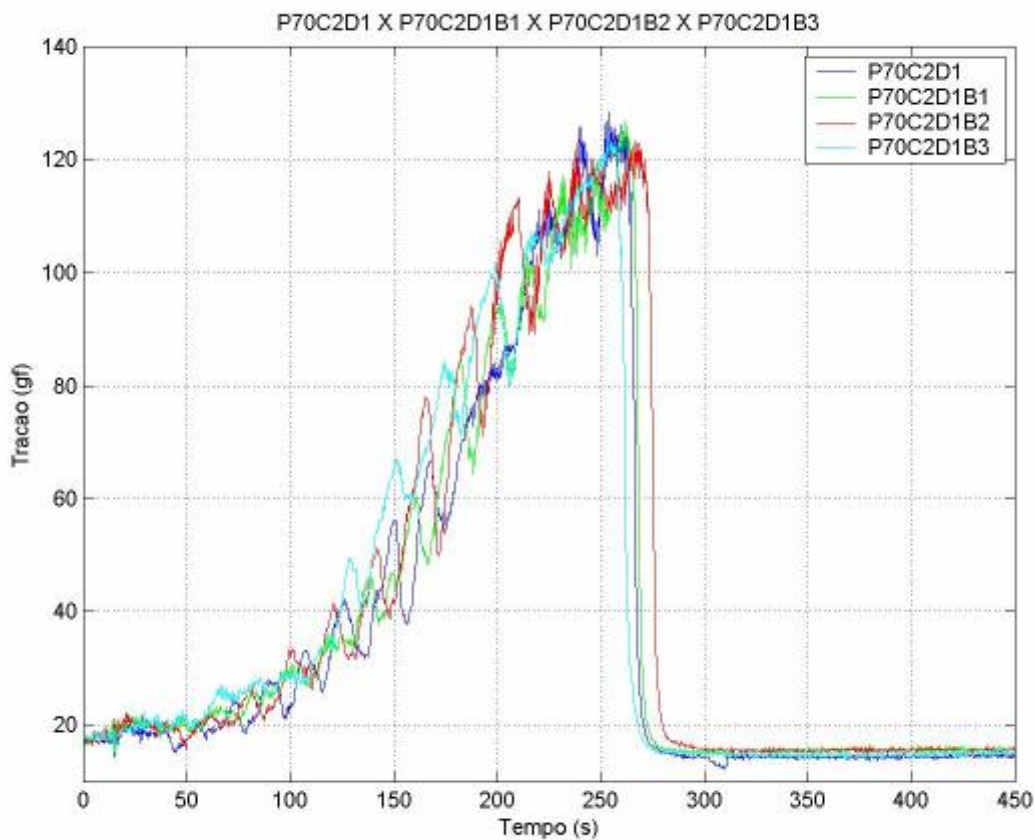
Para orientação, convém lembrar que se mostra que os assuntos investigados foram:

- i. Uso de bombonas na conexão intermediária entre os cabos.
- ii. Uso de abas laterais (ver Figura 4.1g).

- iii. Introdução de furos na sub-base (ver Figuras 4.1j e 4.1l).
- iv. Uso do cabo invertido.
- v. Uso de placas anti-porosidade ou lonas (ver Figura 4.1i).

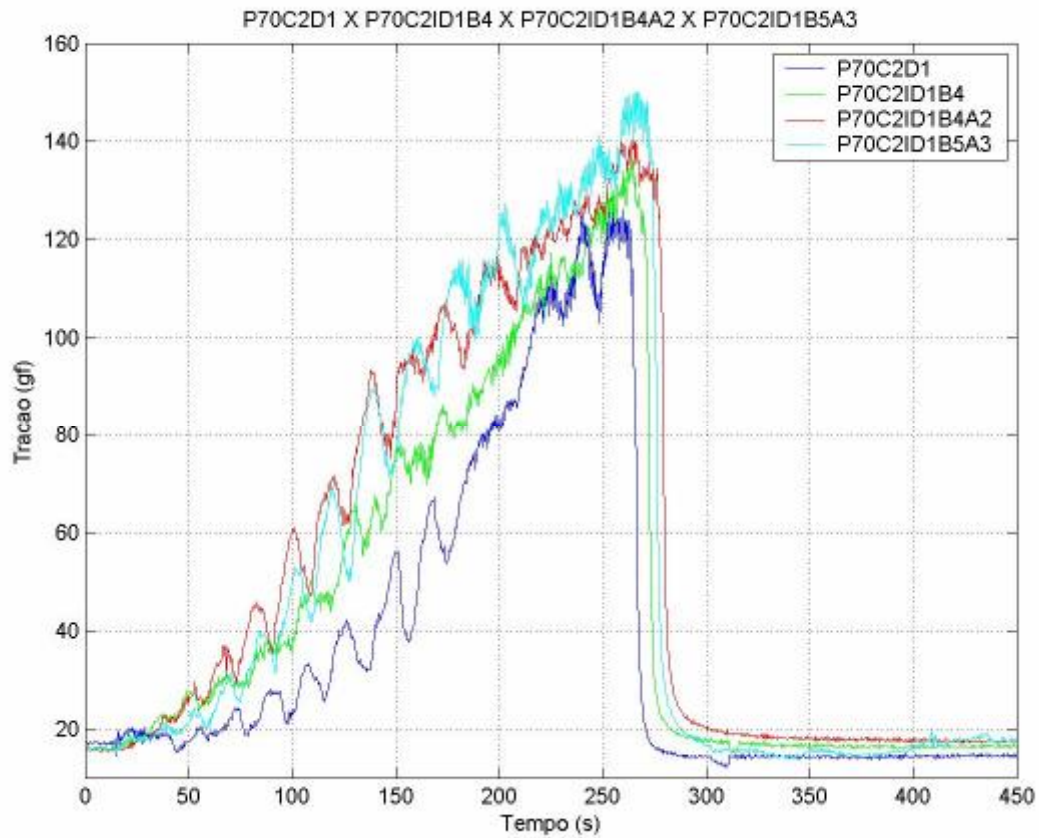
O objetivo e as conclusões obtidas são descritas abaixo.

- i. O objetivo do uso de bombonas é aumentar o empuxo, em tentativa de aumentar o GB, através do aumento de KB. Na comparação entre os ensaios 1 versus 2,3 e 4 conforme Tabela 4.1, verifica-se que quanto maior a bombona, menor é a instabilidade, embora não de modo totalmente convincente. Isso pode ser visto também no histórico da tração medida durante os ensaios e mostrado na Figura 4.3g. Nessas figuras não é possível garantir o sincronismo das séries temporais devido a um defeito na montagem da instrumentação. Note nessa figura que é preciso uma bombona de 20 tf para aumentar mais significativamente o período de oscilação.

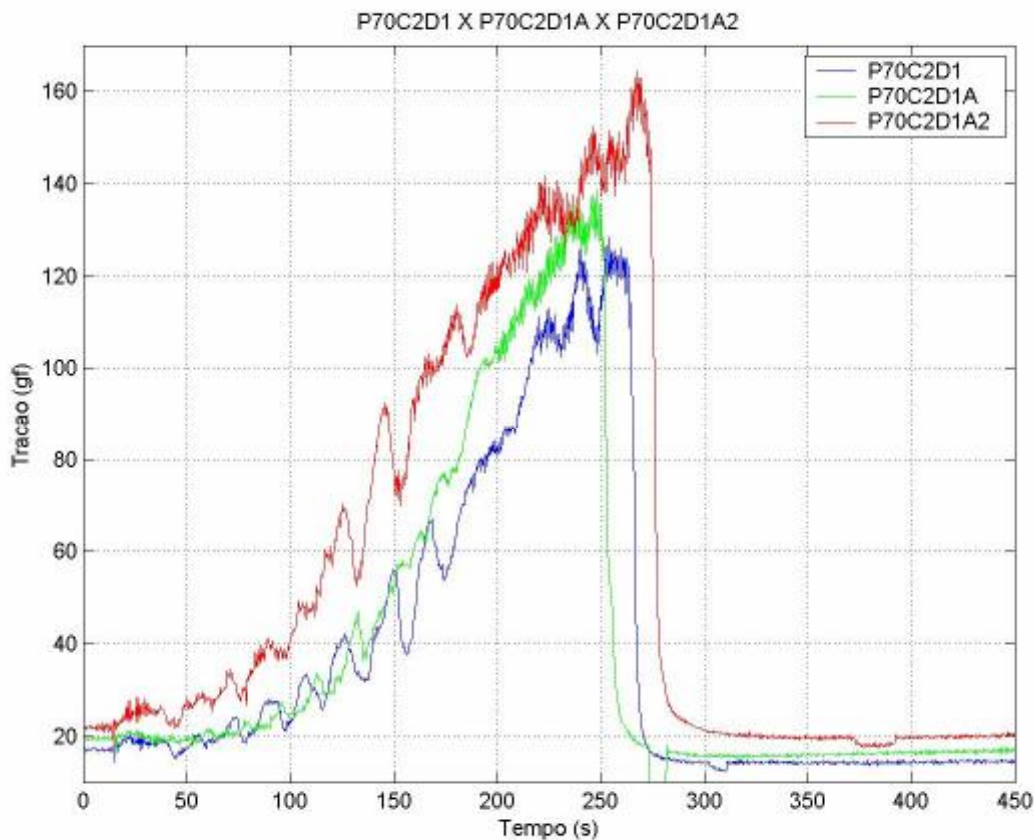


**Figura 4.3g – Ensaio P70C2D1 é ensaio na situação original; os ensaios seguintes (ver nomenclatura na Tabela 4.1 e Tabela 4.2) mostram respectivamente o uso de bombonas de 5 tf, 10 tf e 20 tf montadas na placa triangular.**

- ii. O objetivo é investigar um possível efeito das abas como estabilizadoras. Olhando os ensaios 10,11 e 17, pode-se dizer que não houve melhora. Pelo contrário, o comportamento parece ter piorado. A observação desse comportamento talvez possa ser usada para concretizar o entendimento do efeito das abas na instalação pendular. Ver também o histórico das trações na Figura 4.3h. e na Figura 4.3i onde se compara apenas as abas descritas na Tabela 4.1.



**Figura 4.3h – Ensaio P70C2D1 é ensaio na situação original; o P70C2ID1B4 é com cabo invertido e bombona de 10 tf sem abas, os dois seguintes são com abas, o que indica pouca mudança na oscilação. Quando se usam as abas ou mesmo o cabo invertido.**



**Figura 4.3i – Ensaio P70C2D1 é ensaio na situação original; o P70C2D1A é aba lateral; o P70C2D1A2 é com aba completa.**

- iii. Introdução de furos na sub-base. O objetivo seria diminuir a porosidade efetiva e subir com o centro do arrasto viscoso. Comparando o ensaio 1 com o ensaio 5, pode-se dizer que a melhoria foi significativa. Esse fato pode ser apreciado na Figura 4.3j. No ensaio com o furo na sub-base, a variação da tração é bem mais suave, ou dizendo de outra maneira, as oscilações são de período bem maior. O efeito benéfico da sub-base persiste mesmo com o uso da bombona de 5 tf (ensaio 6) a qual, por sua vez tem efeito menos significativo.



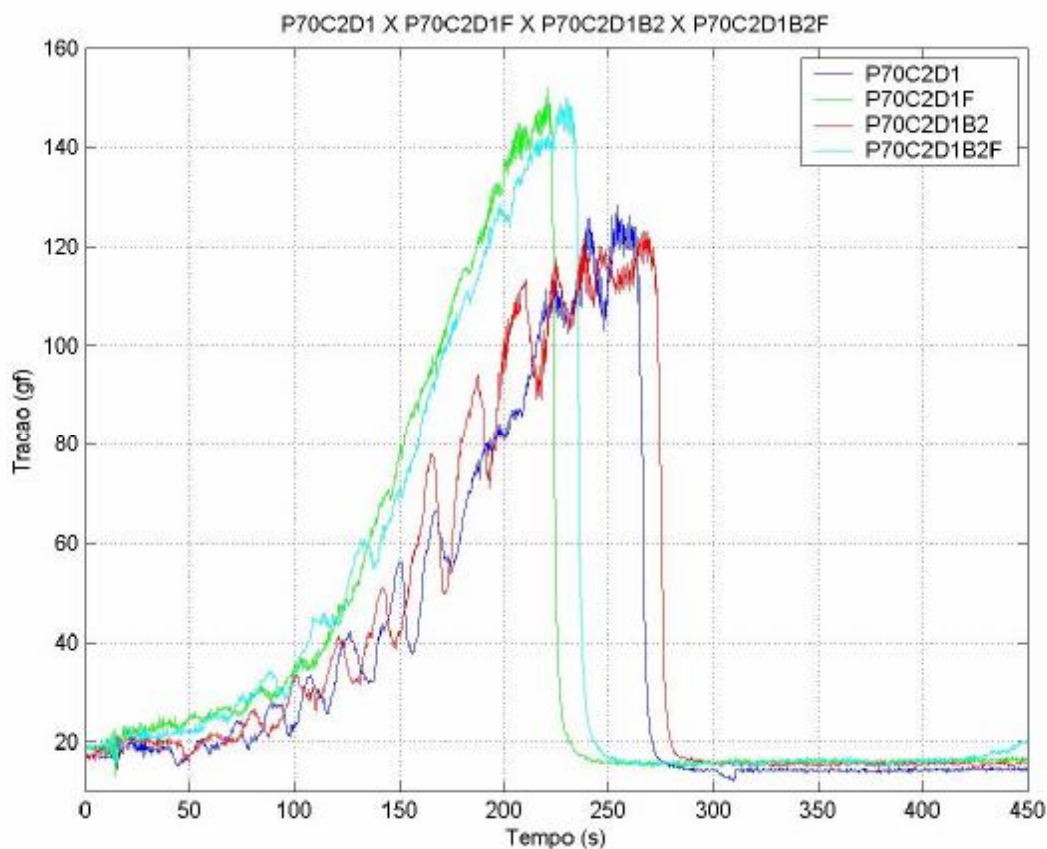


Figura 4.3j – Ensaio P70C2D1 é ensaio na situação original; o P70C2D1F é com furo na sub-base; o P70C2D1B2 com bombona de 5 tf; e o último com as duas modificações.

- iv. Uso do cabo invertido. O cabo de instalação é constitui-se de três trechos; o primeiro trecho 60 m com flutuadores e o trecho seguinte de 1000m vai da placa triangular até a conexão intermediária e, finalmente, o último trecho de 600m vai da conexão intermediária até a conexão no topo. O exercício constitui-se em trocar os cabos de 1000m e de 600m de posição. O objetivo novamente é aumentar o empuxo. Pode-se comparar os grupos de ensaios 1,3 e 13 e também os ensaios 10 e 11. De modo análogo ao das bombonas, verifica-se uma melhoria quando menos horizontal for a tração na placa triangular. A Figura 4.3h mostra o pequeno efeito do cabo invertido através da série temporal das trações.
- v. Uso de placas anti-porosidade ou lonas conforme a Tabela 4.1. O objetivo seria a de garantir o efeito do momento de Munk estabilizador que diminui com a porosidade (ver discussão no Item 4.4). Olhando os ensaios 16 e 31, chega-se à

conclusão que essa ação é significativa e é recomendada. O efeito é no aumento do período de oscilação que parece significar mais estabilidade. O atraso observado na entrada da oscilação pode ser útil. Ver Figura 4.31 para o histórico de trações.

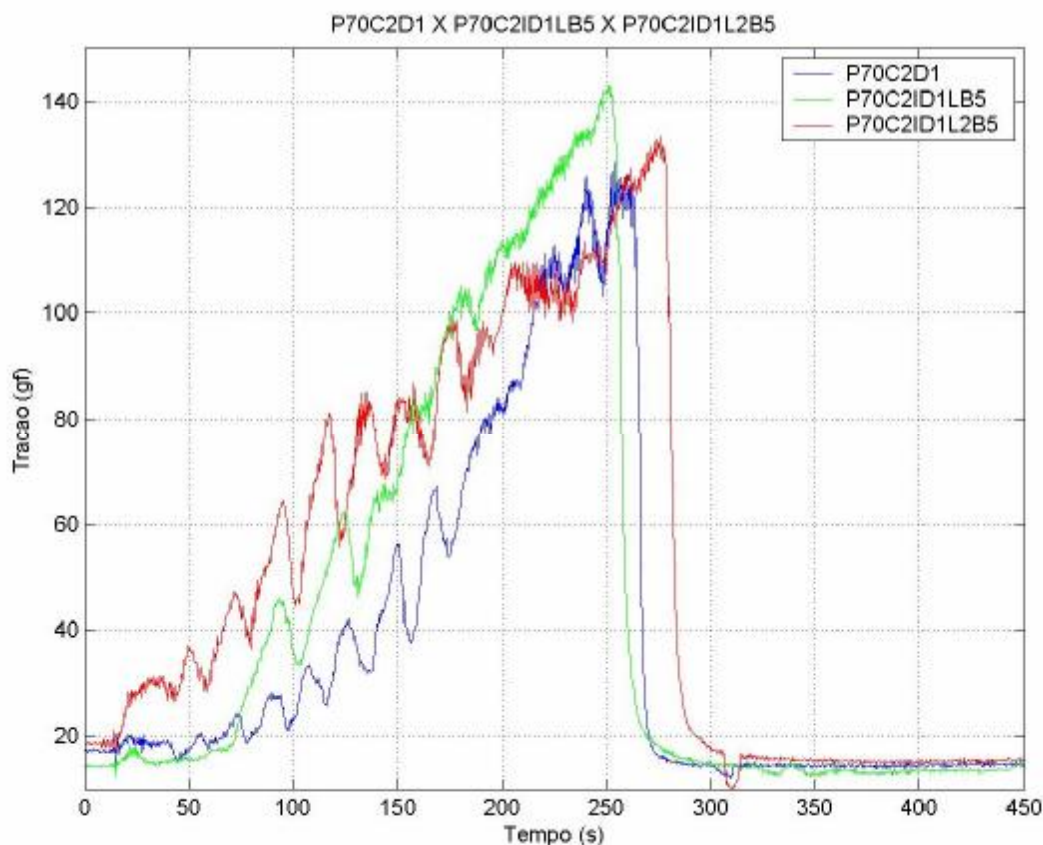


Figura 4.31 – Ensaios P70C2D1 é ensaio na situação original; o P70C2ID1LB5 é com lona lateral; o P70C2ID1L2B5 é com placa anti-porosidade central.

#### 4.3.3 ENSAIOS MSGL-RO-02 NA ESCALA 1:35

Da Tabela 4.1, podem-se gerar as Tabela 4.3 e 4.4. A anterior indica de modo organizado os ensaios com o cabo em modelagem linear e a seguinte os ensaios com o cabo em modelagem distorcida. Conforme (FERNANDES *et al.*, 2005e), a diferença entre uma e outra se mostrou pouco significativa no caso sob análise. No que segue, pela quantidade de casos comparativos, apenas os casos em modelagem linear são discutidos, na medida em que tem mais ensaios realizados.

**Tabela 4.2: Ensaios na escala 1:35 realizados com cabo em modelagem linear.**

ENSAIO	PROFUNDIDADE	CABO	ESTABILIZADOR
14	1900	linear	-
27	1900	linear	cabo invertido 5 tf
15	1900	linear	cabo invertido 10 tf
25	1900	linear	furos na sub-base
26	1900	linear	furos +cabo invertido 5 tf
19	1022	linear	-
20	1022	linear	cabo invertido 10 tf
21	511	linear	cabo invertido 10 tf

**Tabela 4.3: Ensaios na escala 1:35 realizados com cabo em modelagem distorcida.**

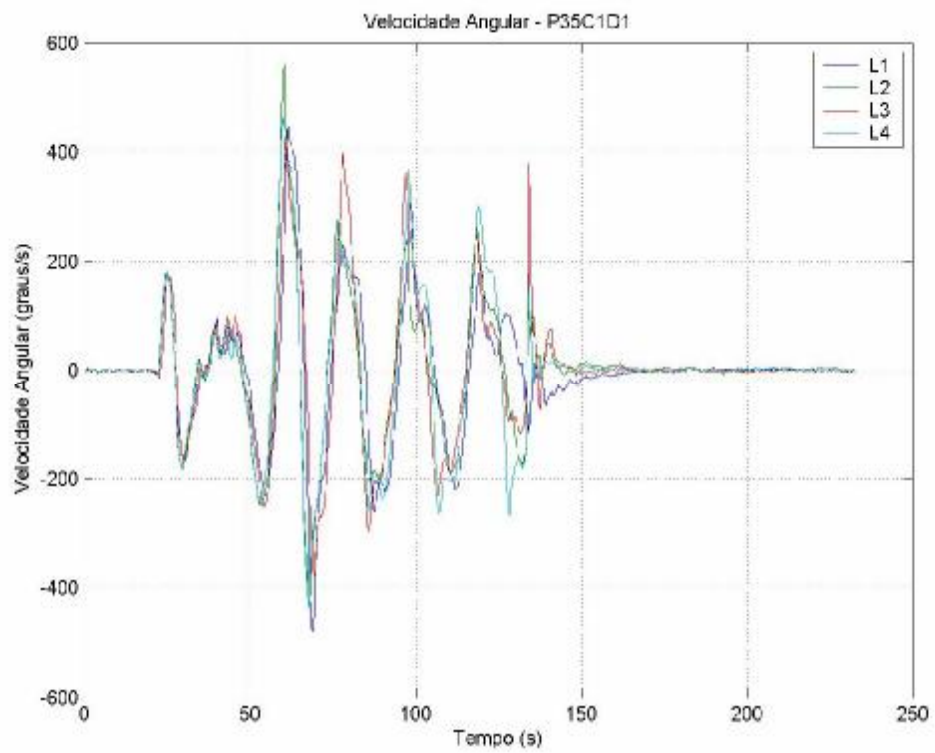
ENSAIO	PROFUNDIDADE	CABO	ESTABILIZADOR
22	1900	distorcido	-
23	1900	distorcido	cabo invertido 5 tf
24	1900	distorcido	cabo invertido 10 tf
19	1022	distorcido	-
20	1022	distorcido	cabo invertido 10 tf
21	511	distorcido	cabo invertido 10 tf

Assim, as investigações foram aqui concentradas na efetividade dos seguintes aspectos:

- i. Furos na sub-base (ver Figuras 4.1j e 4.1l).
- ii. Cabo invertido com bombonas na conexão intermediária e,
- iii. Combinação dos furos com bombonas.

Antes das comparações propriamente ditas, convém ressaltar que os ensaios foram repetidos de três a quatro vezes, de forma, a obter uma boa consistência nos resultados experimentais. Fixando no ensaio básico linear (ensaio 14), que será sempre comparado com outros casos para avaliar as mudanças, segue a Figura 4.3m mostrando as 4 leituras (L1, L2, L3 e L4) correspondentes a quatro lançamentos (quatro realizações). A mesma conclusão pode ser observada a partir dos ensaios 15, 25, 26 e 27

conforme Tabela 4.1. Conclui-se que, como esperado, há uma pequena dispersão, mas a ordem de grandeza das medições é a mesma.



**Figura 4.3m – Ensaio número 14 (Ref. P35C1D1) é ensaio na situação original com quatro realizações.**

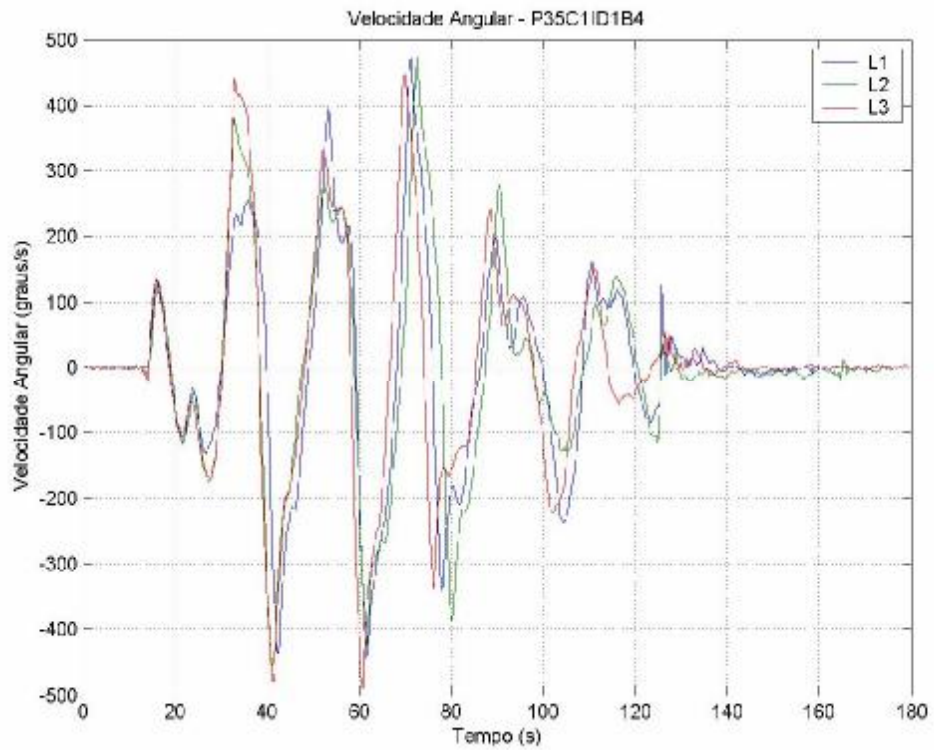


Figura 4.3n – Ensaios número 15 (Ref. P35C1ID1B4) configuração cabo invertido 10 tf.

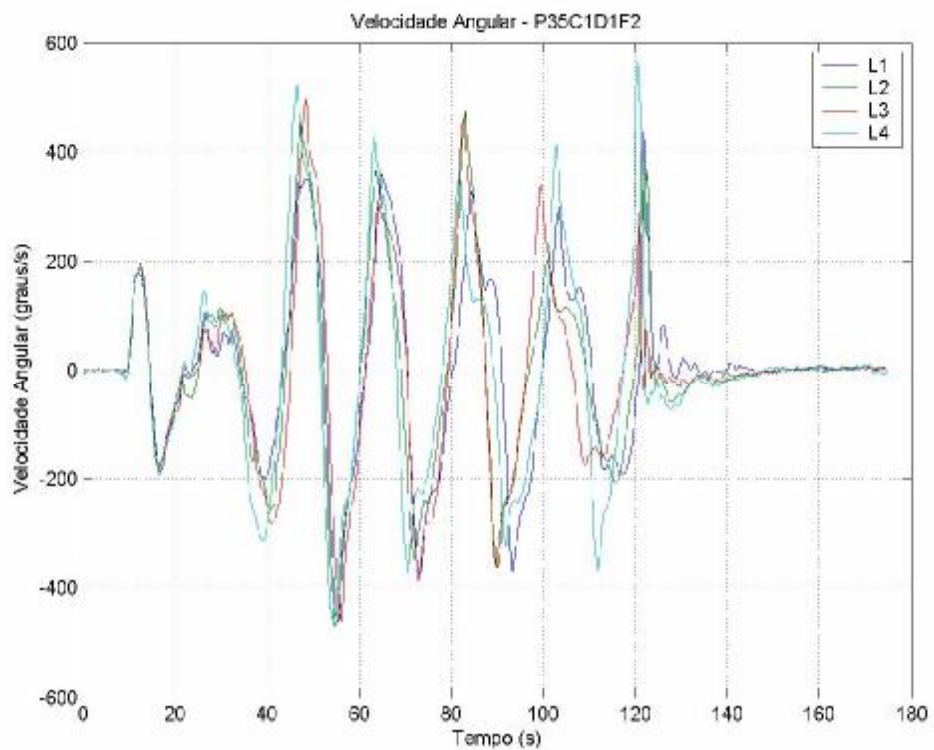
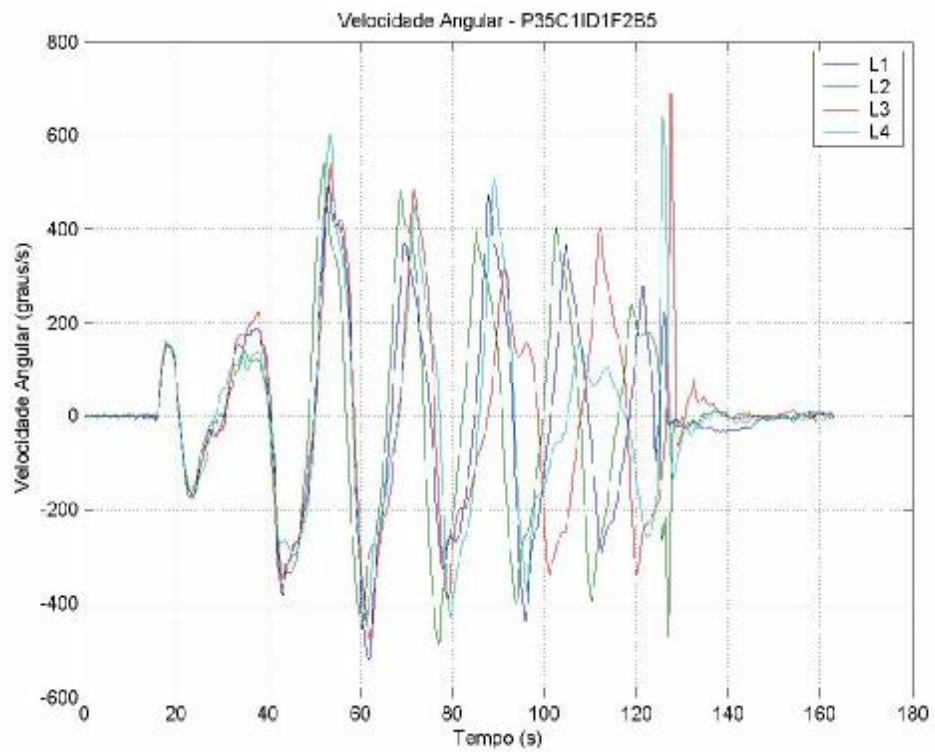


Figura 4.3o – Ensaios número 25 (Ref. P35C1D1F2) configuração furos de projeto na sub-base.



**Figura 4.3p – Ensaios número 26 (Ref. P35C1ID1F2B5) configuração cabo invertido 5 tf com furo na sub-base.**

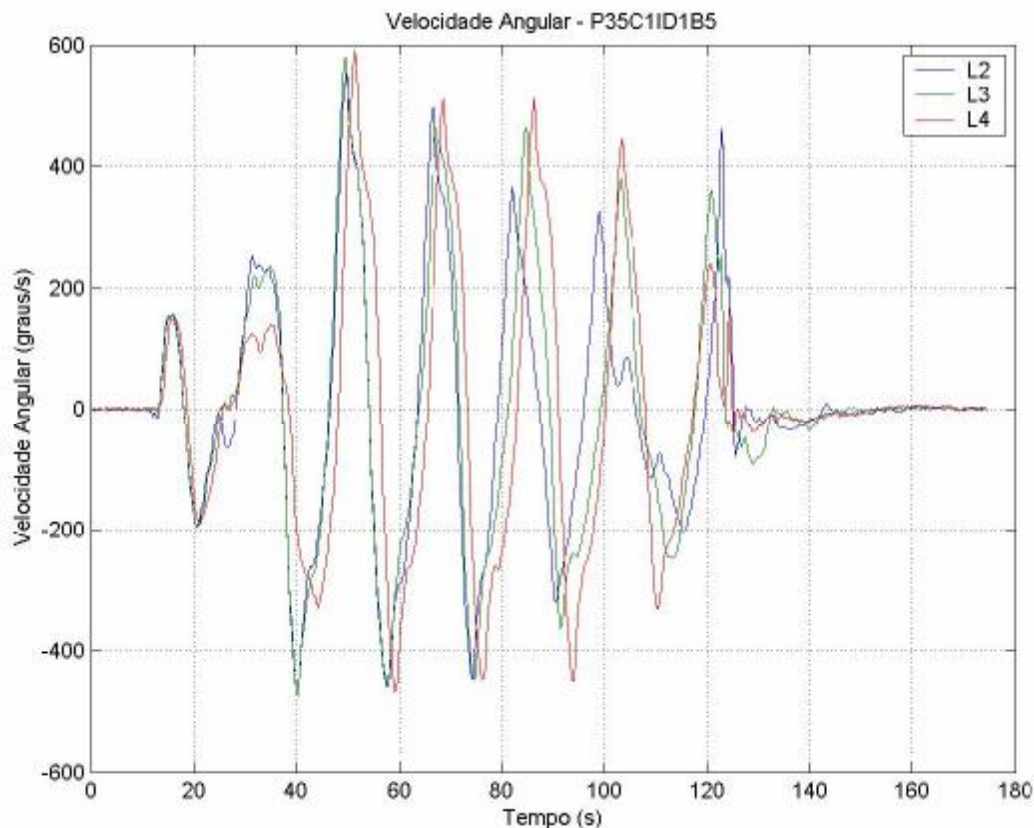


Figura 4.3q – Ensaio número 27 (Ref. P35C11D1B5) configuração cabo invertido 5 tf .

O objetivo e as conclusões obtidas são descritas abaixo:

- i. O objetivo dos furos na sub-base é uma contribuição para o fluxo através do manifold, visando eliminar a descontinuidade estrutura do manifold evitando a formação de vortex sobre as varandas da estrutura. Os resultados, em comparação com o caso base (ensaio 14) estão apresentados em termos de velocidade angular conforme Figura 4.3r. Note que com os furos, há um atraso na entrada da oscilação, entretanto esta acaba ocorrendo com a mesma ordem de grandeza de amplitude e período. Para deixar esse último ponto claro, mostra-se a Figura 4.3s entre a maior resposta de caso base e a menor com furo na sub-base. Assim, observa-se que o furo melhora a oscilação no início, mas não a elimina em instantes posteriores. As figuras ilustradas na seqüência, envolvendo a acelerações e trações corroboram essas conclusões. Também corrobora a atenta observação dos vídeos.

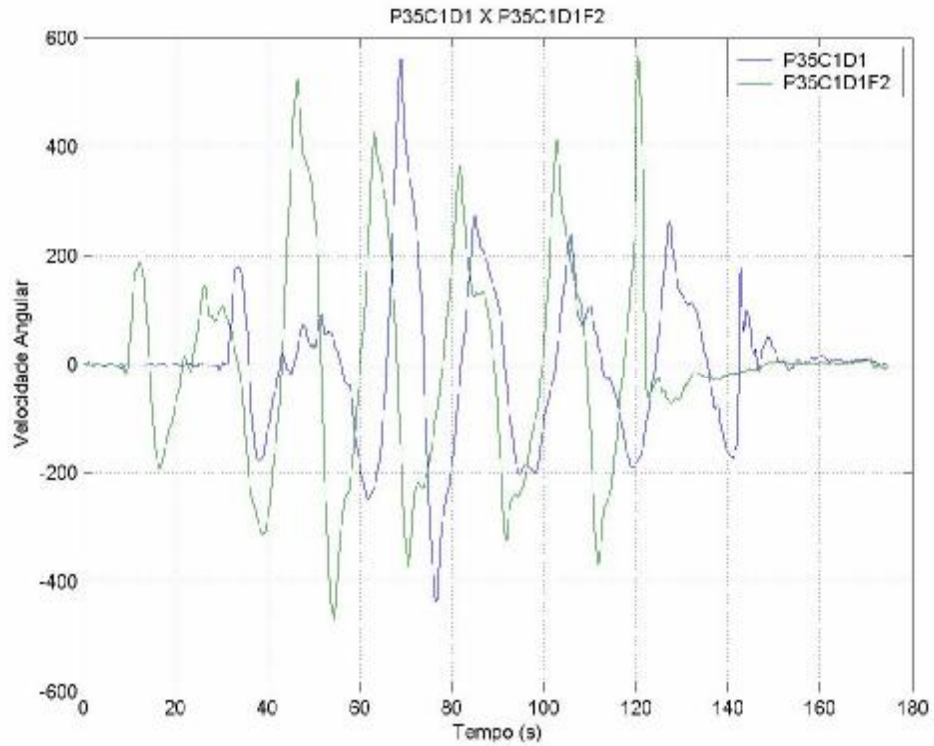


Figura 4.3r – Ensaios P35C1D1 (sem furo) versus P35C1D1F2 (com furo na sub-base); velocidade angular (graus/s).

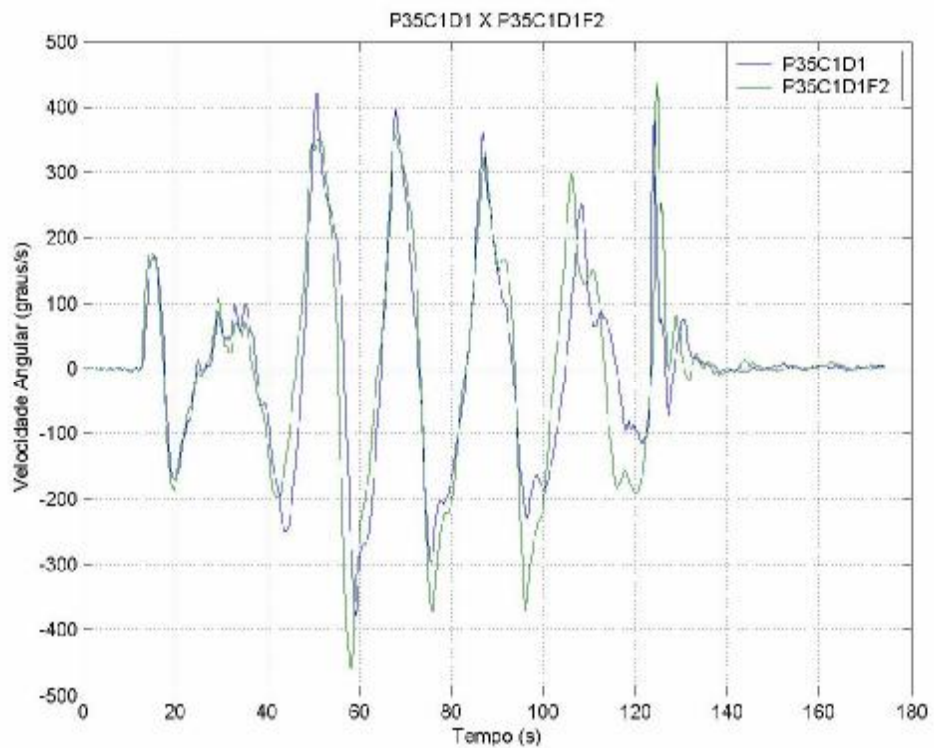


Figura 4.3s – Ensaios P35C1D1 (sem furo) versus P35C1D1F2 (com furo na sub-base) tomando-se leituras extremas maior para P35C1D1 e menor para P35C1D1F2 e coincidindo o início da oscilação; velocidade angular em (graus/s).



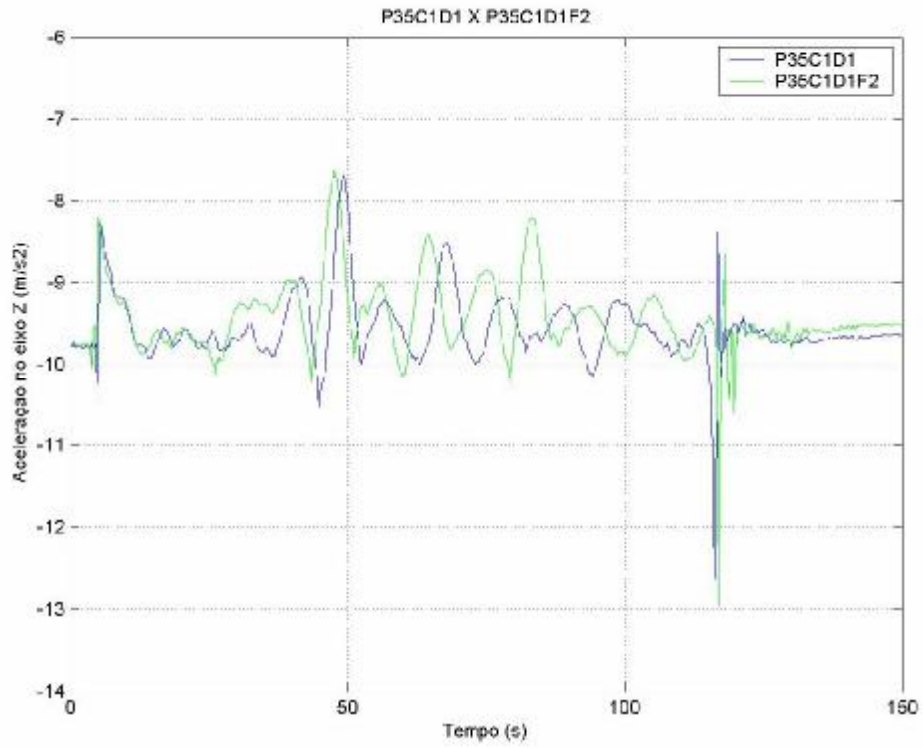


Figura 4.3t – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus P35C1D1F2 (com furo na sub-base); aceleração no eixo Z.

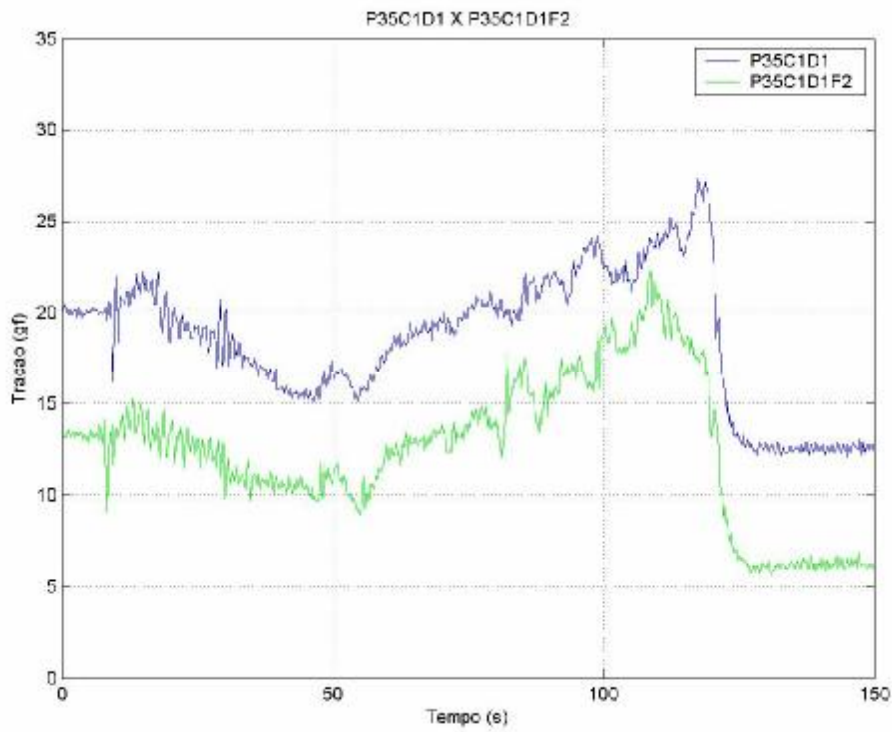
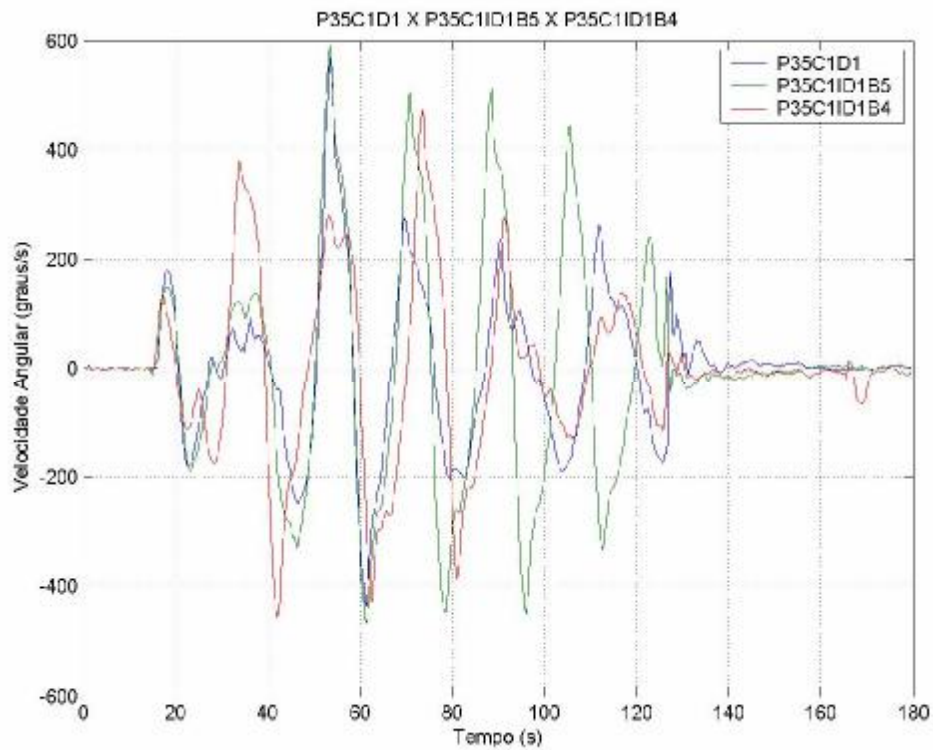
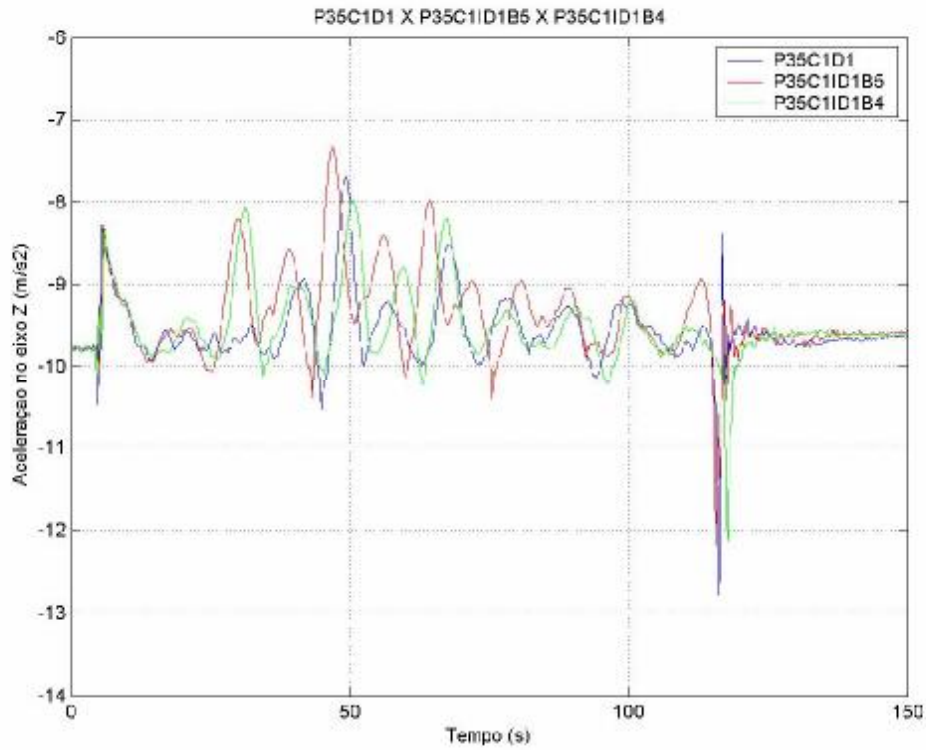


Figura 4.3u – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus P35C1D1F2 (com furo na sub-base); tração.

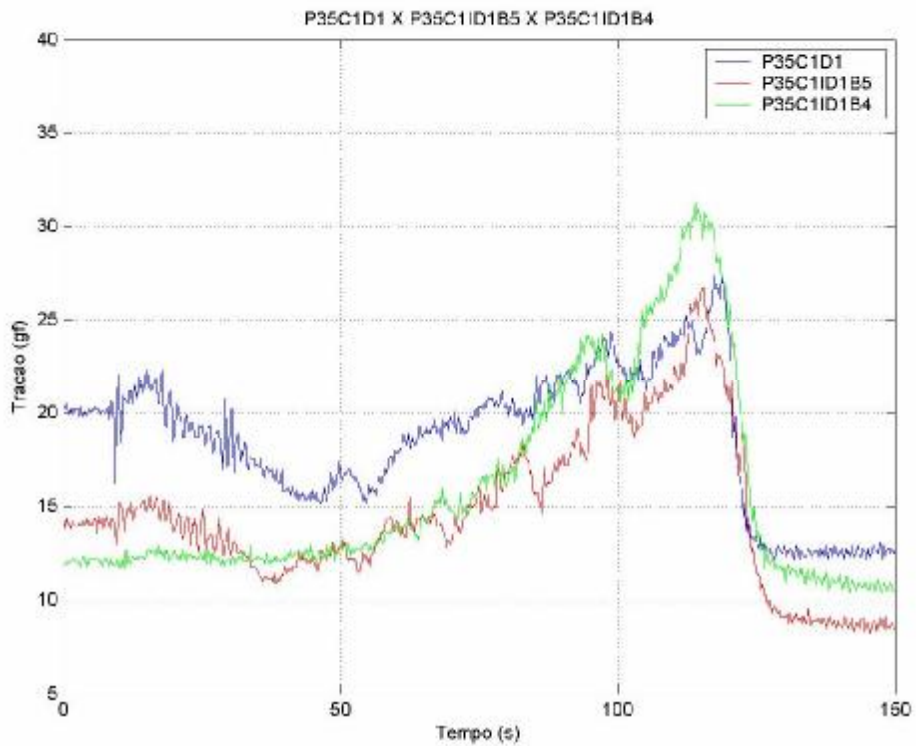
- ii. O objetivo do cabo invertido com bombonas na conexão intermediária é aumentar a o empuxo efetivo, ou seja, aumentar o centro de carena efetivo. Isso aumentaria a estabilidade. Entretanto, as medições comparativas realizadas com a velocidade angulares, acelerações e trações ilustradas respectivamente nas Figura 4.3v, 4.3x e 4.3z mostram que o efeito existe, mas é pequeno devido à pequena quantidade de empuxo adicionado ao sistema.



**Figura 4.3v – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus P35C1ID1B5 (cabo invertido, bombona de 5 tf) e P35C1ID1B4 (cabo invertido, bombona de 10 tf); velocidade angular.**

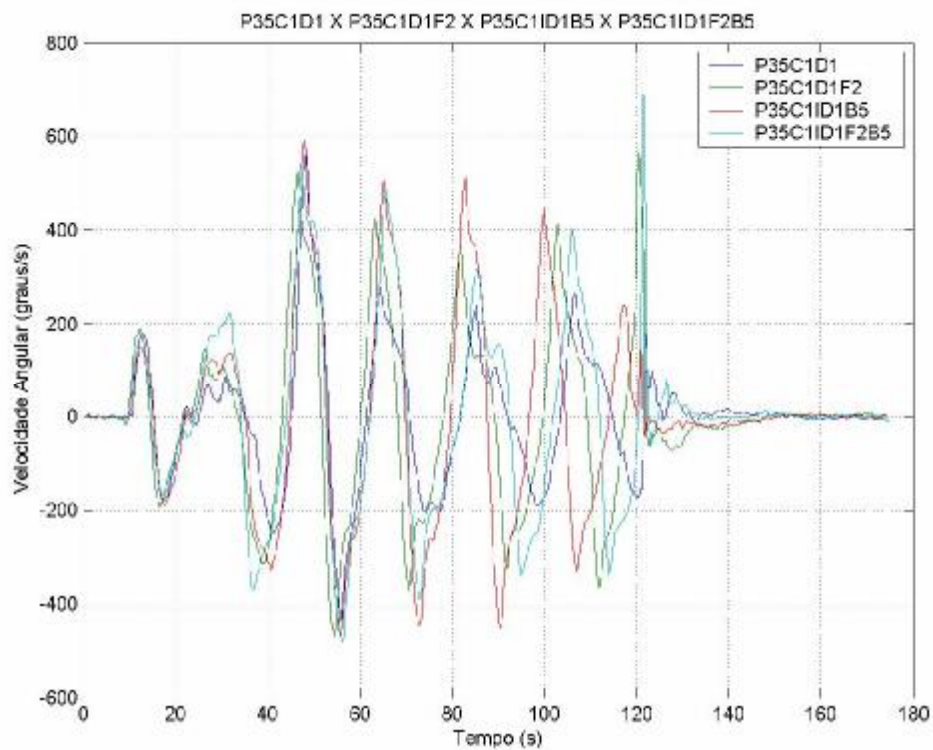


**Figura 4.3x – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus P35C1ID1B5 (cabo invertido, bombona de 5 tf) e P35C1ID1B4 (cabo invertido, bombona de 10 tf); aceleração no eixo Z.**



**Figura 4.3z – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus P35C1ID1B5 (cabo invertido, bombona de 5 tf) e P35C1ID1B4 (cabo invertido, bombona de 10 tf); tração.**

- iii. Combinando os furos com as bombonas têm-se os resultados para velocidades angulares, acelerações e trações nas Figuras 4.3a1, 4.3b1 e Figura 4.3c1, respectivamente. As conclusões não mudam, ou seja, verifica-se a existência de um pequeno efeito na oscilação.



**Figura 4.3a1 – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus ensaio combinado bombonas e furos; velocidade angular.**

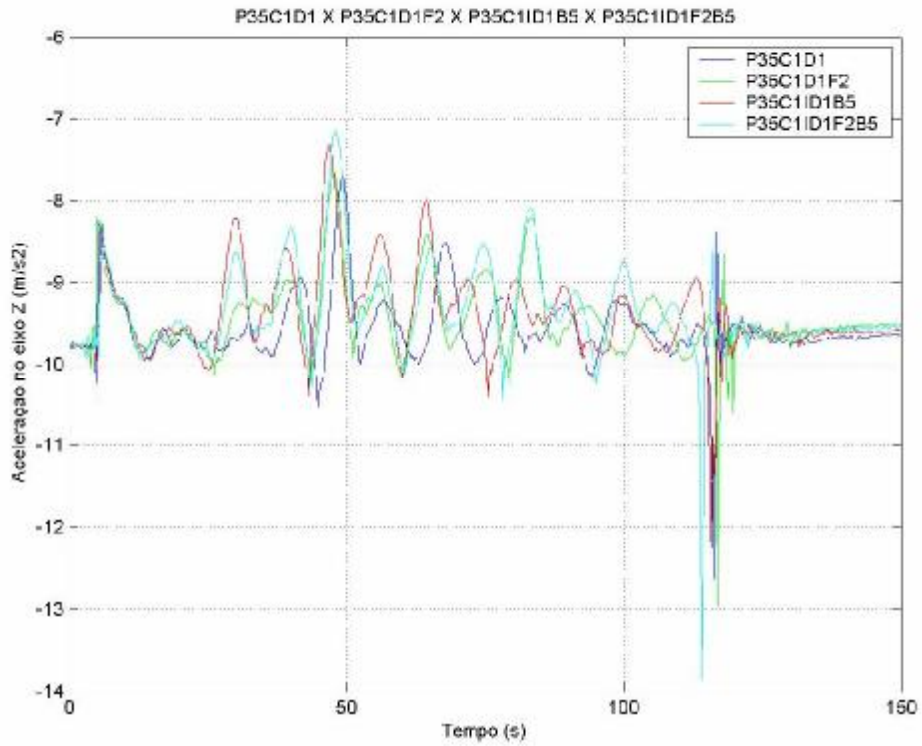


Figura 4.3b1 – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus ensaio combinado bombonas e furos; aceleração.

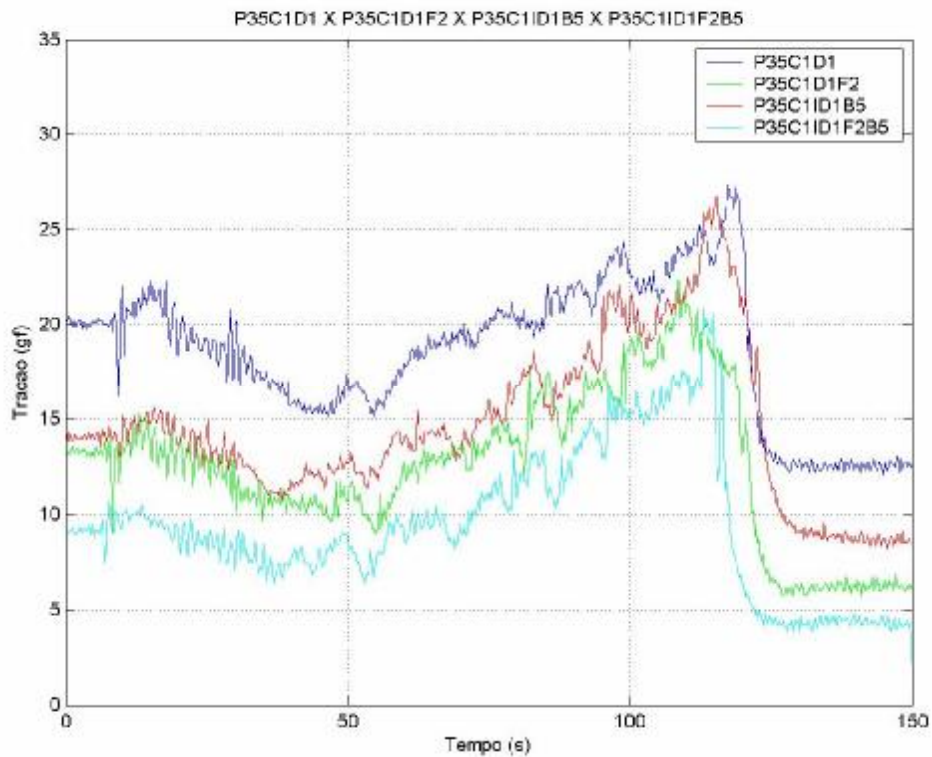


Figura 4.3c1 – Ensaio P35C1D1 (sem furo) versus ensaio combinado bombonas e furos; tração.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ROTAÇÕES EXCESSIVAS NO MSGL-RO-02

A discussão apresentada em (FERNANDES *et al.*, 2005e) sugere a importância do efeito restaurador dos momentos (binários) de Munk conforme exemplificado pela Equação (4.1), com uma expressão para o momento na direção X.

$$M_{MX} = r\forall(V_Y^2 + V_Z^2) * \text{sen}(\vartheta) * \cos(\vartheta) * (C_{aZ} - C_{aY}) \quad (4.1)$$

Onde:

$V_Y$  = velocidade do corpo na direção Y;

$V_Z$  = velocidade do corpo na direção Z;

$\Theta$  = ângulo de ataque;

$C_{aY}$  = massa adicional de translação (Y)

$C_{aZ}$  = massa adicional de translação (Z)

$r\forall$  = volume deslocado pela envoltória

Repetindo a última referência, o conceito de Momento de Munk é mais usual para o caso do corpo esbelto. Com pequeno ângulo de ataque conforme Figura 4.4a, o momento é desestabilizador ( $M_{MD}$ ).

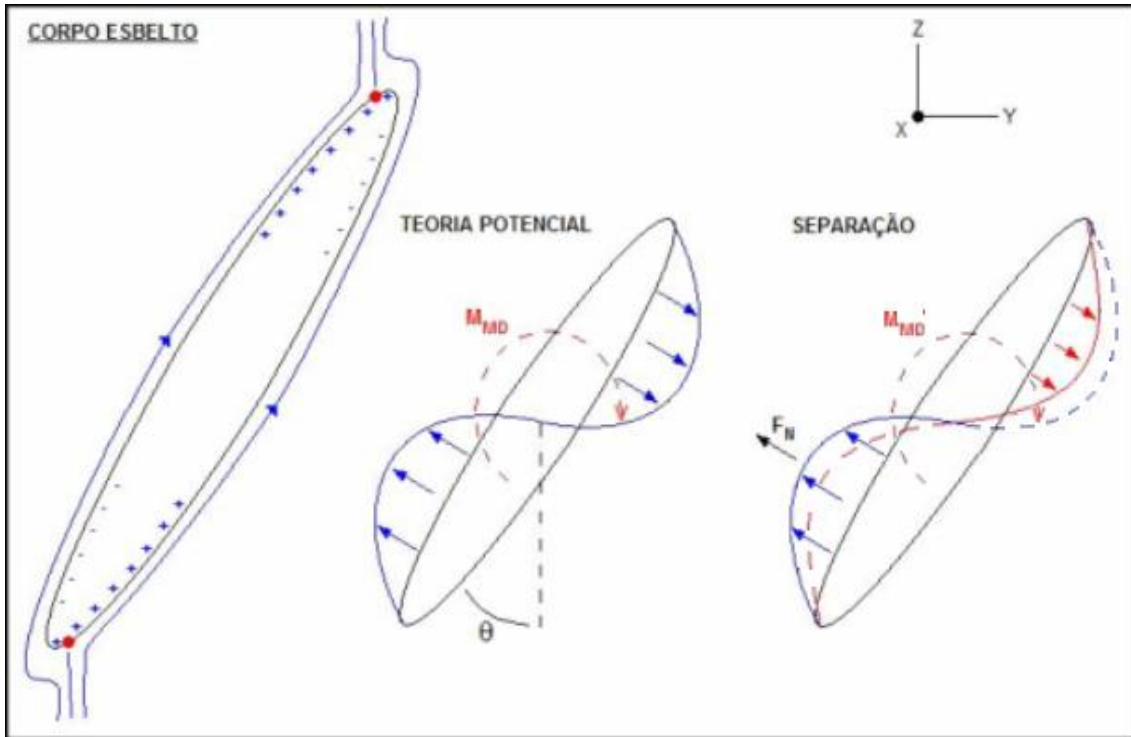


Figura 4.4a – Forças e momentos atuantes e um corpo esbelto imerso em um escoamento.

Agora, assumindo efeito de separação (ver novamente a Figura 4.4a) para ângulos de ataque maiores, o escoamento pode ser considerado separado. O binário resultante (Momento de Munk) tem menor intensidade ( $M_{MD}' < M_{MD}$ ) e surge uma força normal (arrasto lateral),  $F_N$ . Nessa última figura, se sugere a gênese do binário, a partir de uma distribuição de pressão.

Para o caso do manifold, onde o ângulo complementar ( $\beta$ ) que define o desvio causado pelos momentos atuantes no corpo é geralmente pequeno, o Momento de Munk atua como um momento estabilizador ( $M_{ME}$ ). Como anteriormente, a Figura 4.4b ilustra a gênese do momento, nesse caso estabilizador.

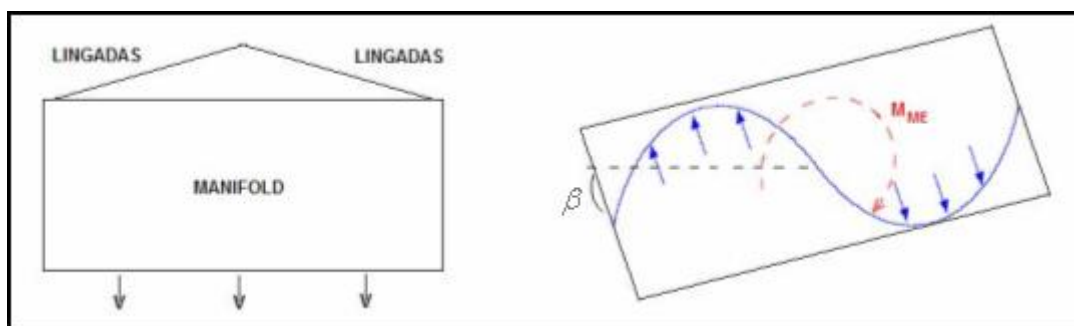


Figura 4.4b – Momento de Munk atuante no manifold imerso em um escoamento.

Conforme bibliografia verificou-se que o comportamento típico de placas retangulares em queda livre, com geometria similar a disco plano é um problema clássico, entretanto sem nenhuma aplicação industrial.

O comportamento da queda livre de um disco plano é ilustrado na Figura 4.4c conforme (BÖNISCH *et al.*, 2004). Nesta figura, a legenda descreve cada comportamento típico.

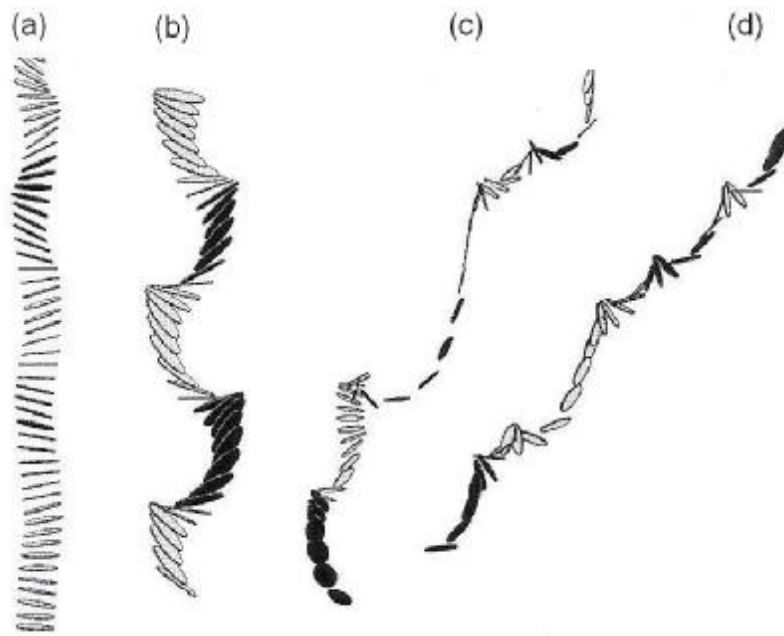


Figura 4.4c – Comportamento típico da queda de um disco plano em um fluido: (a) Queda livre. Verificação de uma pequena variação na trajetória vertical; (b) *Fluttering*. Observação de um desvio periódico durante a trajetória vertical sempre acompanhado de uma rápida variação angular nas extremidades da trajetória; (c) Caótico: é a combinação dos movimentos (a) e (b), com forte dependência da condição inicial de queda; (d) Tombamento. Neste caso, verifica-se uma direção preferencial na queda quando o corpo rotaciona 180 graus.

Em (BÖNISCH *et al.*, 2004), o parâmetro  $I^*$  não é definido no artigo, mas é proporcional ao momento de inércia. A Equação (4.2) é apresentada para a definição citada. O número de Reynolds é definido pela Equação (4.2) e é baseado na velocidade terminal ( $V_T$ ).

$$R_{ey} = \frac{rLV_T}{m} \quad (4.2)$$



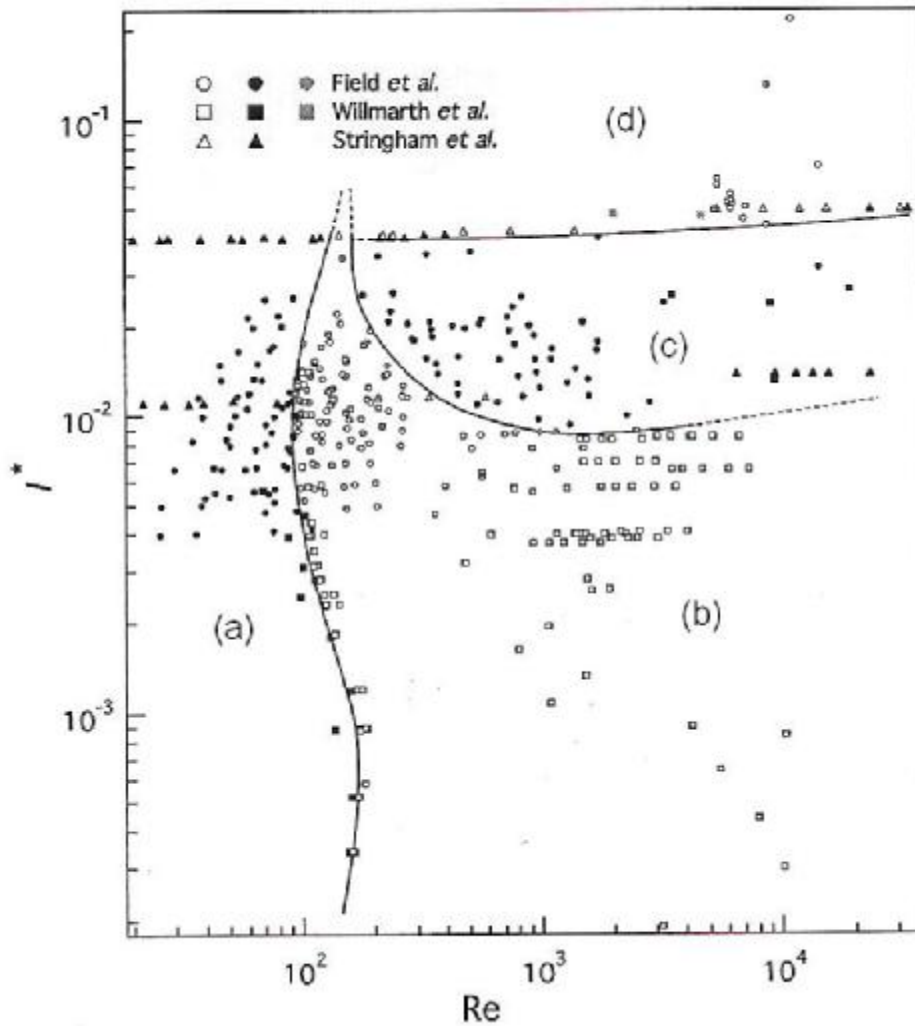
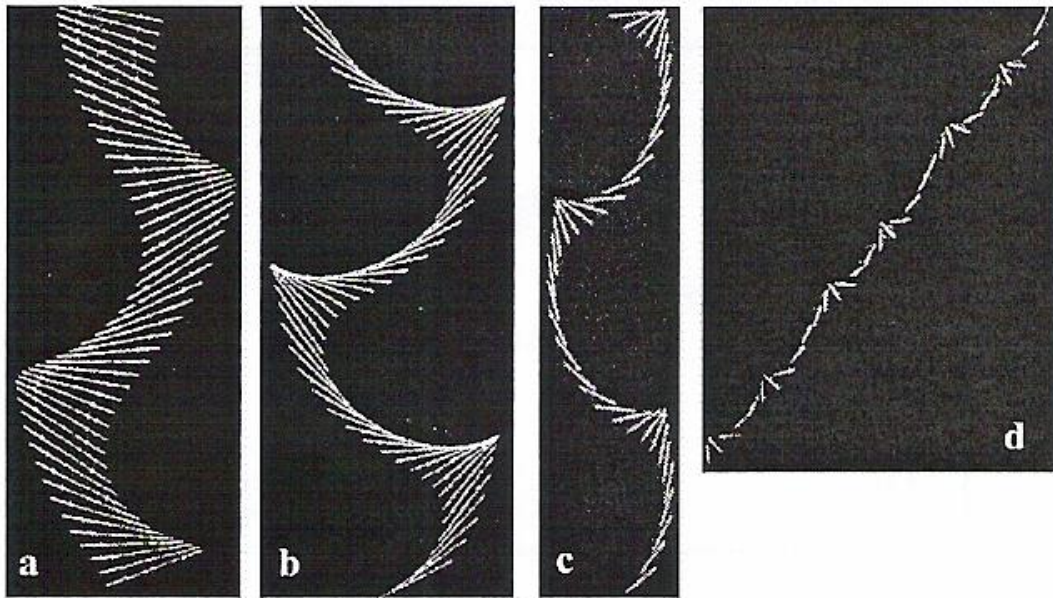


Figura 4.4d – Regiões típicas do comportamento de um disco circular plano em queda livre em função do momento de inércia ( $I^*$ ) e do número de Reynolds baseado na velocidade terminal conforme (BÖNISCH *et al.*, 2004).

Na Figura 4.4d, pode-se observar que para velocidade terminal elevadas, variando-se  $I^*$ , pode-se mudar o comportamento do corpo (trajetória (d)-(b)), ou seja, para o mesmo número de Reynolds e menor  $I^*$ , o corpo torna-se mais estável em sua trajetória vertical. Outro fato importante ilustrado é que para pequena velocidade terminal, a queda livre vertical é estável independente do valor do momento de inércia  $I^*$ .

Outras referências também confirmam a classificação ilustrada na Figura 4.4c. A Figura 4.4e em (BELMONTE *et al.*, 1998) representa a queda de cartas de baralho retangulares para um baixo número de Reynolds na faixa de  $3 \times 10^3$  a  $4 \times 10^4$ .



**Figura 4.4e** – Comportamento típico de queda livre de cartas de baralho obtidas experimentalmente em (BELMONTE *et al.*, 1998). Para a descrição da trajetória em (a), (b), (c) e (d), veja legenda Figura 4.4c.

Na Figura 4.4f em (PESAVENTO *et al.*, 2006), o mesmo comportamento confirma a classificação proposta pela Figure 4.4c., entretanto, a diferença pode ser notada pela comparação das Figuras 4.4e e 4.4f que durante a trajetória (d) em (BELMONTE *et al.*, 1998) é registrado uma rotação completa enquanto em (PESAVENTO *et al.*, 2006) duas rotações completas são observadas na trajetória (d) conforme Figura 4.4f.

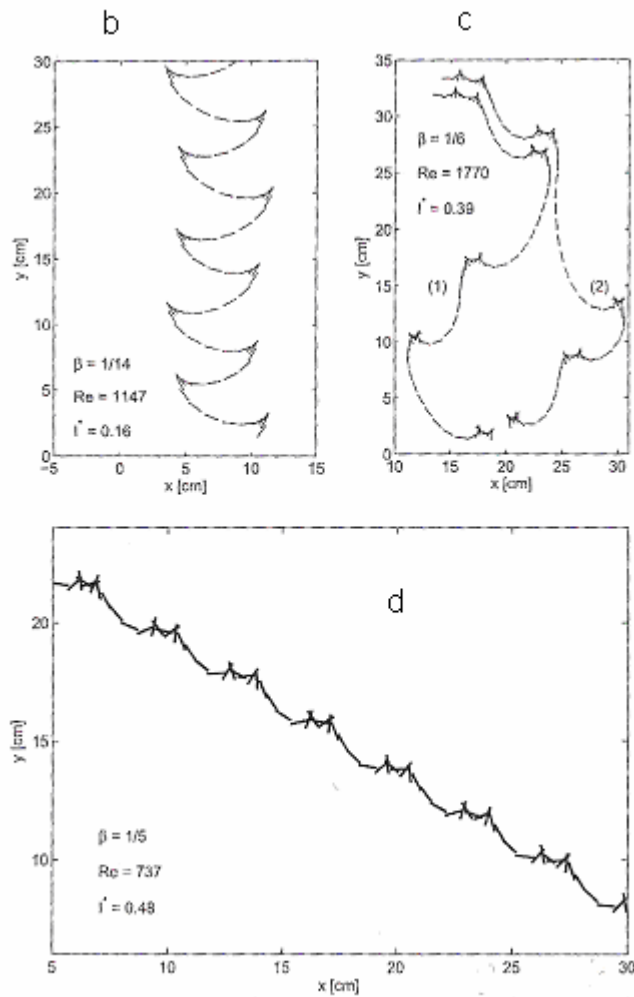


Figura 4.4f – Comportamento típico de queda livre de cartas de baralho obtidas experimentalmente conforme (PESAVENTO *et al.*, 2006). Para a descrição de (b), (c) e (d), veja legenda Figura 4.4c. Nesta configuração, b é definida como sendo a razão de aspecto da corda e o número de Reynolds é relativamente pequeno.  $I^*$  é definido conforme equação (2.2). Em (c), a trajetória 1 e 2 correspondem a diferentes condições iniciais.

O parâmetro  $I^*$  na Figure 4.4e é definido pela equação (4.3), aonde L é a corda e I é o momento de inércia adimensional para um volume deslocado de cilindro com diâmetro L.

$$I^* = \frac{32I}{\rho r L^4} \quad (4.3)$$

Um dos aspectos no *fluttering* é o traçado reproduzido pela variação da velocidade angular nas extremidades da trajetória vertical. Quando o sólido para lateralmente e cai repentinamente mantendo a mesma direção de rotação, existe um comportamento típico num determinado ponto da curva com a formação de ângulos agudos. Este comportamento leva à formação de picos extras conforme resultados experimentais ilustrado em (PESAVENTO, *et al.*, 2006) na Figura 4.4g.

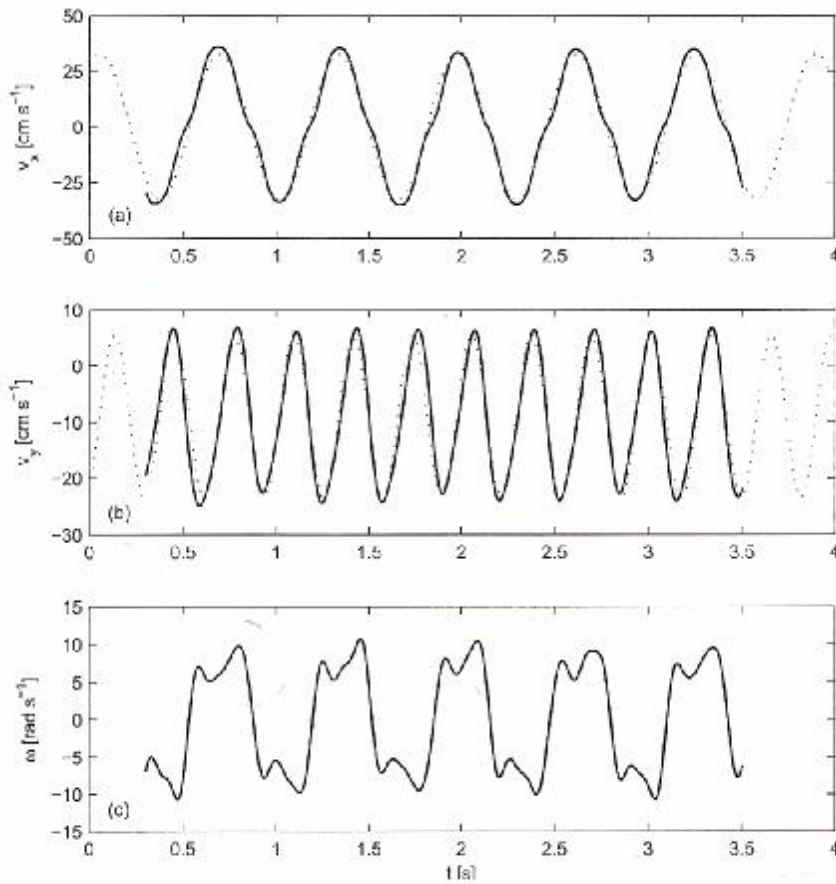


Figura 4.4g – Série temporal da velocidade angular  $w$  no regime de *fluttering* conforme (PESAVENTO *et al.*, 2006) para  $b$  igual 0,07. Para a velocidade angular  $w$ , observa-se um rápido crescimento nos extremos, descrevendo ângulos agudos nos extremos da trajetória. Este fato é observado nas Figuras 4.4e e 4.4f. Os traçados nas duas figuras acima não serão comentados pois correspondem a medida da velocidade tangencial e transversal no regime de planeio.

É interessante correlacionar o comportamento do modelo MSGL-RO-02 com as medidas de velocidade angular obtidas nos ensaios experimentais.

Na Figura 4.3m, é observado uma duplicidade de pico conforme ilustrado na Figura 4.4g. Nota-se uma diferença na definição da duplicidade de pico, fato este, explicado pelo *fluttering* presente ser muito inferior ao de uma carta de baralho ou disco plano. Mediante as observações de vídeo, o efeito de *fluttering* é claramente observado (FERNANDES, 2006).



**Figura 4.4h – *Fluttering* do MSGL-RO-02 observado durante ensaios experimental.**

## CAPÍTULO V – CONTROLE DO FLUTTERING POR CONTRA-PESO

Conforme descrito no Capítulo 4, é verificada uma grande instabilidade inicial no MSGL-RO-02 durante a simulação experimental do lançamento pendular devido a efeitos hidrodinâmicos.

Algumas soluções foram apresentadas anteriormente, entretanto nenhuma se apresentou eficaz. Baseado na Figura 4.4d, pode-se observar que para baixos valores de Reynolds, independente de valores de  $I^*$ , o corpo em queda livre apresenta-se sempre estável durante a sua trajetória vertical.

### 5.1 SISTEMA CONTRA-PESO

O Método de Instalação Pendular pode ser dividido em duas etapas distintas: vertical e pendular. A primeira etapa vertical consiste nos instantes iniciais de lançamento. Após esta etapa, verifica-se o início de tracionamento do cabo de instalação e, conseqüentemente, o início da trajetória pendular até sua completa verticalização.

É sugerida a adição de um sistema de contrapeso com o objetivo de minimizar a velocidade terminal do manifold durante a trajetória vertical conforme Figura 5.1.

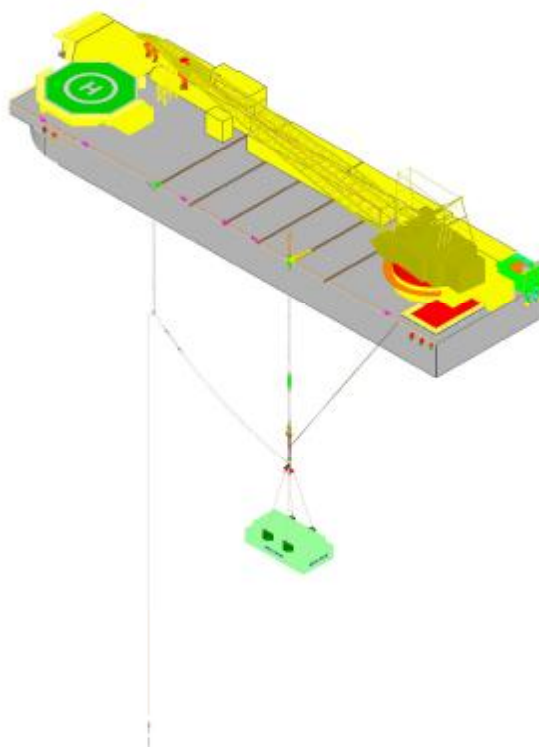
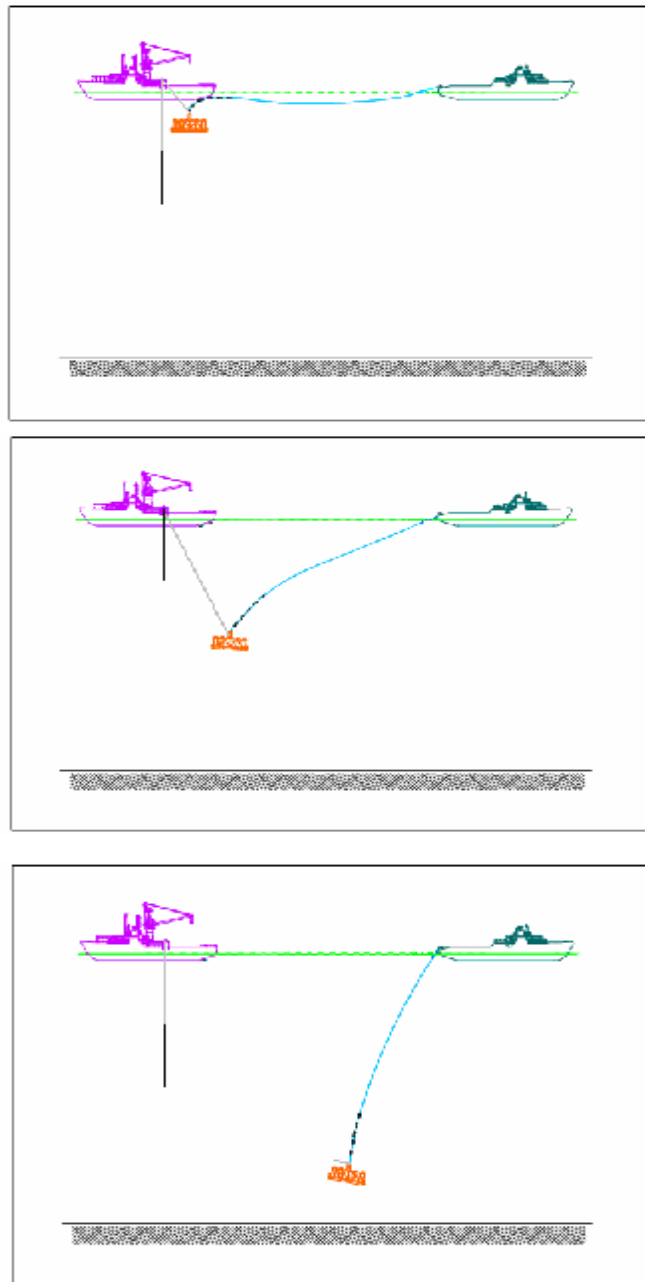


Figura 5.1a – Solução mecânica: sistema de contrapeso.

Esta alternativa inclui uma componente vertical no topo do manifold nos momentos iniciais do lançamento pendular, evitando o efeito de *fluttering*. Será utilizado um fusível na lingada do contra-peso que romperá no momento em que o manifold iniciar a trajetória pendular. Com a liberação do contra-peso o manifold conclui o movimento pendular sem que haja qualquer instabilidade pois o cabo de instalação já estará suficientemente tracionado.



**Figura 5.1b – Esquemático do método de instalação pendular com utilização do sistema de contra-peso.**

## 5.2 MATRIZ DE ENSAIOS

De forma a comparar algumas soluções e comprovar a eficácia da utilização do sistema de contra-peso, é sugerido a matriz descrita na Tabela 5.1. Foram realizadas vinte e uma configurações diferentes, sendo realizado no mínimo três lançamentos para cada configuração.

**Tabela 5.1 – Matriz de ensaios para determinação da solução mecânica a ser adotada.**

ORDE M	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
1	M4SL20F	Manifold com furo e com lingada invertida de 20 ton na sub base
2	M4SL10F	Manifold com furo e com lingada invertida de 10 ton na sub base
3	M4SL20	Manifold com lingada invertida de 20 ton na sub base
4	M4SL30	Manifold com lingada invertida de 30 ton na sub base
5	M4SC1	Manifold com contrapeso de 1370 gramas
6	M4SC2	Manifold com contrapeso de 1370 gramas - preso na balança
7	M4S	Manifold sem nada (Original)
8	M4SC3	Manifold com Contrapeso de 20 t preso na balança L=40m
9	M4SC4	Manifold com Contrapeso de 30 t preso na balança L=40m
10	M4SC5	Manifold com Contrapeso de 50 t preso na balança L=40m
11	M4SC6	Manifold com Contrapeso de 10 t preso na balança L=40m
12	M4SC4C	Manifold com Contrapeso de 30 t preso na balança L=40m. Corte do contra-peso.
13	M4SC7	Manifold com Contrapeso de 30 t preso na balança L=80m
14	M4SC7C	Manifold com Contrapeso de 30 t preso na balança L=80m. Corte do contra-peso.
15	M4SR1	Manifold com Contrapeso de 30 t preso na balança L=40m & Aumento de 6,15m (Escala do Modelo) - Com Elástico em 9m
16	M4SR2	Manifold com Contrapeso de 50 t preso na balança L=40m & Aumento de 6,15m (Escala do Modelo) - Com Elástico em 9m
17	M4SR3	Manifold com Contrapeso de 30 t preso na balança L=80m & Aumento de 6,15m (Escala do Modelo) - Com Elástico em 9m
18	M4SD1	Manifold com Contrapeso de 30 t preso na balança L=80m & Redução de 2,40m (Escala do Modelo) - Com Elástico em 9m
19	M4SD2	Manifold com Contrapeso de 50 t preso na balança L=80m & Redução de 2,40m (Escala do Modelo) - Com Elástico em 9m
20	M4SC8	Manifold com Contrapeso de 10 t preso na balança L=80m
21	M4SC9	Manifold com Contrapeso de 20 t preso na balança L=80m



## 5.3 RESULTADOS

### 5.3.1 MANIFOLD

A Figura 5.3a ilustra a série temporal da tração medida experimentalmente para a configuração M4S. Por meio da observação dos vídeos, observa-se uma rotação de  $180^\circ$  em todos os três lançamentos L1, L2 e L3 conforme ilustrado na seqüência de fotos a seguir.

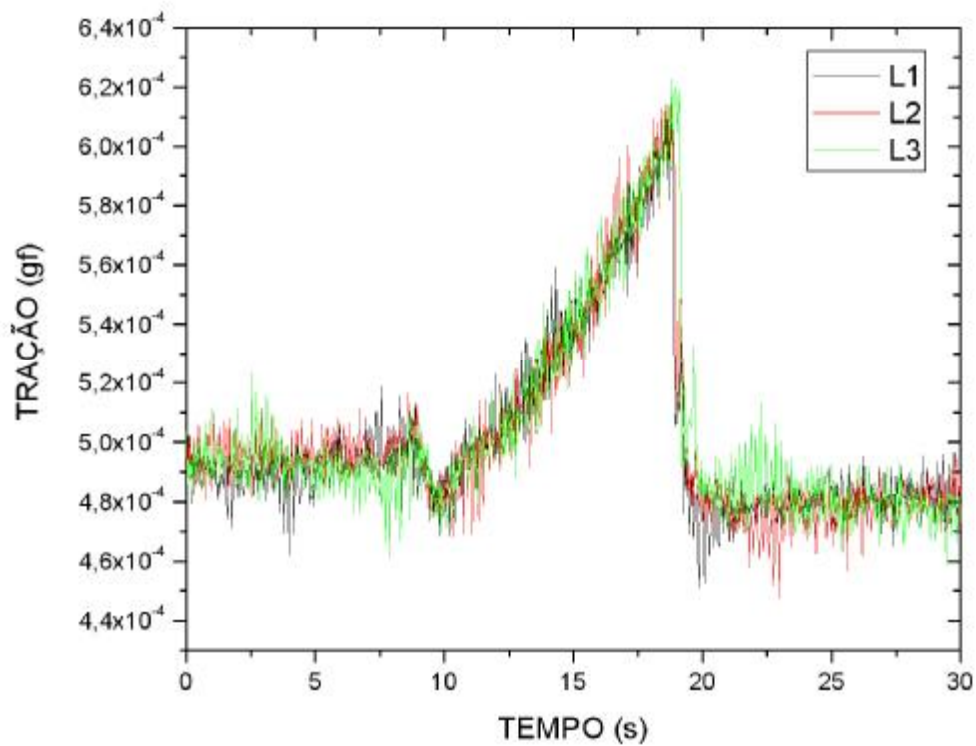
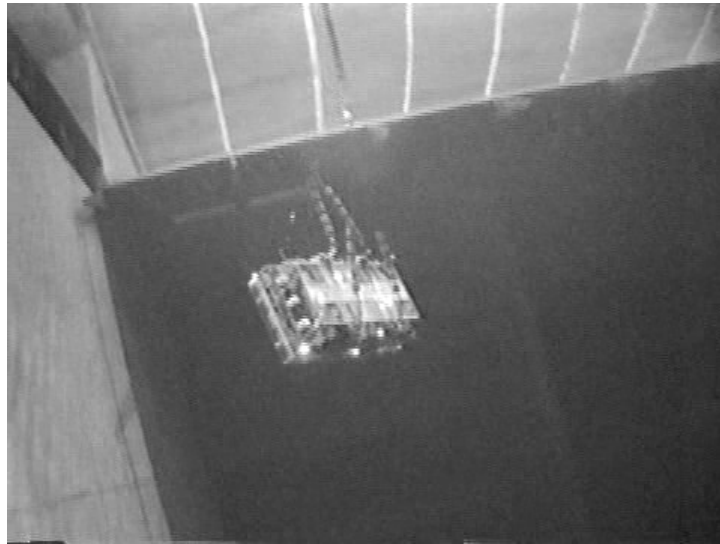


Figura 5.3a – Resultados experimentais dos lançamentos 1, 2 e 3 na configuração M4S.

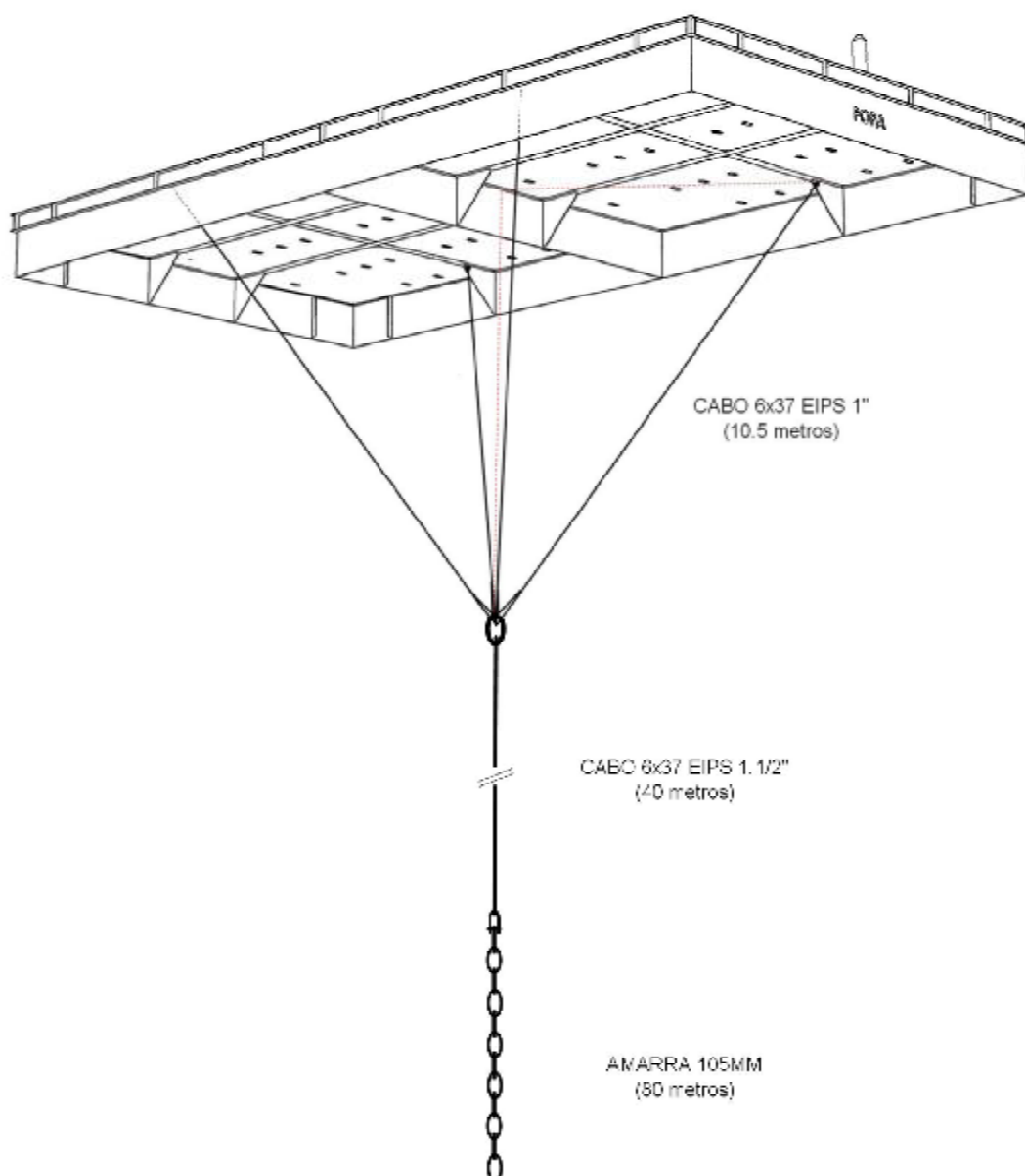




**Figura 5.3b – Seqüência fotográfica da rotação de 180 do modelo na configuração M4S Ref L1.**

### **5.3.2 MANIFOLD COM LINGADA INVERTIDA NA SUB BASE**

A Figura 5.3c ilustra a utilização de uma lingada invertida conectada à sub base do manifold. Este conceito visa obter uma força de restauração no manifold quando este sofre rotação, ou seja, criar uma força restauradora.



**Figura 5.3c – Utilização de lingada invertida na sub base.**

Conforme Figura 5.3d, verifica-se uma não eficácia do conceito. Este fato é verificado pela observação de oscilações na tração devidas às rotações do modelo. A observação dos vídeos corrobora para esta conclusão conforme Figura 5.3e.

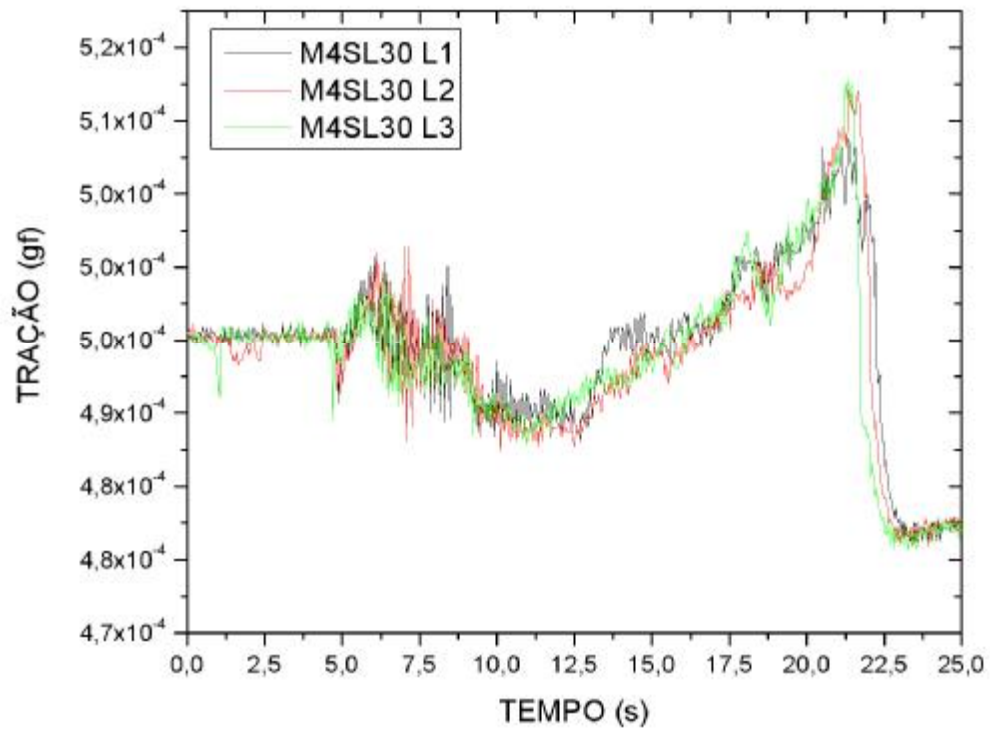
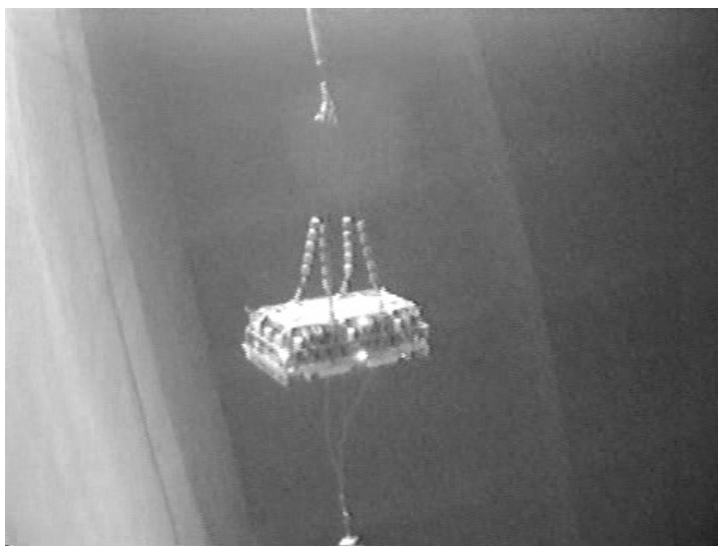


Figura 5.3d – Resultados experimentais dos lançamentos M4SL30.

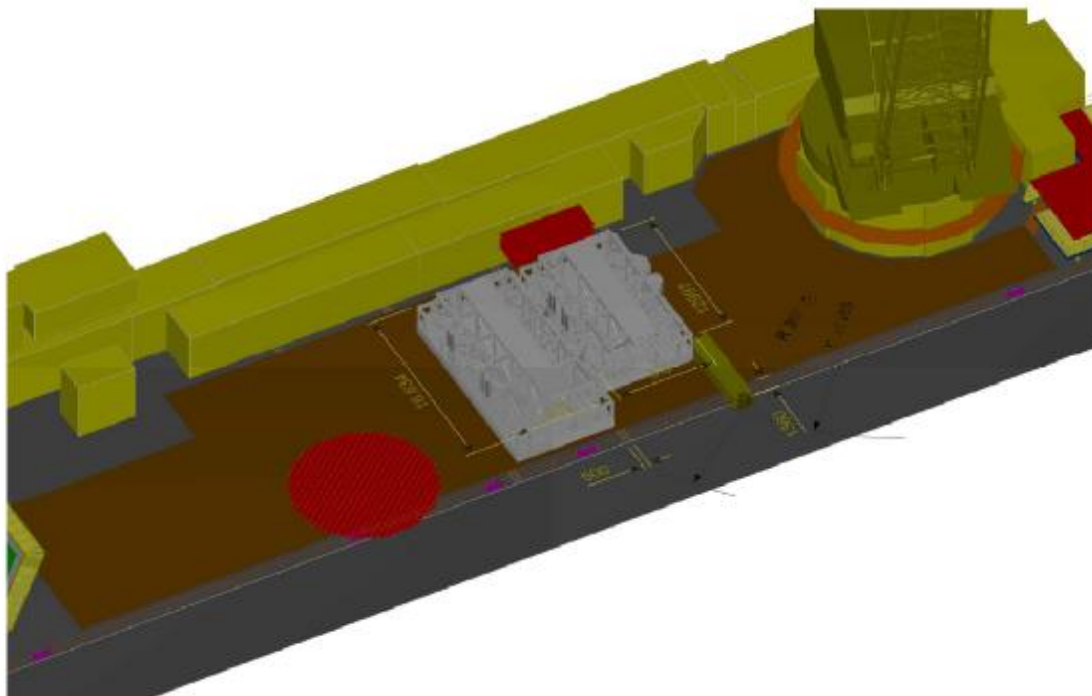




**Figura 5.3e – Sequência fotográfica da configuração M4SL30 Ref. L3 com verificação de grandes oscilações angulares.**

### 5.3.2 MANIFOLD COM SISTEMA DE CONTRA-PESO

O MSGL-RO-02 e o MSGL-RO-03 serão transportados até a locação de lançamento no convés da balsa BGL-1 conforme ilustrado na Figura 5.3f.

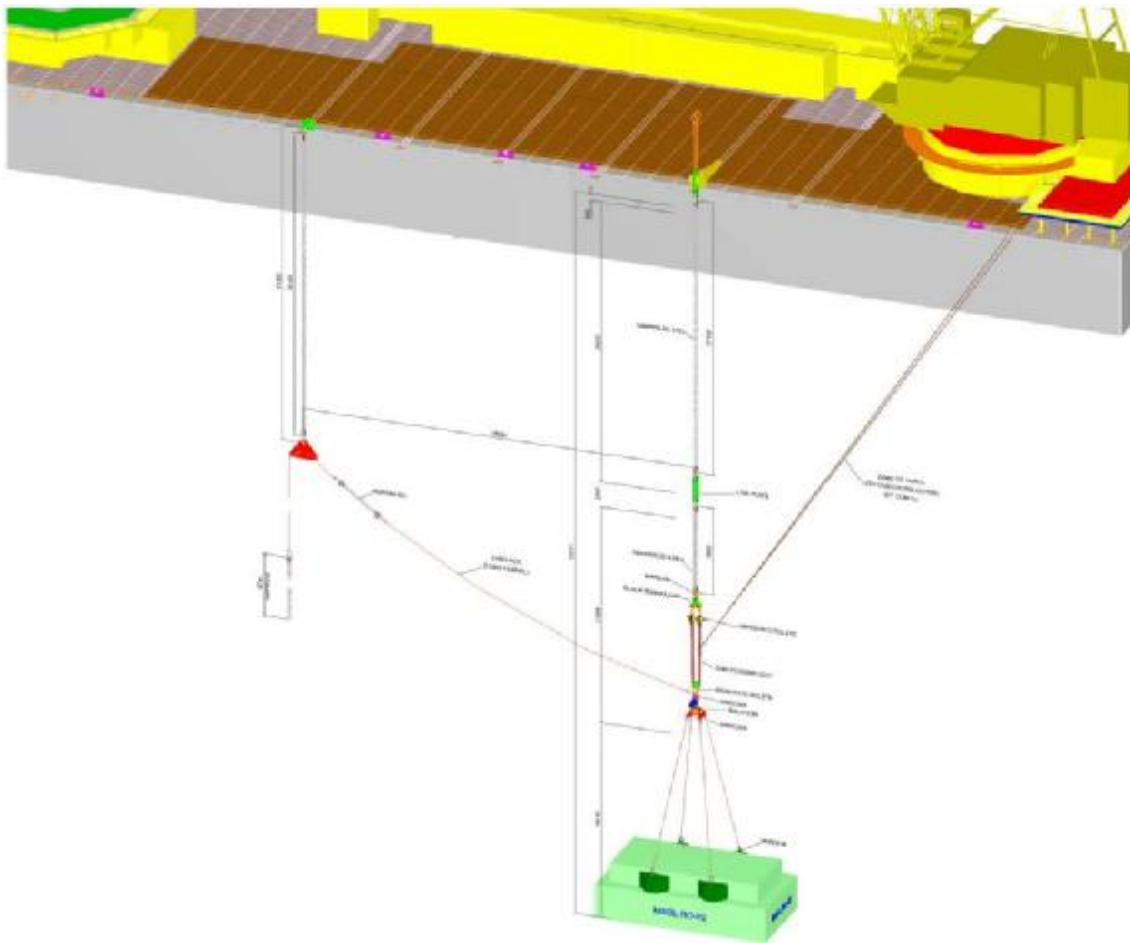


**Figura 5.3f – Transporte dos manifolds de Roncador no convés da BGL-1.**

O arranjo para início do lançamento pendular será configurado com a colocação do Manifold no costado da BGL-1 sustentado em um cabideiro instalado no convés da BGL-1.

A lingada de içamento apresenta uma derivação com segmentos seqüentes de 5 metros de cabo de aço denominado fusível, um tramo de cabo de poliéster  $\Phi$  136 mm com 600 metros de poliéster e 150 m de amarra 105 mm, totalizando um peso aproximado de 30 ton (sistema contra-peso). A Figura 5.3g ilustra o arranjo do sistema de contra-peso na BGL-1.





**Figura 5.3g – Ilustração da montagem do sistema de contra-peso na BGL-1.**

Mediante a configuração ilustrada na Figura 5.3g, realizaram-se os ensaios em escala reduzida conforme Tabela 5.1. Observa-se que além de variar o valor do contra-peso é apresentado uma variação do ponto de fixação do contra-peso (variação em L) que representa a posição dos *fair lead* na embarcação BGL-1.

Com a utilização do sistema de contra-peso não é verificada oscilações na tração devido ao VIV e rotações no modelo. Os valores observados são praticamente constantes com poucas oscilações, indicando somente o peso da catenária do cabo de instalação. Comparando os ensaios M4S e M4SC4, observa-se a ausência do pico de tração, pois o manifold durante a trajetória vertical nos instantes iniciais está sendo suportado pelo cabo de poliéster com o contra-peso. Os vídeos não fornecem indícios de rotação no modelo com a utilização do sistema de contra-peso.

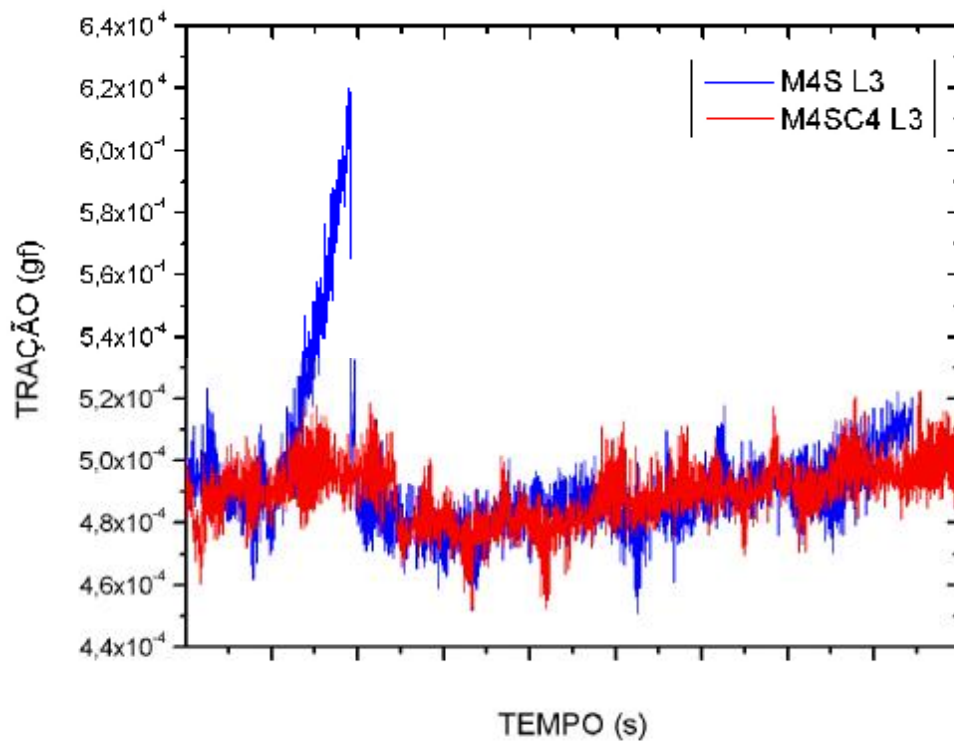


Figura 5.3h – Comparação dos resultados experimentais nas configurações M4S e M4SC4 sem e com utilização do sistema de contra-peso (30 tf), respectivamente.





**Figura 5.3i – Seqüência fotográfica da configuração M4SC4 Ref. L3 sem verificação de grandes oscilações angulares.**

### 5.3.2.1 VERIFICAÇÃO DO SISTEMA COM CONTRA-PESO

Nesta etapa, foi ensaiada uma configuração final de lançamento com medição da força em diferentes pontos ao longo da lingada do elevador.

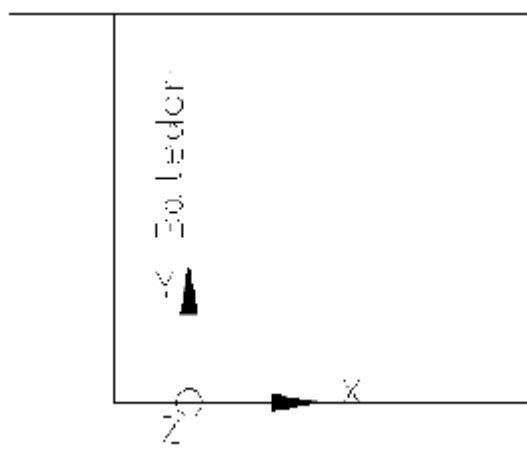
Durante o ensaio, foi simulado o rompimento de dois tipos de cabo de fusível: uma linha de nylon de pesca e uma linha de pipa comum. Ambos apresentam tensão de ruptura em escala similar ao especificado por (RIBEIRO, 2006) para o caso real.

Diferente das simulações anteriores, onde se verificava o conceito por meio da utilização de um peso em forma de bloco suportado por um cabo de aço, nesta etapa adotou-se além da lingada de sustentação do elevador em escala, simulou-se o contra-peso como uma amarra de forma que o arrasto fosse levado em consideração.

Foi ensaiada uma profundidade de lançamento de 1900m.

### 5.3.2.2 MONTAGEM DO ENSAIO

Foram adotados dois sistemas de referência. O primeiro, conforme Figura 5.3j é o sistema de coordenadas do tanque, cuja origem se encontra na intersecção entre o plano da superfície da água, a linha de batedores e a parede anteposta à praia longitudinal. Os eixos de coordenadas apontam para a praia transversal (X), para a praia longitudinal (Y) e para cima (Z).



**Figura 5.3j – Sistema de coordenadas fixo no tanque para verificação do sistema de contra-peso.**

O segundo sistema utilizado teve sua origem definida na posição do ponto de lançamento do manifold, vide Figura 5.31.

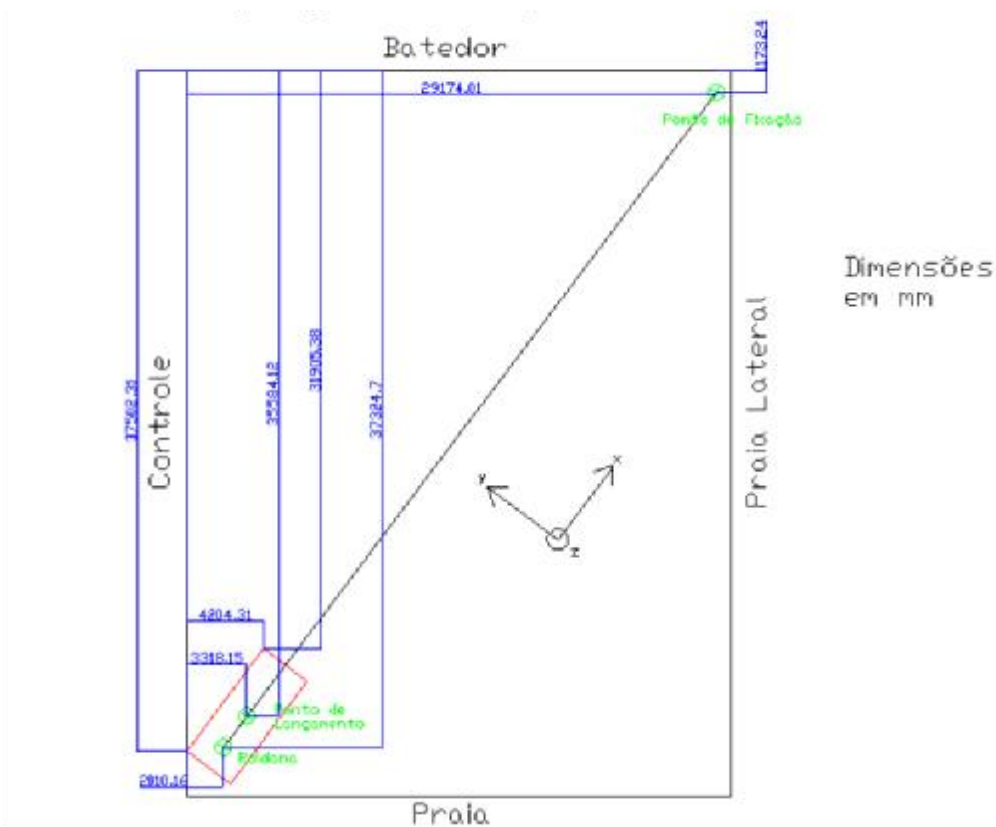


Figura 5.31 – Sistemas de coordenadas XYZ (tanque) e xyz (condição inicial do modelo).

O ensaio foi montado de maneira que as linhas de lançamento se encontravam no plano diagonal do tanque, devido à sua dimensão.

Os pontos de ancoragem da linha de lançamento foram referenciados em relação ao sistema de coordenadas do tanque, e posicionados em pontos fixos.

Conforme é identificado na Figura 5.3m, foram instaladas células de carga no cabo do elevador (TRAÇÃO\_CF), no contra-peso (TRAÇÃO\_CP) e na roldana (TRAÇÃO\_ROL), de forma a se medir a tração total nesses pontos.

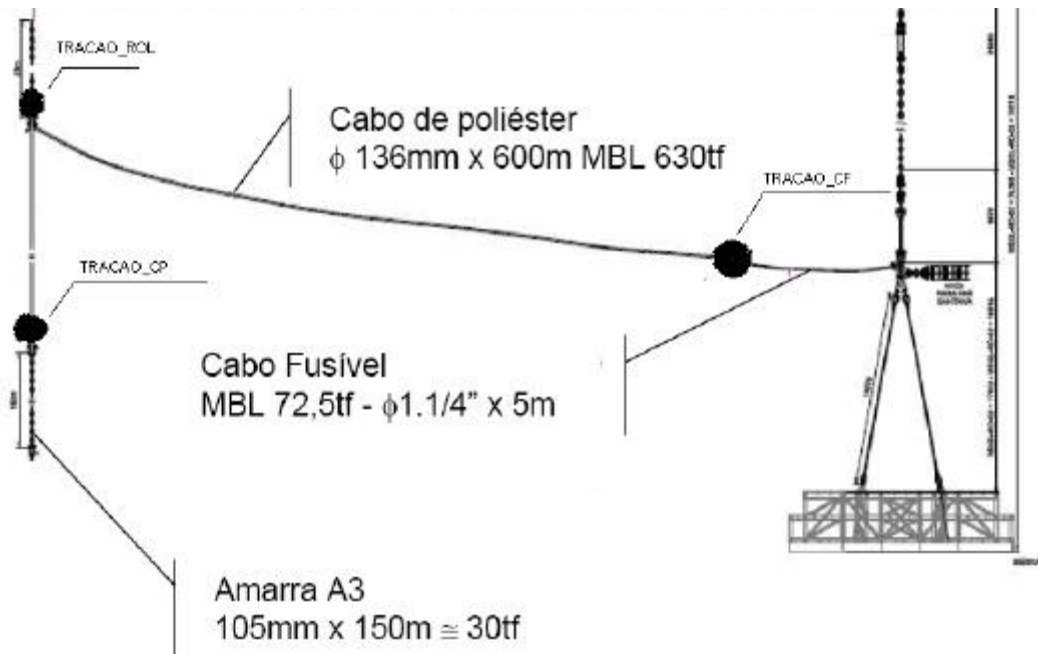


Figura 5.3m – Montagem das células de carga de acordo com as diferentes condições.

### 5.3.2.3 MATRIZ DE ENSAIO

Foram realizadas doze configurações diferentes, sendo realizado três lançamentos para cada configuração.

Tabela 5.2 – Matriz de ensaios para verificação e dimensionamento da solução mecânica adotada.

ORDEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
1	P35CA1	Célula de carga no cabo fusível e na roldana- nylon
2	P35CA2	Célula de carga no cabo fusível e na roldana - nylon
3	P35CA3	Célula de carga no cabo fusível e na roldana - nylon
4	P35CB1	Célula de carga no contra-peso - nylon
5	P35CB2	Célula de carga no contra-peso - nylon
6	P35CB3	Célula de carga no contra-peso - nylon
7	P35CC1	Célula de carga no cabo fusível e no contra-peso - nylon
8	P35CC2	Célula de carga no cabo fusível e no contra-peso - nylon
9	P35CC3	Célula de carga no cabo fusível e no contra-peso - nylon
10	P35CD1	Célula de carga no cabo fusível e no contra-peso – linha de pipa
11	P35CD2	Célula de carga no cabo fusível e no contra-peso – linha de pipa
12	P35CD2	Célula de carga no cabo fusível e no contra-peso – linha de pipa

### 5.3.2.4 RESULTADOS

As Figuras 5.3n e 5.3o mostram o sinal medido para o ensaio P35CA, nos três lançamentos.

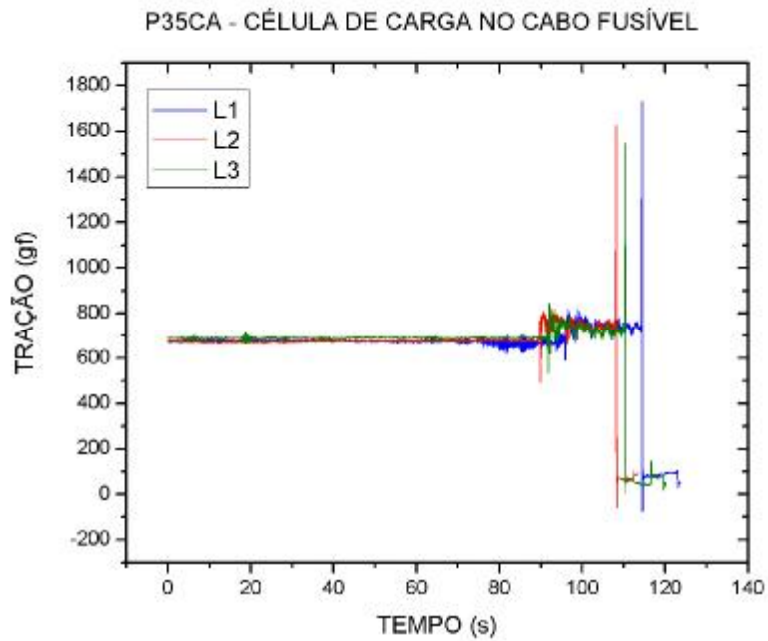


Figura 5.3n – Tração no cabo de fusível, ensaio P35CA.



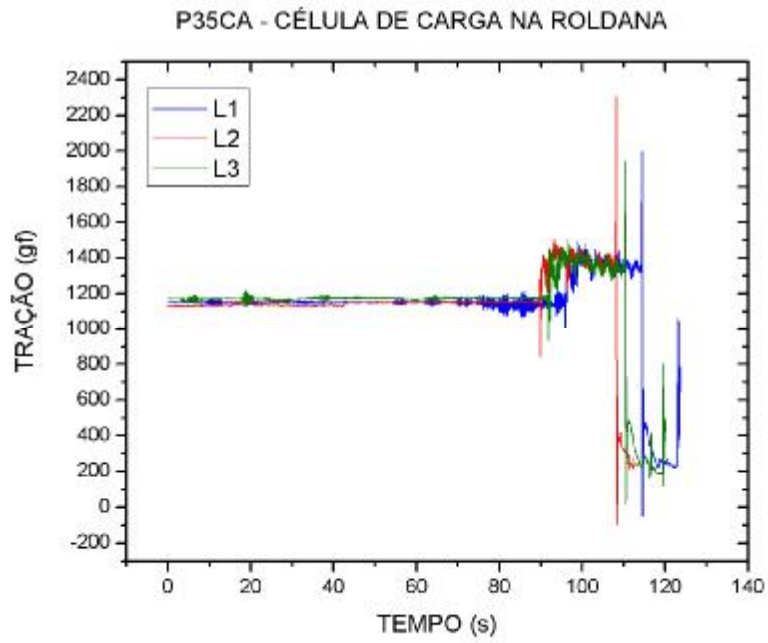


Figura 5.3o – Tração na roldana, ensaio P35CA.

As Figuras 5.3p e 5.3q mostram o sinal medido para o ensaio P35CB.

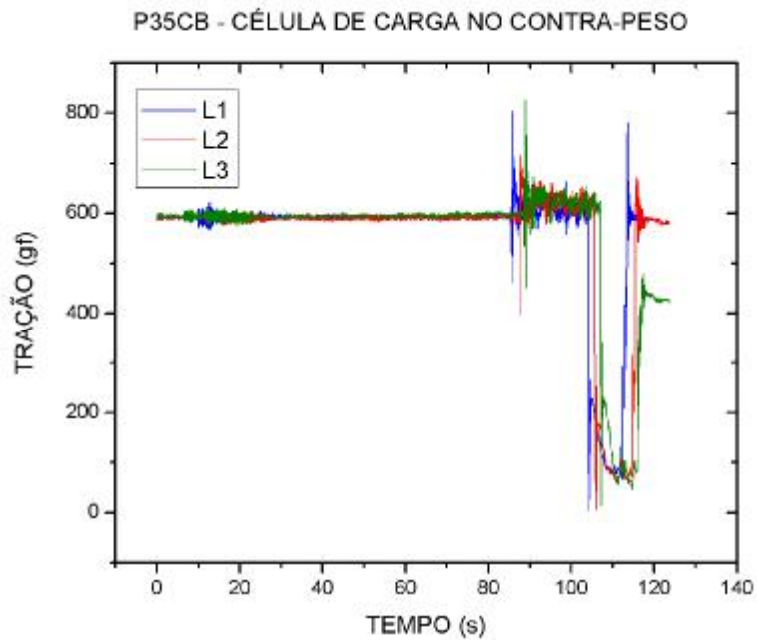
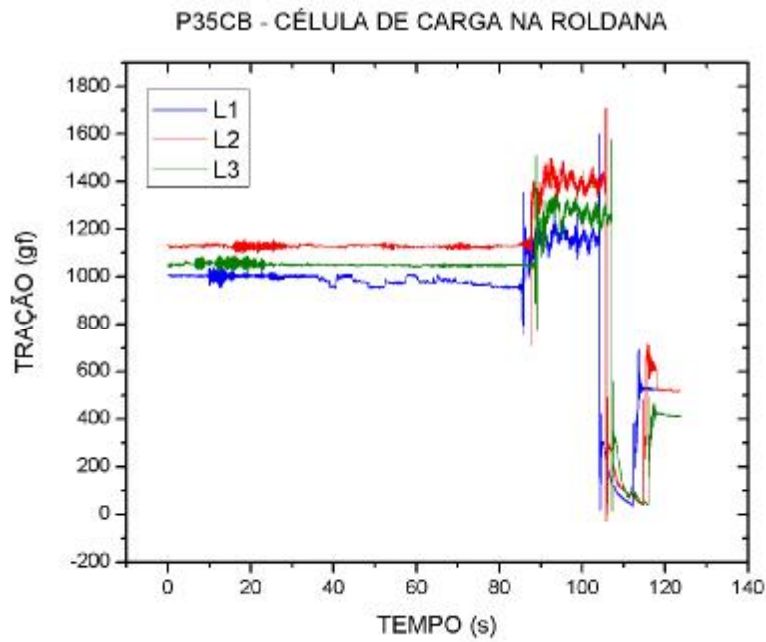
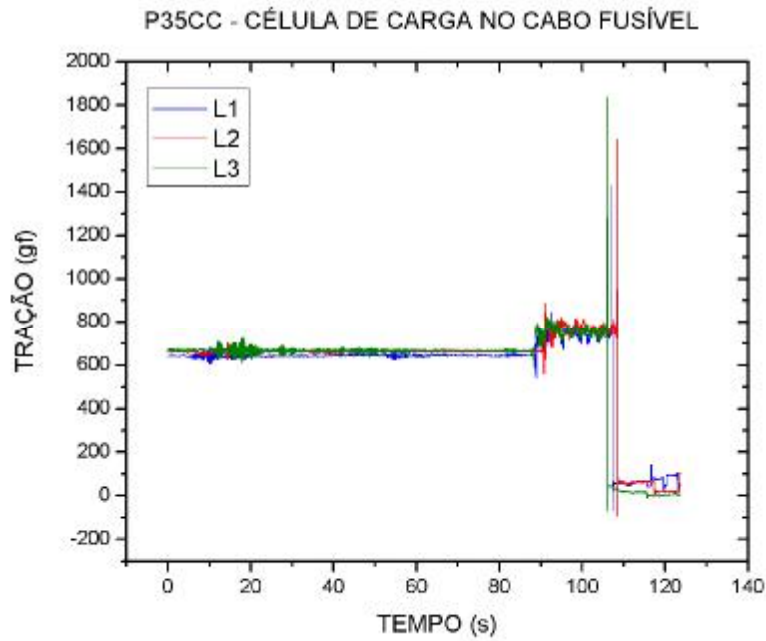


Figura 5.3p – Tração no contra-peso, ensaio P35CB.

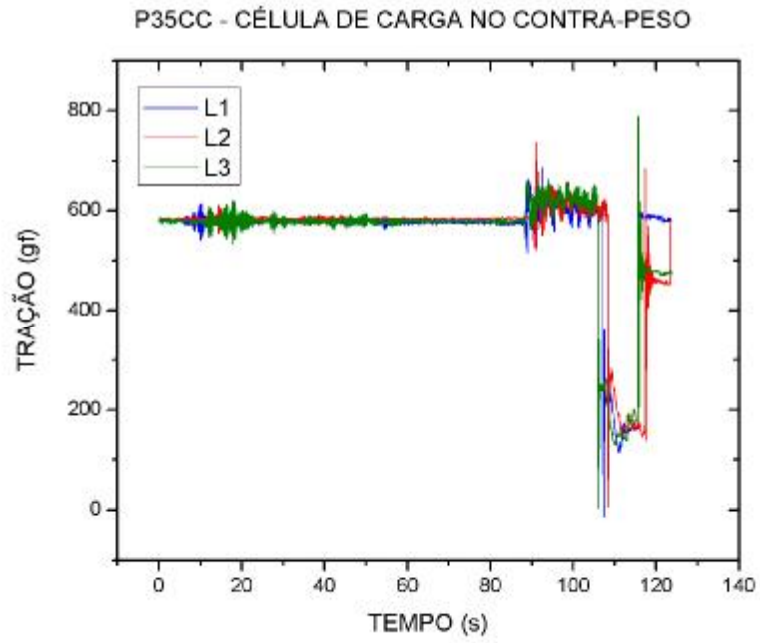


**Figura 5.3q – Tração na roldana, ensaio P35CB.**

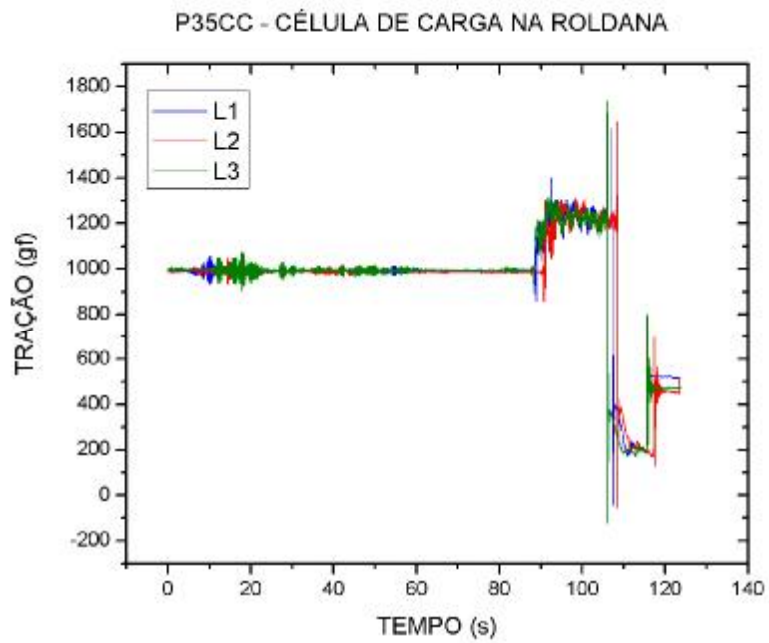
As Figuras 5.3r, 5.3s e 5.3t fornecem o sinal medido para o ensaio P35CC.



**Figura 5.3r – Tração no cabo de fusível, ensaio P35CC.**



**Figura 5.3s – Tração no contra-peso, ensaio P35CC.**



**Figura 5.3t – Tração na roldana, ensaio P35CC.**

A Figura 5.3u, 5.3v e 5.3x mostram o sinal medido para o ensaio P35CD.

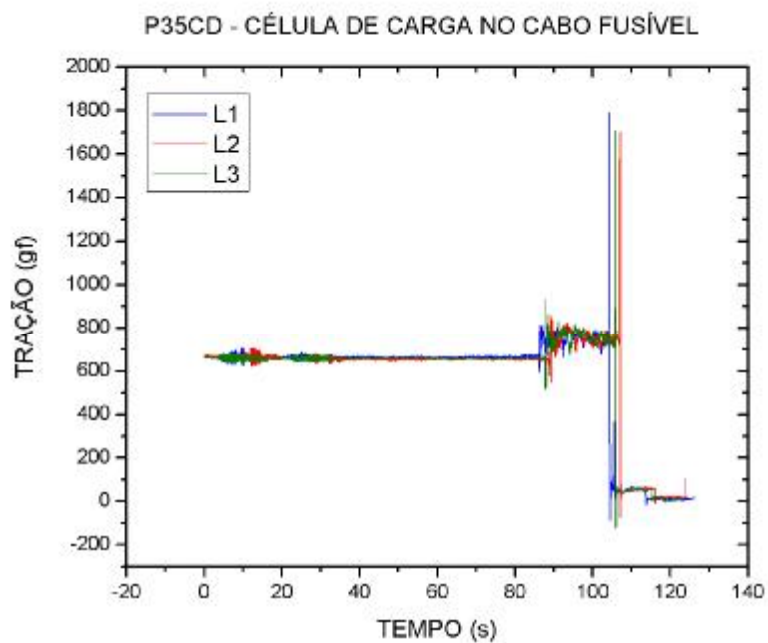


Figura 5.3u – Tração no cabo de fusível, ensaio P35CD.

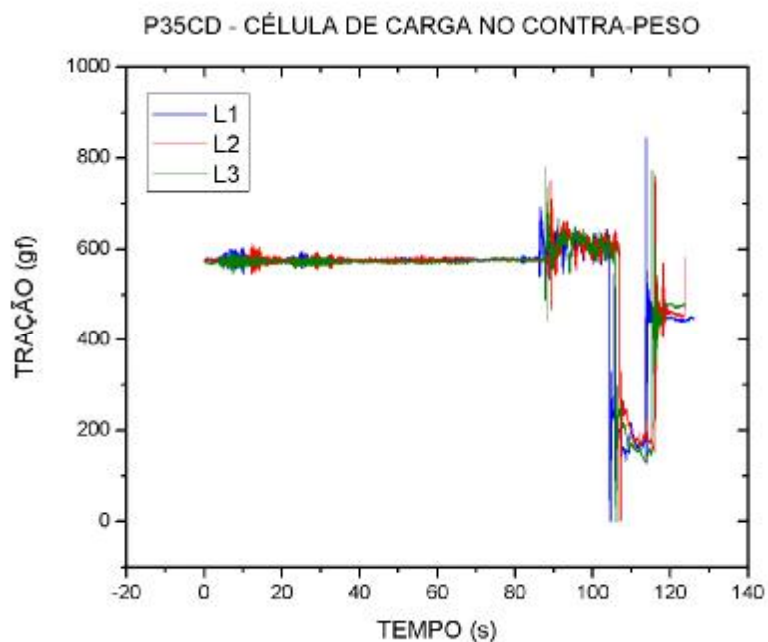
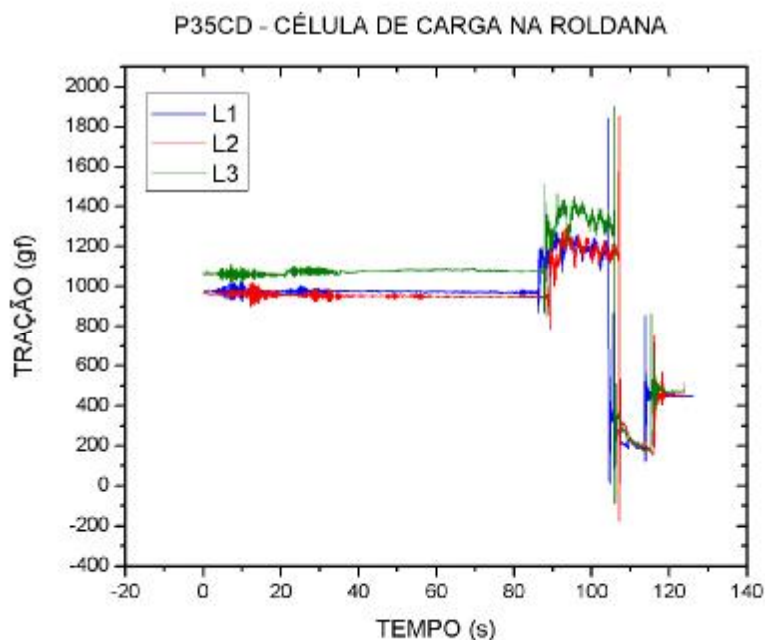


Figura 5.3v – Tração no contra-peso, ensaio P35CD.

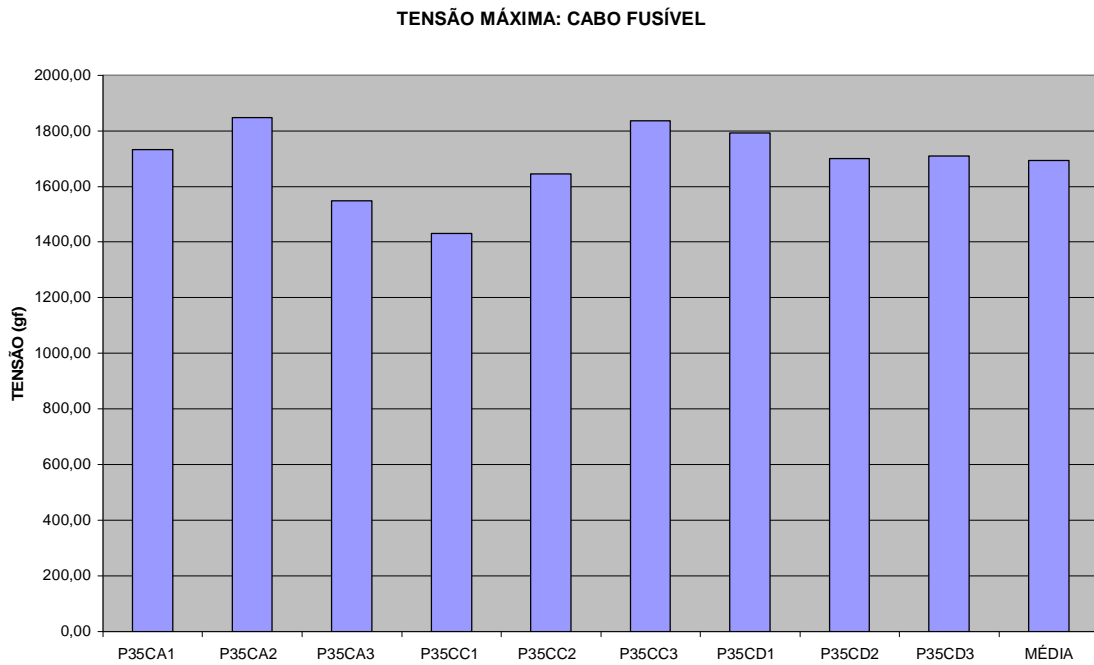


**Figura 5.3x – Tração na roldana, ensaio P35CD.**

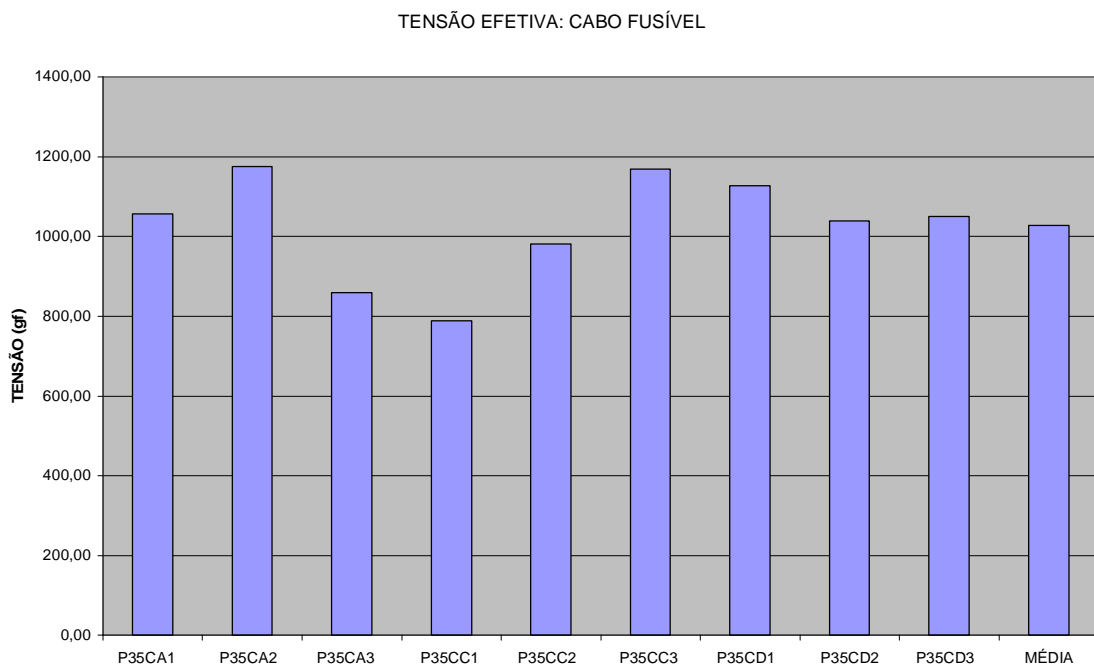
As tabelas 5.3, 5.4 e 5.5, mostram os valores máximos obtidos em cada lançamento de acordo com o seu respectivo ponto de medição, as médias dos valores iniciais e as tensões efetivas de cada lançamento. Na seqüência, é ilustrado um gráfico da tabela abaixo.

**Tabela 5.3 – Tensão no cabo fusível.**

Ensaio	Tensão Máxima no Cabo de Fusível (gf)	Média da Tensão Inicial (gf)	Tensão Efetiva no Cabo de Fusível (gf)
P35CA1	1732,7	676,4	1056,4
P35CA2	1848,4	672,6	1175,8
P35CA3	1548,4	688,6	859,9
P35CC1	1431,5	642,4	789,1
P35CC2	1643,8	663,1	980,7
P35CC3	1837,0	667,6	1169,5
P35CD1	1792,5	664,5	1128,1
P35CD2	1701,0	660,8	1040,2
P35CD3	1709,9	660,0	1049,9
MÉDIA	1693,9	666,2	1027,7



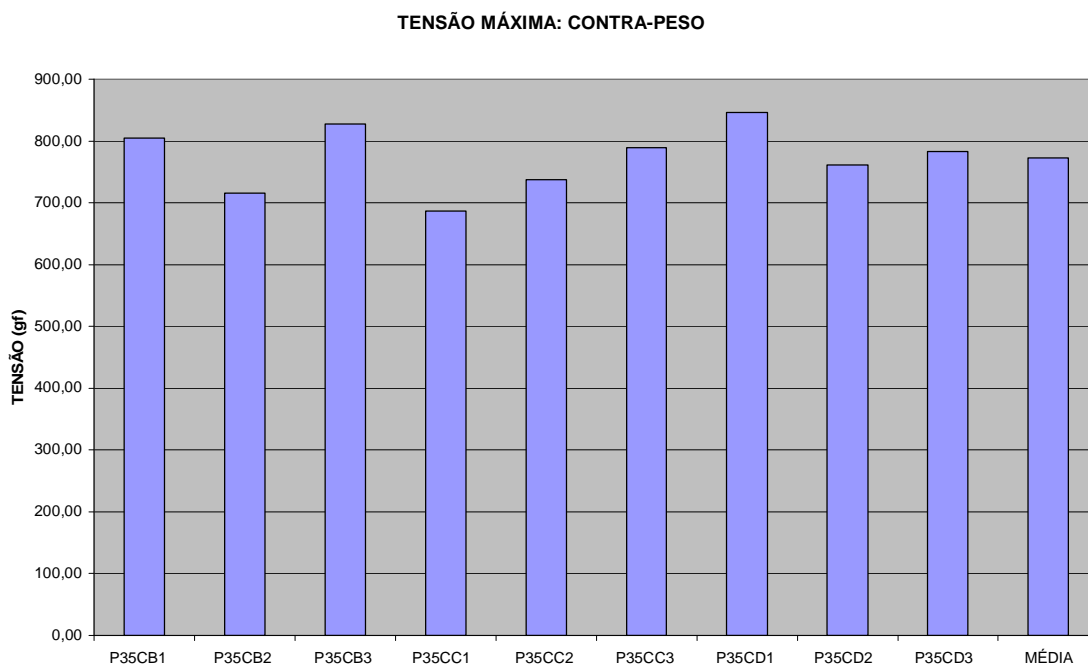
**Figura 5.3z – Tensão máxima no cabo fusível para diferentes configurações de ensaios.**



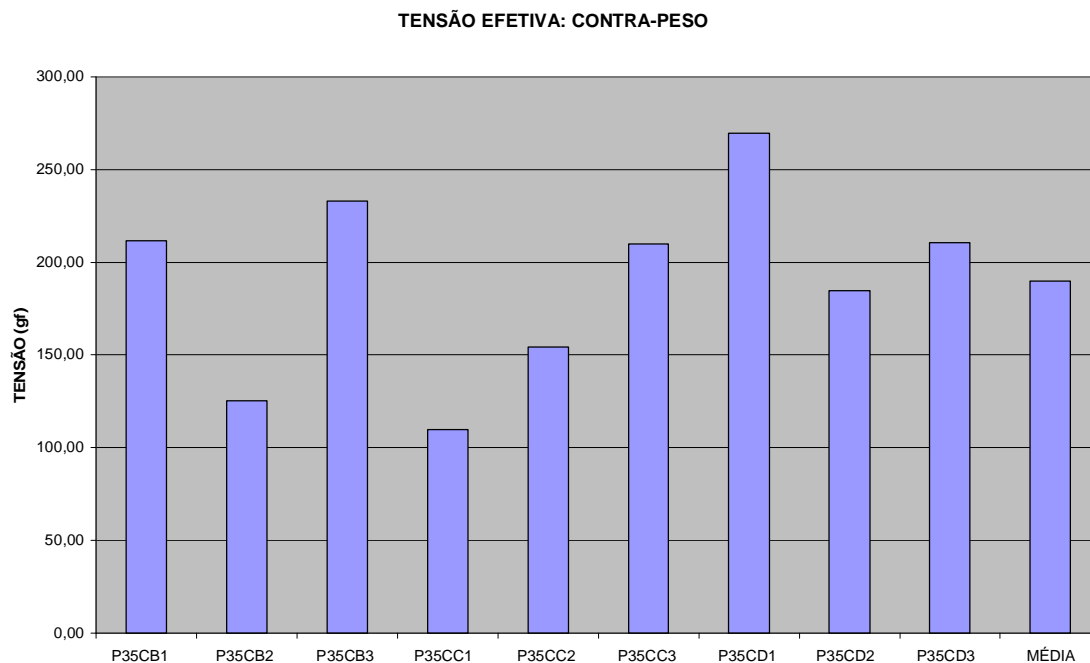
**Figura 5.3a1 – Tensão efetiva no cabo fusível para diferentes configurações de ensaios.**

**Tabela 5.3 – Tensão no contra-peso.**

Ensaio	Tensão no Máxima no Contra-Peso	Média da Tensão Inicial (gf)	Tensão Efetiva no Contra-Peso (gf)
P35CB1	804,2	592,6	211,6
P35CB2	715,5	590,4	125,2
P35CB3	827,0	594,0	232,9
P35CC1	687,3	577,5	109,8
P35CC2	737,2	582,9	154,4
P35CC3	788,6	578,7	209,9
P35CD1	846,2	576,6	269,7
P35CD2	760,9	576,3	184,7
P35CD3	782,6	572,2	210,5
MÉDIA	772,2	582,3	189,9



**Figura 5.3b1 – Tensão máxima no contra-peso para diferentes configurações de ensaios.**

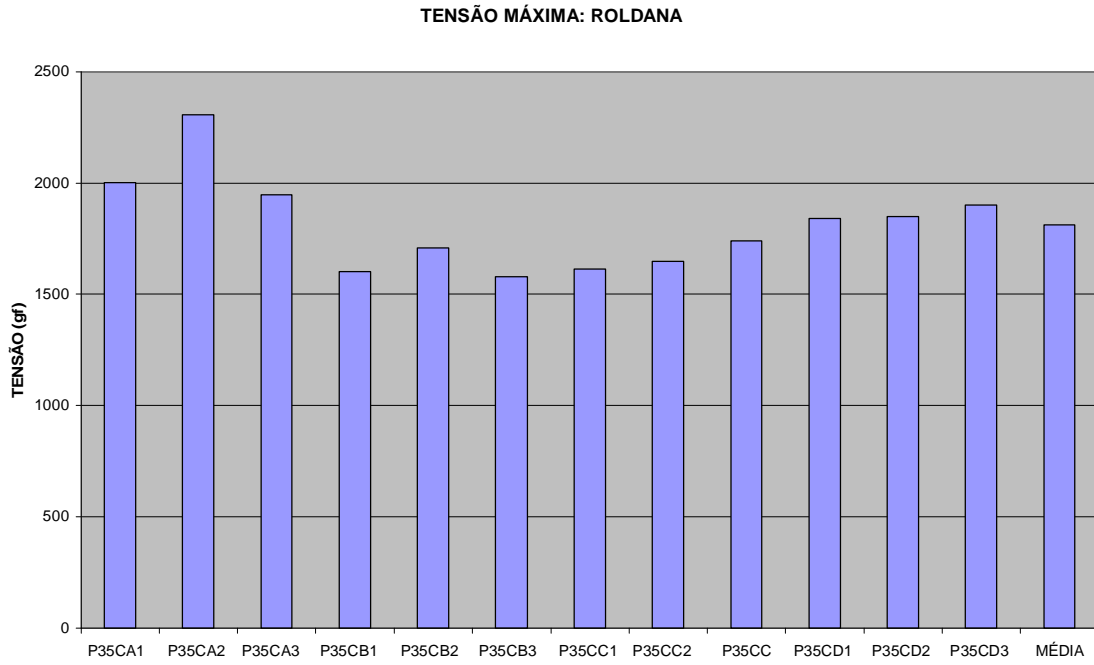


**Figura 5.3c1 – Tensão efetiva no contra-peso para diferentes configurações de ensaios.**

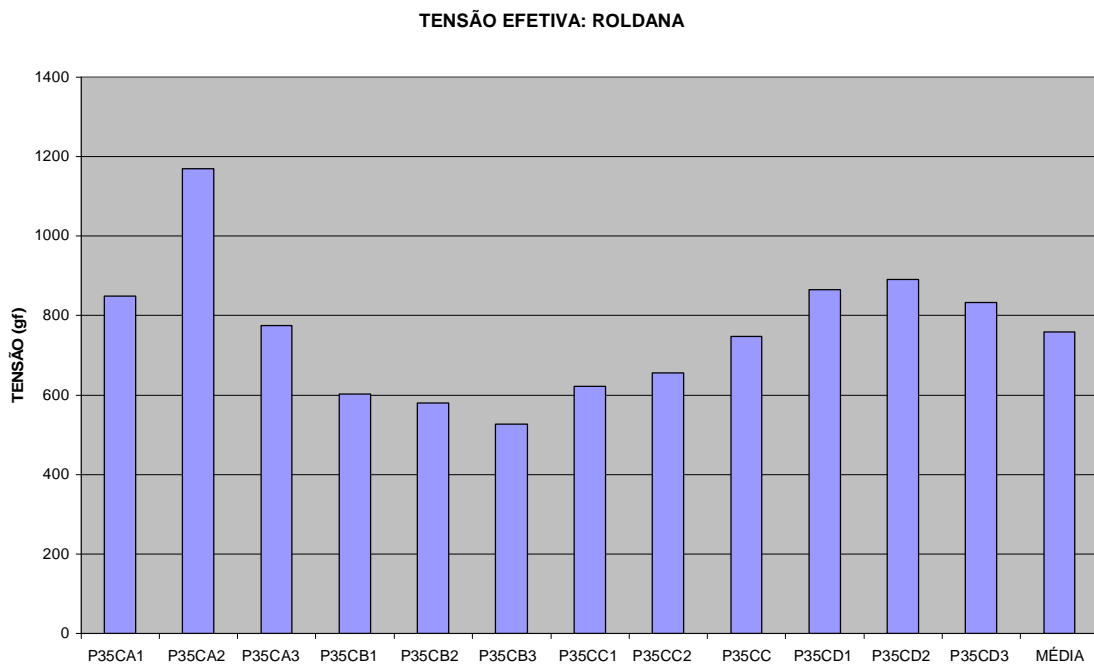
**Tabela 5.3 – Tensão na roldana.**

Ensaio	Tensão no Máxima na Roldana	Média da Tensão Inicial (gf)	Tensão Efetiva na Roldana (gf)
P35CA1	2000,8	1151,4	849,4
P35CA2	2306,8	1137,6	1169,2
P35CA3	1946,4	1171,9	774,5
P35CB1	1602,6	999,9	602,7
P35CB2	1709,9	1129,8	580,1
P35CB3	1579,3	1053,0	526,3
P35CC1	1614,3	992,5	621,8
P35CC2	1647,0	991,4	655,6
P35CC	1741,3	993,8	747,2
P35CD1	1841,8	976,6	865,3
P35CD2	1850,2	958,94	891,3
P35CD3	1902,2	1068,9	833,3
MÉDIA	1811,8	1052,2	759,7





**Figura 5.3d1 – Tensão máxima na roldana para diferentes configurações de ensaios.**



**Figura 5.3e1 – Tensão efetiva na roldana para diferentes configurações de ensaios.**

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Através dos ensaios realizados, foi possível verificar a viabilidade de instalação pendular com o uso do sistema de contra-peso.

A lingada do contra-peso foi dimensionada de modo que o cabo de fusível rompesse o mais próximo possível do fundo, pois assim, o cabo de instalação já estaria suficientemente tensionado de forma a evitar rotações excessivas no manifold.

Foram simulados dois tipos de cabo de fusível, um com linha de nylon e outro com linha de pipa número 10. Verificou-se que o fusível tipo nylon apresentou um comportamento muito elástico, enquanto que o segundo fusível tipo linha de pipa apresentou um comportamento mais rígido com uma faixa de ruptura mais definida.

Mediante estas observações e medições, é possível comprovar a eficácia do método de instalação e dimensionar o sistema de contra-peso. Para as instalações pendulares dos manifolds de Roncador, é sugerido um cabo fusível de aço com cinco metros de comprimento com carga de ruptura de 72,5 ton ( $\phi$  1 ¼ in).

Observa-se também que quanto maior a profundidade de ruptura do fusível, melhor para a instabilidade do manifold, conforme comentado anteriormente. Outros pontos também recebem destaque, entre os quais podemos observar uma menor velocidade de instalação, o que favorece a diminuição da velocidade de fluxo interno minimizando os ricos de ruptura de pequenas tubulações residentes.

## **CAPÍTULO VI – CONTROLE DO FLUTTERING POR ESTABILIZADOR FLEXÍVEL**

De forma a compreender melhor o fenômeno da oscilação observada em manifolds durante a instalação pendular, foram realizados ensaios com placa plana livre para sofrer rotação sob a incidência de um escoamento uniforme no canal de correntes do Laboratório de Ondas e Correntes - LOC/COPPE.

### **6.1 MONTAGEM DO ENSAIO NO CANAL DE CORRENTEZA**

Os ensaios foram conduzidos de forma a se obter características da rotação em função da velocidade de correnteza e da razão de aspecto da placa, testando-se inclusive um tipo de supressor para tal rotação. Também foram obtidos valores de força e torque no sentido de determinar o centro de pressão para cada ângulo de ataque, objetivando uma melhor compreensão da restauração natural da placa que causa a oscilação.

Para os ensaios cinemáticos, a placa foi bi-articulada através de um eixo que passa pelo seu centro geométrico de forma a ser livre para sofrer rotação em torno do eixo Z, como apresentado na Figura 6.1b.

Para a determinação do centro de pressão hidrodinâmico, a placa foi articulada no fundo e engastada no topo onde foram posicionados uma célula de carga e um sensor de torque.

Os ensaios cinemáticos foram realizados para placas de alumínio e PVC de forma observar o efeito da variação da inércia na resposta da placa.

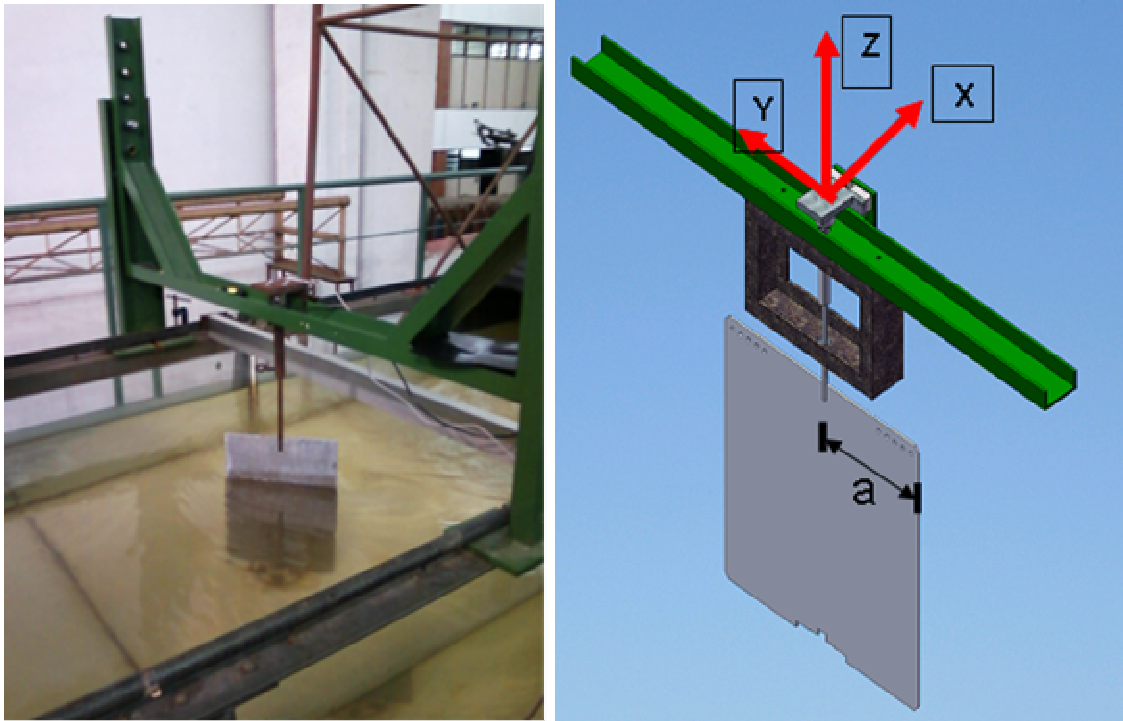


Figura 6.1a – Montagem do ensaio no LOC (a) aparato experimental. (b) ilustração dos eixos de referência.

## 6.2 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para esta primeira placa foram medidos o número de Strouhal (Equação 6.1) e o equivalente harmônico de rotação obtido de acordo com a Equação 6.2. O número de Strouhal, no caso da placa plana, é o adimensional que relaciona a velocidade do escoamento incidente, a frequência de desprendimento de vórtices e a largura da placa.

$$St = \frac{f_s(2a)}{U} \quad (6.1)$$

Onde  $St$  é o número de Strouhal,  $f_s$  é a frequência de desprendimento de vórtices,  $2a$  é a largura da placa e  $U$  é a velocidade de correnteza.

$$q_{eq} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_i^N q_i^2}{N}} \quad (6.2)$$

Onde  $q_{eq}$  é o equivalente harmônico de rotação,  $q_i$  é uma determinada amostra do sinal temporal de rotação e  $N$  é o número de amostras utilizadas.

$$Re = \frac{U(2a)}{n} \quad (6.3)$$

Onde  $Re$  é o número de *Reynolds*, e  $n$  é a viscosidade cinemática da água.

Valores experimentais do número de *Strouhal* para diferentes geometrias imersas em um escoamento, tão bem como o coeficiente de arrasto para cada geometria para números de *Reynolds* acima de 1000 podem ser obtidos de (HOERNER, 1958). A Equação 6.3 apresenta a definição do número de *Reynolds* para a placa plana.

Para fins de comparação, a Figura 6.2a apresenta um gráfico experimental onde o coeficiente de arrasto é relacionado com o número *Strouhal* para corpos de diferentes geometrias imersos em escoamento uniforme. Os valores de referência para a placa plana são  $C_D = 2$  e  $St = 0.18$ .

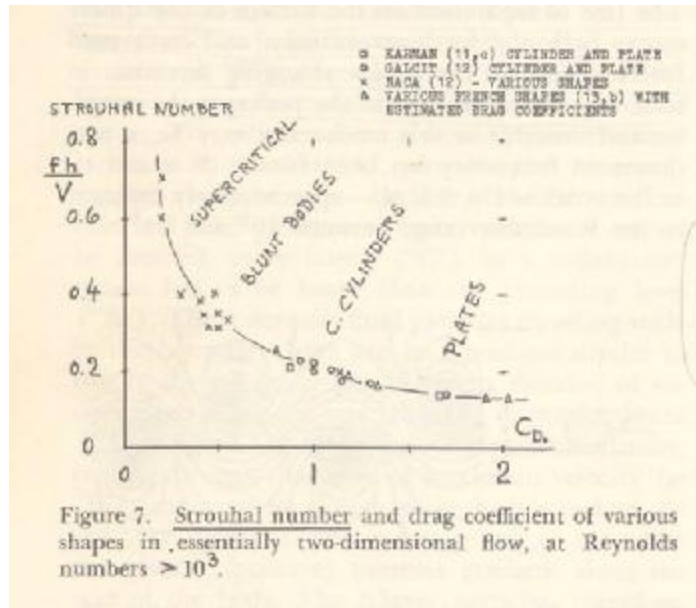


Figura 6.2a – Número de *Strouhal* versus coeficiente de arrasto para corpos de diferentes geometrias (HOERNER, 1958).

### 6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 6.3a e 6.3b apresentam respectivamente o equivalente harmônico de rotação obtido em função das velocidades de correnteza imposta, e o número de *Strouhal* obtido em função do número de *Reynolds* para todos os modelos de placa testados. A Figura 6.3c apresenta uma relação entre a frequência de oscilação da placa e a frequência de desprendimento de vórtices.

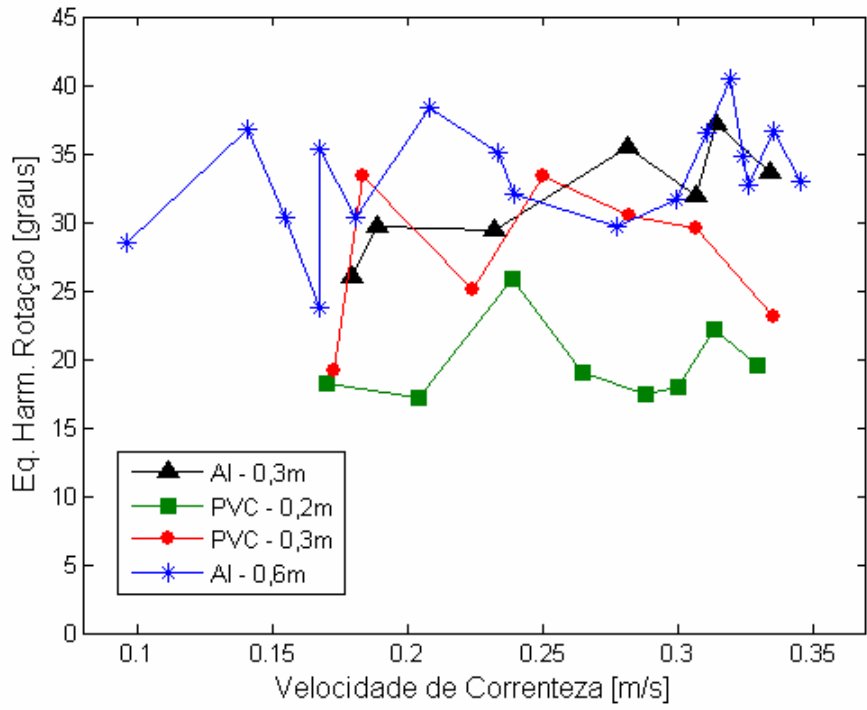


Figura 6.3a – Equivalente harmônico de rotação para diferentes velocidades de correnteza.

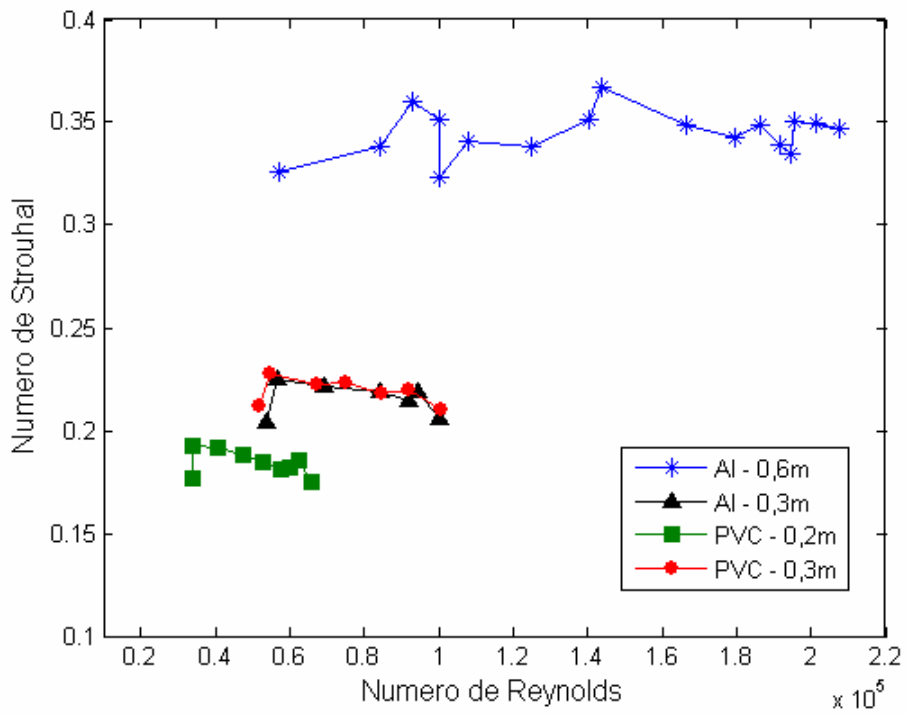
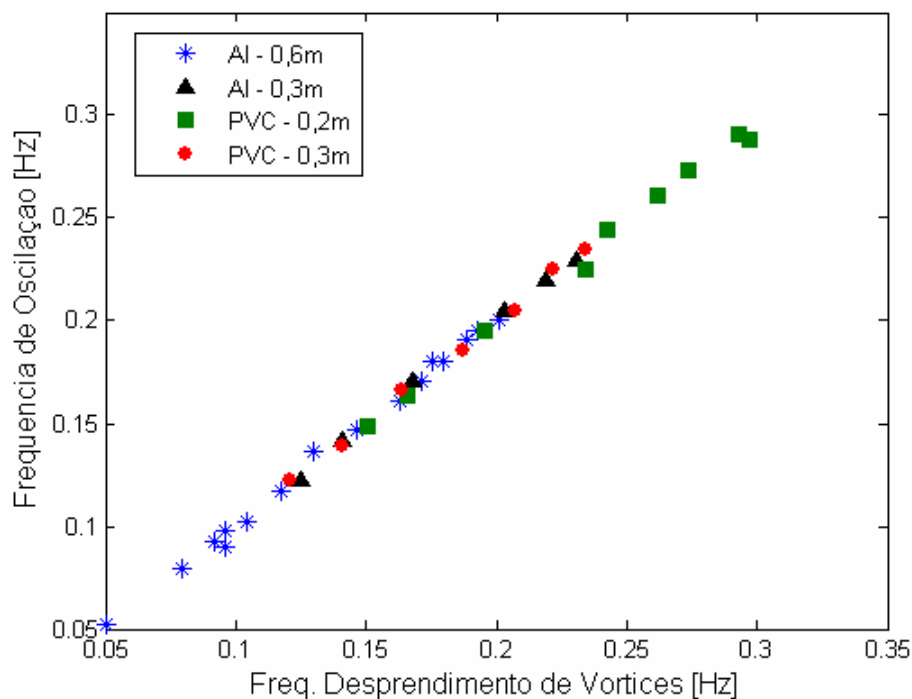


Figura 6.3b – Número de Strouhal versus número de Reynolds.



**Figura 6.3c – Frequência de oscilação versus frequência de desprendimento de vórtices.**

### **6.3.1 PLACA DE ALUMÍNIO A = 0,6 M**

Inicialmente, com o objetivo de reproduzir o fenômeno observado em manifolds, uma placa de alumínio de 0,6 m de largura e 5,8 kg de massa foi testada. Como mencionado anteriormente, a placa é bi-articulada com um grau liberdade somente (rotação em torno do eixo  $z$  – Figura 6.1a). O calado foi de 0,5 m e a espessura da placa é de 5 mm.

A rotação foi obtida colocando-se um potenciômetro no topo da placa alimentado por uma fonte de tensão contínua. A tensão de saída do potenciômetro foi obtida a partir de um sistema de aquisição (NI 9172 em conjunto com o módulo universal NI 9219) que possui conversores A/D. O sinal digitalizado foi visualizado e registrado através de um software construído em Labview 8.2.

A frequência de oscilação foi obtida por análise espectral do sinal de rotação obtido para cada velocidade de correnteza incidente. Os Apêndices IV, V, VI, VII, VIII e IX apresentam as séries temporais e o espectro da resposta de rotação, para cada medida obtida em todas as placas testadas em ensaios cinemáticos, assim como a série

temporal de velocidade na esteira da placa em conjunto com a respectiva análise espectral.

A frequência de desprendimento de vórtices foi obtida através de análise espectral do sinal obtido de um medidor de velocidades para escoamentos. O medidor utilizado foi *Acoustic Doppler Velocimeter* – ADV, que foi posicionado em um ponto na esteira da placa.

A velocidade de correnteza incidente na placa foi obtida a partir de um medidor de correnteza do tipo turbina, posicionado à montante da placa.

A placa de alumínio de 0,6m de largura apresenta pouca variação do equivalente harmônico da rotação e do número de Strouhal para a faixa de velocidade de correnteza imposta para o ensaio. Esta placa também apresenta uma dependência da frequência de oscilação em relação à frequência de desprendimento de vórtices, sendo totalmente governada pela mesma. Ainda no que se refere ao número de Strouhal, pode-se perceber que o mesmo se diferencia do resultado apresentado na Figura 6.2a (HOERNER, 1958), sendo aproximadamente o dobro do esperado.

### **6.3.2 PLACA DE ALUMÍNIO A = 0,3 M**

Uma vez que o canal de correntes do LOC/COPPE possui largura de 1,5m, supôs-se que o alto valor do número de Strouhal para a placa de 0,6m poderia ter sido acarretado por um efeito de parede. De forma a verificar tal suposição, uma placa de alumínio de 0,3m de largura foi testada sob as mesmas condições.

A partir dos resultados apresentados para esta placa, pode-se concluir que o comportamento da placa de 0,3m de largura em termos de equivalente harmônico de rotação e frequência de oscilação possui muita semelhança com a placa de 0,6m de largura. Pode-se inclusive observar que o equivalente harmônico de rotação possui amplitude semelhante para as duas placas. No que se refere ao número de Strouhal, pôde-se perceber que a redução da largura da placa fez com que o número de Strouhal se aproximasse mais do valor esperado conforme (HOERNER, 1958).



### **6.3.3 PLACA DE PVC A1 = 0,3M E A2 = 0,2M**

No sentido de se observar o efeito da variação da inércia no comportamento da placa plana, duas placas de PVC foram testadas com larguras 0,3 e 0,2 metros. A massa das placas é respectivamente 1,3 e 1,48 kg. As respectivas espessuras são 5 e 8 mm.

Observa-se dos resultados que a placa de PVC de 0,3 metros apresenta comportamento muito próximo ao comportamento da placa de alumínio com mesma largura. A placa de PVC de 0,2 metros de largura, por sua vez, apresentou equivalente harmônico de rotação menor em relação às outras placas. Conclui-se que esta diminuição deve-se mais à diminuição da largura da placa e do efeito parede do que à diminuição na inércia. Tal conclusão é reforçada pelo número de Strouhal apresentado por esta placa que é praticamente idêntico ao valor esperado.

### **6.4 DETERMINAÇÃO DO CENTRO DE PRESSÃO VS ÂNGULO DE ATAQUE: PLACA ALUMÍNIO 0,3 METROS**

Uma vez que a variação da inércia não permitiu conclusões a respeito do comportamento da placa, buscou-se um estudo do efeito de restauração em função do ângulo de ataque do escoamento em relação à placa. Para tal, medições do torque e da força na placa foram realizadas de forma a se determinar o centro de pressão para cada ângulo de ataque. Tal estudo também é motivado pela característica irregular da rotação ao longo do tempo que pode ser observada nos resultados apresentados no apêndices.

#### **6.4.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE CARGAS**

O aparato experimental utilizado para a medição de cargas na placa foi montado de acordo com os detalhes apresentados na Figura 6.4a. Como mencionado anteriormente, uma célula de carga e um sensor de torque foram posicionados no topo da placa.

Tais sensores foram calibrados já posicionados no aparato montado, colocando-se massas distribuídas ao longo da altura e da largura da placa de forma a exercerem força na direção do escoamento. As curvas de calibração dos sensores são apresentadas nas Figuras 6.4b e 6.4c.

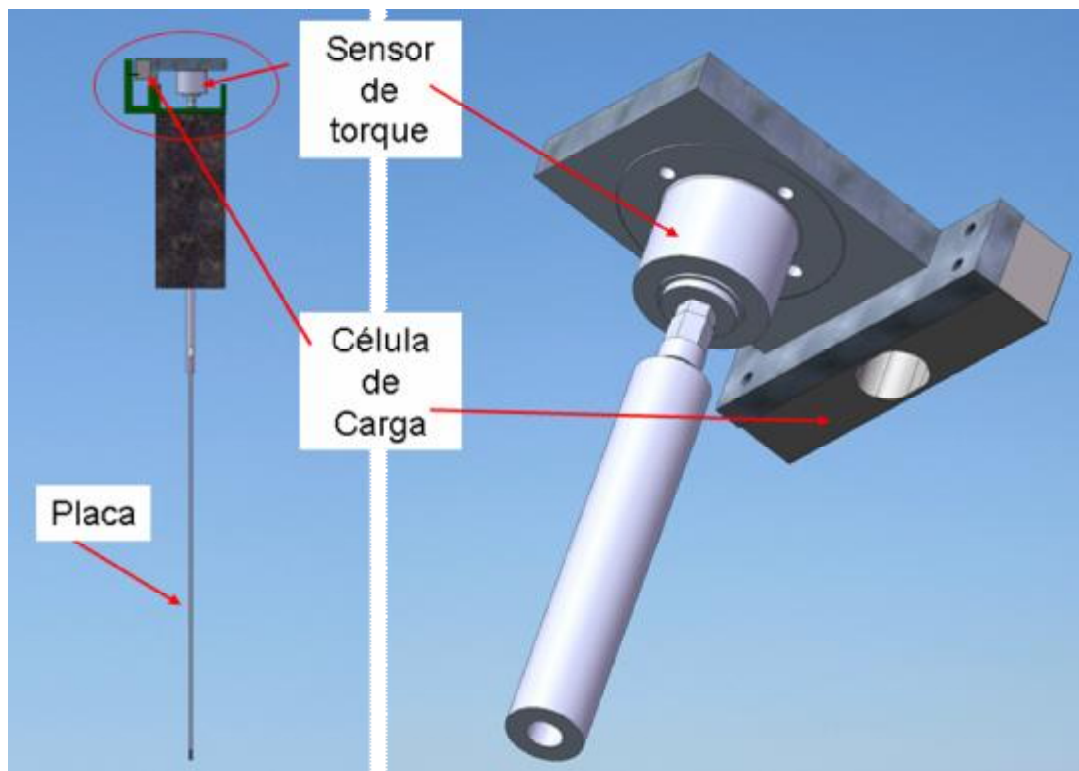


Figura 6.4a – Esquema do aparato experimental em vista lateral e detalhes da montagem do sensor de torque e da célula de carga.

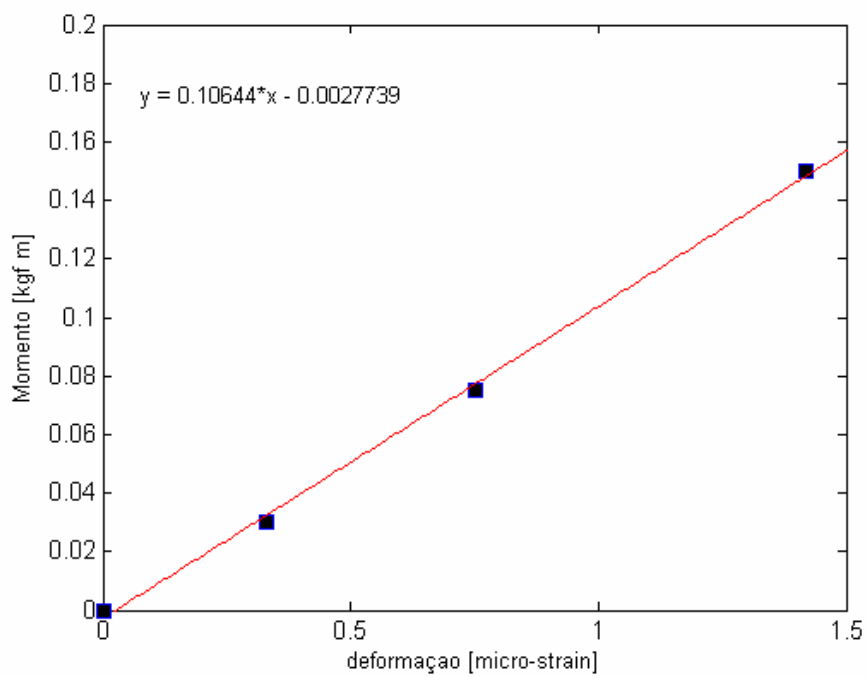
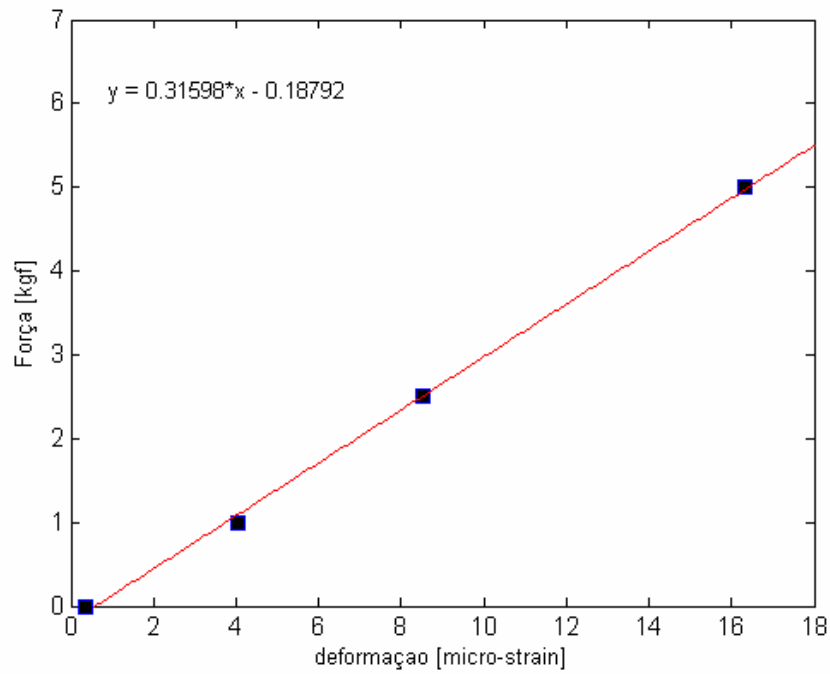


Figura 6.4b – Curva de calibração da célula de carga.



**Figura 6.4c – Curva de calibração do sensor de torque.**

A aquisição dos dados da célula de carga foi feita utilizando-se o mesmo sistema de aquisição descrito para o potenciômetro. A aquisição dos dados do sensor de torque foi feita utilizando-se um condicionador analógico de sinais que amplifica e filtra o sinal antes de ser digitalizado. As Figuras 6.4d (a) e (b) apresentam respectivamente fotos do sistema de aquisição para a célula de carga e o sensor de torque.



Figura 6.4d – Sistema de aquisição para (a) célula de carga (b) sensor de torque.

#### 6.4.2 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Foram realizadas medições do coeficiente de arrasto  $C_D$ , do coeficiente de sustentação  $C_L$ , e do coeficiente de torque  $C_N$  para duas diferentes velocidades de correnteza. A convenção adotada para o sinal das cargas na placa segue a orientação dos eixos definidos na Figura 6.1a em (b). Os coeficientes foram obtidos segundo as equações 6.4, 6.5 e 6.6. E por fim, o centro de pressão na placa foi determinado a partir da Equação 6.7.

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho (2a) L U^2} \quad (6.4)$$

Onde  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $F_x$  possui módulo obtido a partir da raiz da média dos quadrados do sinal de força na direção da correnteza,  $L$  é o calado,  $U$  é a velocidade de correnteza e  $q$  é o ângulo de ataque do escoamento em relação à placa que possui valor zero quando a placa é transversal ao escoamento.

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2} r(2a)LU^2} \quad (6.5)$$

Onde  $C_L$  é o coeficiente de arrasto e  $F_y$  possui módulo obtido a partir da raiz da média dos quadrados do sinal de força medido na direção transversal à direção da correnteza para cada ângulo de ataque.

$$C_N = \frac{M_z}{\frac{1}{2} r(2a)L^2U^2} \quad (6.6)$$

Onde  $C_N$  é o coeficiente de torque e  $M_z$  possui módulo obtido a partir da raiz da média dos quadrados do sinal de torque e sinal idêntico ao da sua média.

$$C.P. = \frac{M_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \quad (6.7)$$

Onde  $C.P.$  é a coordenada do centro de pressão seguindo a convenção do sistema de coordenadas apresentado na Figura 6.1a em (b).

### 6.4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6.4e apresenta os valores de  $C_D$  em função do ângulo de ataque do escoamento em relação à placa para duas velocidades de correnteza: 0,29 m/s e 0,39 m/s. A Figura 6.4f apresenta os resultados para  $C_L$  e a Figura 6.4g apresenta resultados para o coeficiente de torque  $C_N$ .

O Apêndice VII apresenta as séries temporais da força  $F_Y$  e do torque  $M_Z$  para cada ângulo de ataque nas duas velocidades de correnteza em que foram feitas as medições.

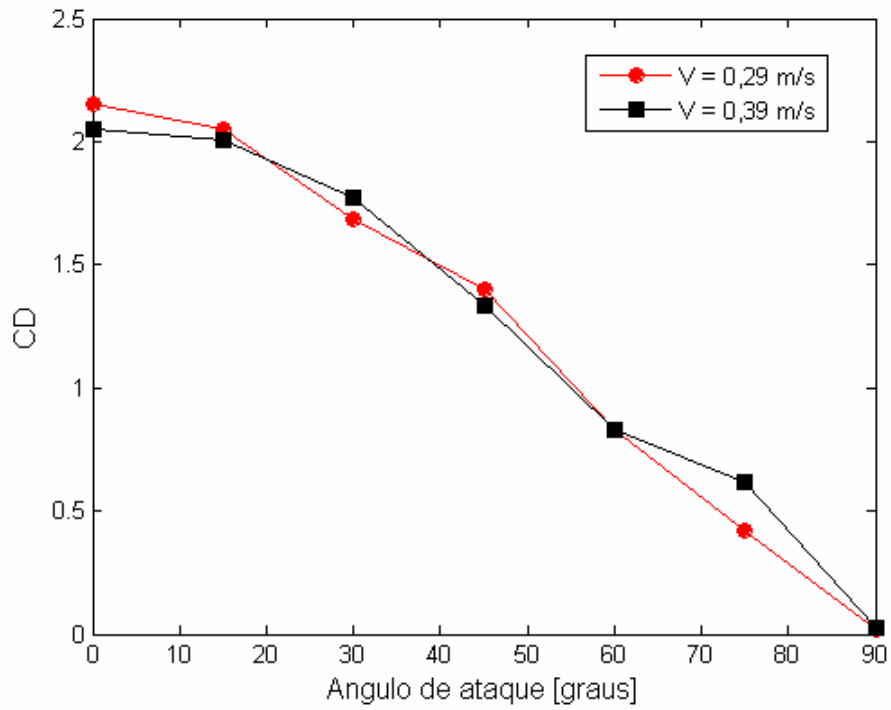


Figura 6.4e – Coeficiente de arrasto para a placa em função do ângulo de ataque.

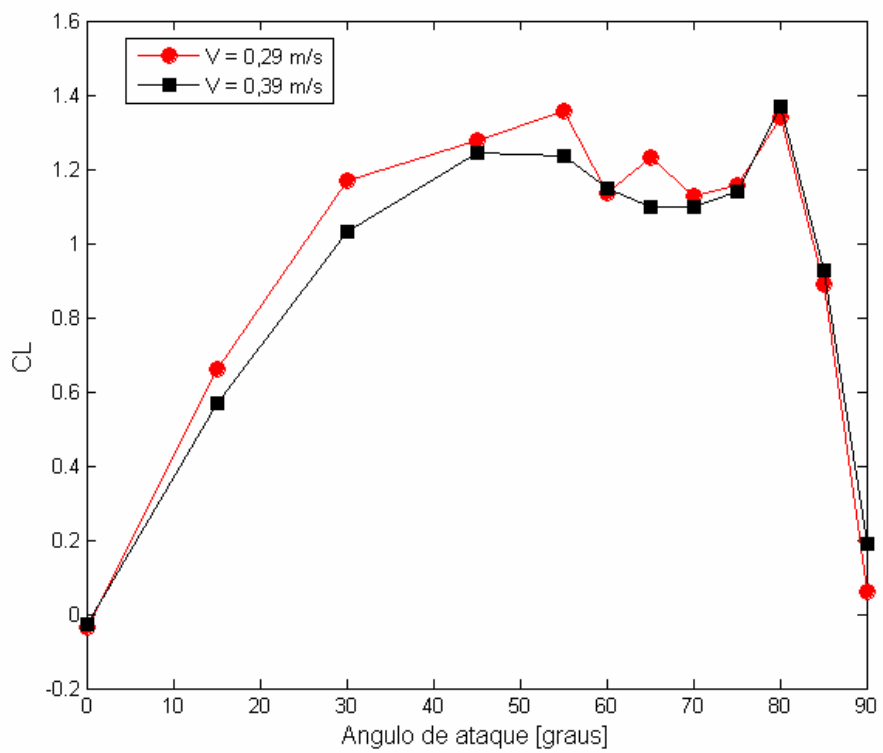
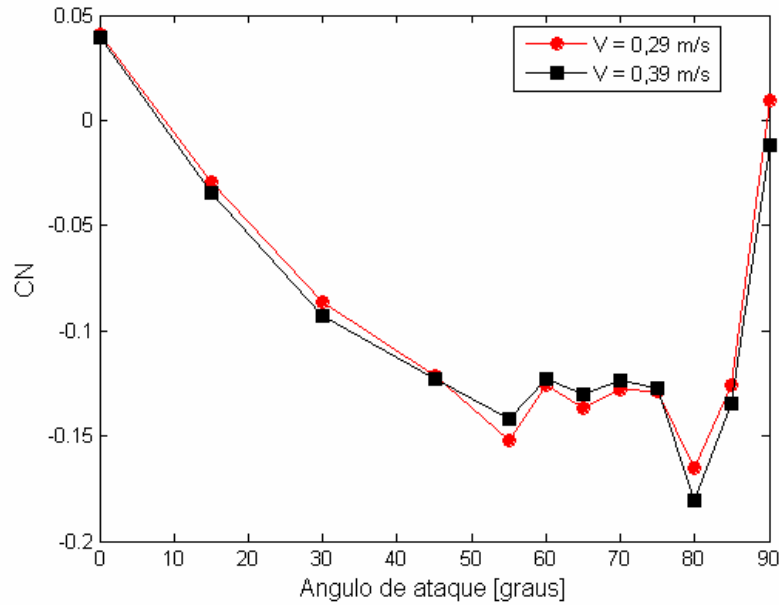


Figura 6.4f – Coeficiente de sustentação para a placa em função do ângulo de ataque.



**Figura 6.4g – Coeficiente de torque para a placa em função do ângulo de ataque.**

Observando-se os resultados, pode-se perceber uma validação do aparato experimental através da medida do coeficiente de arrasto para quando o ângulo de ataque é igual a zero (placa transversal ao escoamento). O valor do coeficiente de arrasto próximo de 2 para as três velocidades de correnteza testadas está de acordo com os resultados apresentados na Figura 6.2a (HOERNER, 1958).

Pode-se observar também que a partir de aproximadamente 20 graus o torque torna-se negativo fazendo com que a restauração seja maior do que a excitação. Isto ocorre para as duas velocidades de correnteza testadas. A Figura 6.4h apresenta então, para fins de confirmação, a coordenada do centro de pressão (C.P.) para cada ângulo de ataque medido. O Valor de C.P é dado em termos de porcentagem em relação à largura da placa. Para fins de exemplificação, C.P. igual a 0,2 significa que o centro de pressão localiza-se em um ponto situado na placa a  $0,2 \cdot (2a)$  de distância em relação à extremidade da placa de frente para o escoamento.

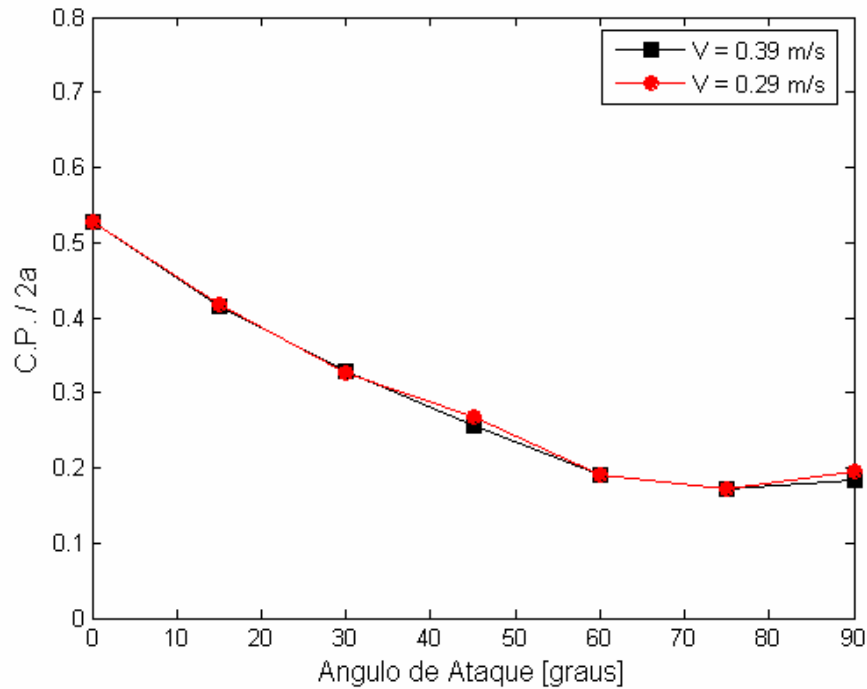


Figura 6.4h – Centro de pressão em função do ângulo de ataque.

## 6.5 SOLUÇÃO PROPOSTA PARA MINIMIZAR O FLUTTERING: ESTABILIZADOR FLEXÍVEL

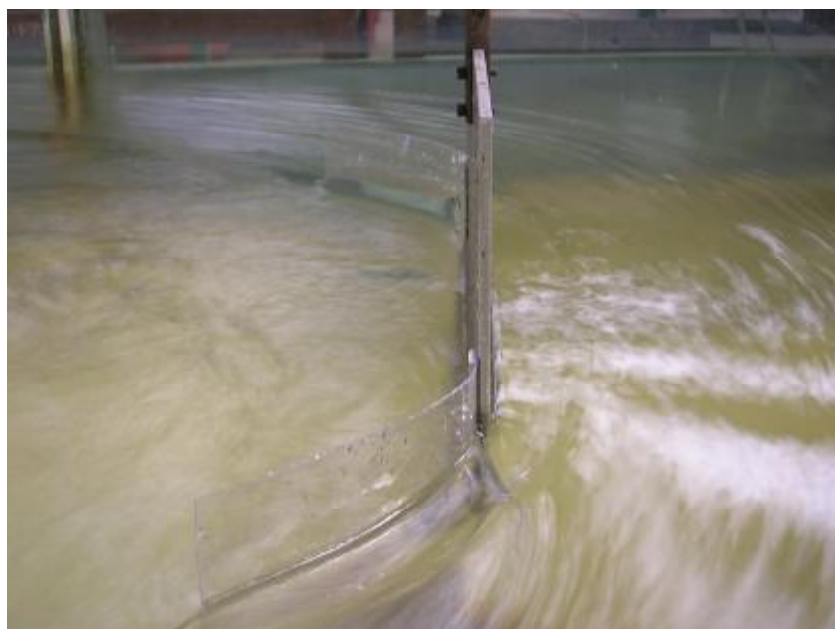
Uma vez determinada a placa a ser estudada (alumínio de 0,3 metros de largura) com um mínimo efeito de parede envolvido e uma inércia razoável, procurou-se propor uma solução para a redução da rotação na placa plana objetivando-se uma redução do *fluttering* em manifolds em aplicações reais de instalação pendular conforme apresentado anteriormente.

Diversas configurações foram apresentadas e testadas no LOC. A figura 6.5a e 6.5b ilustram duas configurações sendo testadas no canal de corrente.





**Figura 6.5a – Ensaio da placa de alumínio com lonas laterais.**



**Figura 6.5b – Ensaio da placa de alumínio com estabilizador flexível.**

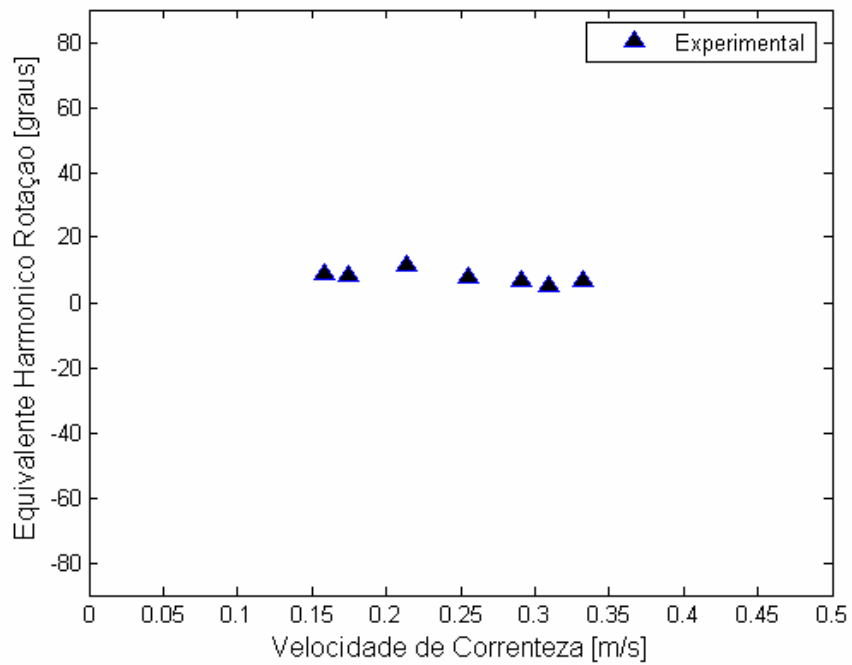
Por meio da análise visual da configuração proposta na Figura 6.5a, é verificado grandes rotações na placa. Fato este explicado pela “baixa resistência” da lona ao movimento, o que não ocasiona uma modificação significativa no formato do escoamento nos limites da placa plana.

A solução proposta é a introdução de estabilizadores constituídos de lâminas flexíveis nas extremidades da placa.

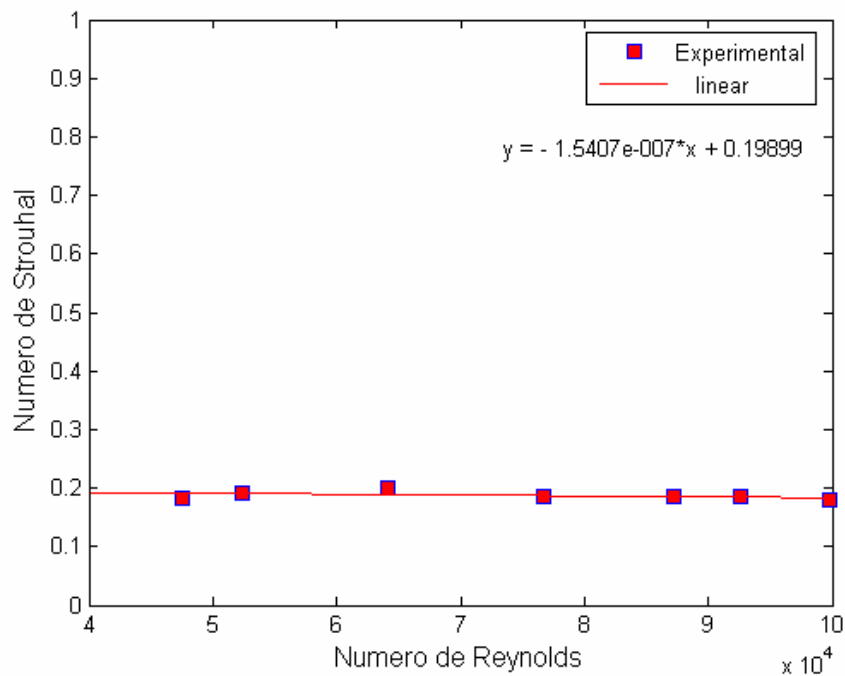
A motivação principal é uma possível diminuição da diferença de pressão entre as regiões à montante e à jusante da placa através do retardamento da separação e da conseqüente diminuição da energia do vórtice desprendido, se aumentado assim a estabilidade do sistema que seria conseqüência direta do deslocamento do centro de pressão para o centro da placa através do estabilizador flexível.

Os estabilizadores possuem largura de 0,17 m, altura de 0,5m e espessura de 0,5 mm. O material utilizado para a construção dos estabilizadores é o polímero Politereftalato de etila (PET) comumente utilizado em garrafas de refrigerantes. O módulo de elasticidade para tal material gira em torno de 1.0 – 1.8 GPa dependendo do teor de fibra de vidro contido e da qualidade da fabricação. A massa distribuída ao longo de seu comprimento é de 0,118 kg/m. Em escala real, o modelo de estabilizadores estudado corresponderia à lâminas de aço (Módulo de Elasticidade aproximadamente igual a 210 GPa), com comprimento igual ao do manifold ( $L$  aproximadamente igual a 16 m), largura igual a 2,89 metros e espessura de aproximadamente 0,67 mm. O valor da espessura foi obtido igualando-se a rigidez elástica à flexão para os dois modelos.

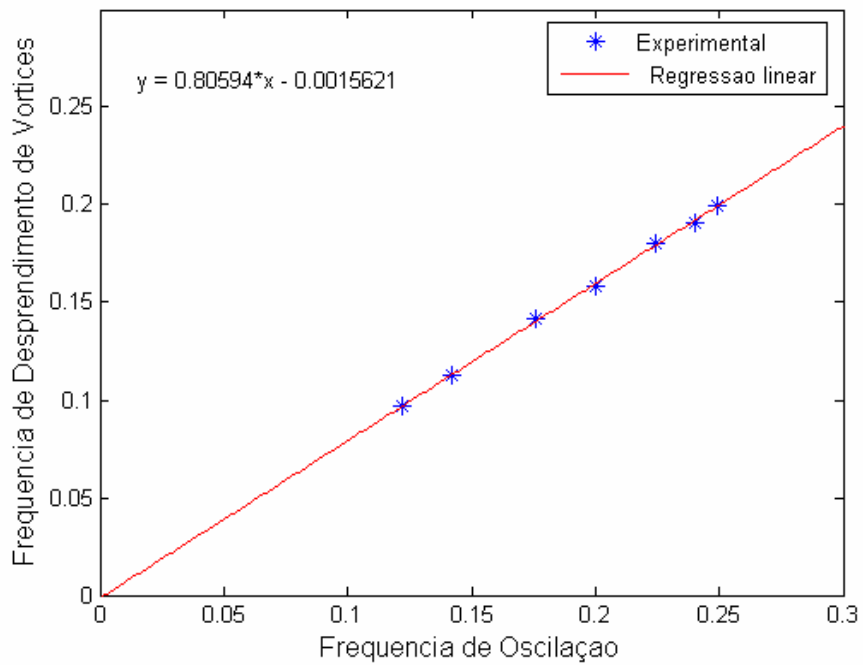
As Figuras 6.5c, 6.5d e 6.5e apresentam as características do comportamento cinemático da placa de alumínio de 0,3 metros de largura com o estabilizador flexível na extremidade. A Figura 6.5f apresenta uma comparação do equivalente harmônico de rotação para a placa de 0,3 metros de largura com e sem o estabilizador flexível.



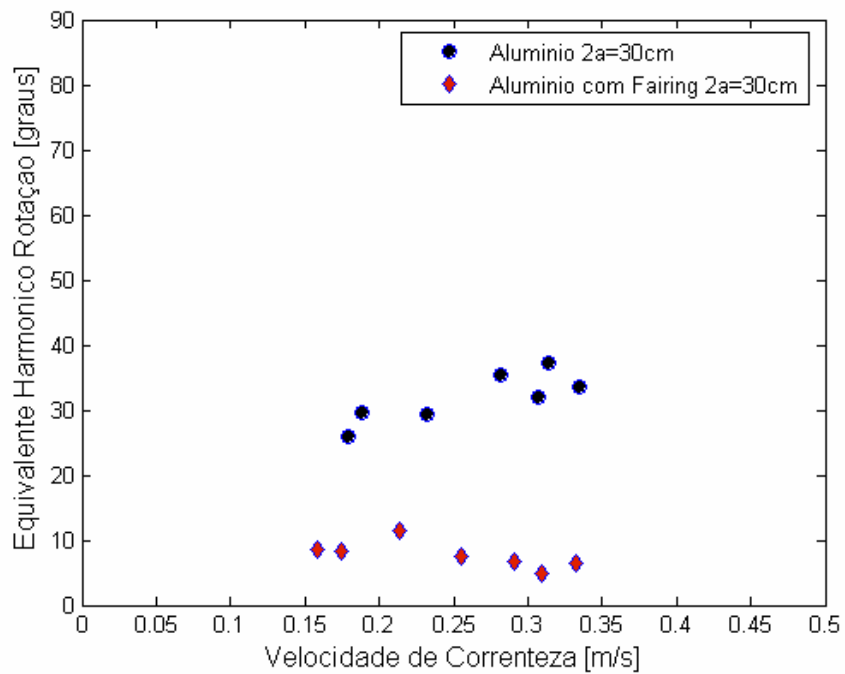
**Figura 6.5c – Equivalente harmônico de rotação para cada velocidade de correnteza para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com estabilizador flexível.**



**Figura 6.5d – Número de Strouhal versus número de Reynolds para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com o estabilizador flexível.**



**Figura 6.5e –** Frequência de oscilação versus frequência de desprendimento de vórtices para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com o estabilizador flexível.



**Figura 6.5f –** Comparação do equivalente harmônico de rotação para cada velocidade de correnteza para a placa de alumínio de 0,3 metros de largura com e sem o estabilizador flexível.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Observa-se da comparação apresentada na Figura 6.5f que a solução por do uso de estabilizadores flexíveis é muito efetiva no sentido de diminuir a rotação na placa. Observa-se também uma redução na inclinação da reta (Figura 6.5e) que representa a relação entre a frequência de desprendimento de vórtices e a frequência de oscilação da placa.

Em geral, observando-se o comportamento do número de Strouhal para a placa estática e transversal ao escoamento, percebe-se que possivelmente o fenômeno, para as velocidades estudadas, apresenta camada limite laminar uma vez que o número de Strouhal permanece praticamente constante para toda a faixa estudada.

No que se refere ao aparato experimental, através de comparações entre a Figura 6.2a e o ensaio base (ângulo de ataque 0 graus) com a placa de 0,3 m de largura, pode-se afirmar que tanto a estrutura de sustentação quanto a instrumentação foram bem adequados à este tipo de ensaio, uma vez que os valores do coeficiente de arrasto e do número de Strouhal se aproximam dos resultados esperados.

Conclui-se também que as variações na inércia da placa não alteraram significativamente seu comportamento em termos de rotações. A restauração por sua vez é predominante e governa o comportamento da placa como pode ser observado nos resultados para o centro de pressão e para os coeficientes de drag, lift e torque. A partir do momento em que a placa passa a ter torque negativo, significa que a força de restauração é maior que a de excitação, fazendo com que haja uma desaceleração do movimento da placa e uma inversão no sentido da rotação.

A causa desta inversão no sentido da força e do torque está diretamente relacionada com o formato do escoamento e com a existência de um momento desestabilizador (restaurador para o caso da placa plana transversal) denominado Momento de Munk (TRIANTAFYLLOU, 2002) deve ser causado pela assimetria avante e a ré dos pontos de estagnação quando o corpo está inclinado perante o escoamento.

Observa-se também, através das séries temporais de rotação apresentadas nos apêndices que há uma intermitência entre pequenas e grandes rotações ao longo do tempo, sugerindo uma possível bifurcação na relação entre a rotação e o momento restaurador.

## CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES

Os ensaios experimentais realizados motivam naturalmente uma extensão do trabalho no que se refere a um aprofundamento no comportamento hidrodinâmico do manifold conforme comentado em seguida.

Primeiramente, os lançamentos verticais mostraram-se eficazes no levantamento das propriedades hidrodinâmicas dos modelos em termos de coeficientes de arrasto e de massa adicional, permitindo-se inclusive a aferição de um modelo matemático que leva em conta a velocidade terminal para o cálculo destes coeficientes.

Na seqüência das conclusões, apresentam-se aquelas de ordem prática, ou seja, as que contribuem efetivamente para o procedimento de instalação pendular.

O fato de maior importância observado nos ensaios, refere-se às rotações locais excessivas nos instantes iniciais do lançamento, isto é, antes do cabo de conexão sofrer tração. A esse comportamento, o trabalho associou a palavra instabilidade. Nesse sentido, também deve ser observada a instabilidade estática. Esta última associa-se à combinação de excessiva altura do centro de gravidade (KG) e pouca altura do centro de carena (KB). Essa instabilidade é inicial na medida em que a partir de certo nível de tracionamento, o manifold segue sem rotações excessivas até sua completa verticalização. A surpresa vem do fato de que nos ensaios prospectivos anteriores (caso de Roncador 1) as oscilações assim como o capotamento não foram observados, provavelmente devido ao excesso de flutuadores usados naqueles ensaios, o que proporcionou um aumento da altura do centro de carena.

Quanto às rotações parece haver a ocorrência de um fenômeno típico de VIV (Vibração Induzida por Vorticidade). Para uma determinada velocidade terminal, há uma oscilação que estaria sendo excitada pela geração alternada de vórtices sendo que a frequência de desprendimento de vórtices governa completamente a frequência de oscilação. Isto pode ser observado nos ensaios com placa plana conforme discutido no Capítulo VI.

Essas citadas rotações locais poderiam ser impeditivas do método de lançamento pendular. Entretanto, o trabalho até aqui tem evidenciado que é possível diminuir muito e possivelmente eliminar esse comportamento desde que algumas providências relativamente simples sejam tomadas.

O uso de abas laterais, em especial as posicionadas perto da sub-base, mostrou-se eficaz.

Por outro lado, notou-se que o uso de cabo invertido e o uso de bombonas colaboram em menor grau para a estabilidade. O motivo básico é o aumento efetivo da posição vertical do centro de carena (KB).

Assim como o uso de furos na sub-base colabora em um grau maior para a estabilidade. Da mesma forma, em grau maior, o fechamento lateral do manifold com placas anti-porosidade é mais efetivo.

A grande conclusão de ordem prática até o momento é que, a partir destas comparações, apesar das rotações excessivas, na média, se podem obter resultados para a tração (bem abaixo da carga de ruptura). Isso é constatável tanto pelos ensaios quanto pelas análises numéricas realizadas no projeto. Mostra-se que na verdade o método em si para o lançamento pendular usando linhas flexíveis confinou a tração máxima dentro da máxima permitida usada no dimensionamento do cabo de instalação.

Ensaio complementares realizados e ilustrados nos Capítulos V e VI fornecem indícios de uma completa eliminação da instabilidade inicial. Conforme descrito no Capítulo V, a utilização do sistema de contra-peso para minimizar a velocidade de queda livre do manifold minimiza também as rotações no corpo. Entretanto para a realização desta operação em escala real, faz-se necessário um acréscimo de tempo na operação para montagem da configuração proposta, o que acarreta um acréscimo no custo da operação. A utilização de um estabilizador flexível, conforme discutido e apresentado no Capítulo VI mostra-se promissor uma vez que a sua utilização reduz o equivalente harmônico das rotações em 75%. Esta redução efetiva na oscilação deve-se ao fato do estabilizador flexível jogar o vortex para longe da placa e de o mesmo não resistir ao momento causado pelo escoamento sobre a placa.

Finalmente, deve-se ter presente a constante utilização de ensaios em escala reduzida suficientemente bem projetados como uma forma de antecipar problemas durante a instalação.

## **7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Recomenda-se a continuação do estudo quanto à influência da utilização de estabilizadores flexíveis nas rotações de placas planas e corpos esbeltos, assim como a

prospecção de novos métodos de supressão desse movimento objetivando uma constante redução dos custos da instalação.

Faz-se necessário uma continuação do estudo de forma a determinar dimensões ótimas para o estabilizador flexível que garantam uma combinação de máxima supressão e mínima geometria (largura x comprimento x espessura).

Recomenda-se também um cuidado maior quanto à posição do centro de gravidade e conseqüentemente do centro de carena do manifold de forma a aumentar a estabilidade inicial.

Deve-se também buscar elementos para esclarecer o comportamento do centro de aplicação das forças hidrodinâmicas em função do ângulo de incidência do escoamento (momento de Munk, formação de vórtices e arrasto). A isto está relacionada a oscilação rotacional observada.

Além dos estudos experimentais, utilizar em conjunto com estes, métodos numéricos mais precisos ao menos nos instantes iniciais de lançamento. Estão nessa categoria programas como o FLUENT e o CFX. Propõe-se para isso uma metodologia baseada em ensaios com placa plana e aferição/desenvolvimento de um modelo analítico para o seu comportamento.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELMONTE, A., EISENBERG, H. and MOSES, E., “From Flutter to Tumble: Inertial Drag and Froude Similarity in Falling Paper”, *Physical Review Letters*, Vol. 81, Number 2, 13 July, 1998.
- BÖNISCH, S. and HEUVELINE, V., “On the Numerical Simulation of the Instationary Free Fall of a Solid in a Fluid. in the Newtonian Case”, *Elsevier Science*, 17 June, 2004.
- FERNANDES, A.C., ESPERANÇA, P.T.T., SPHAIER, S.H., et. al., “VIV Mitigation: Why not Porosity”, XIX International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (ETCE/OMAE2000 Joint Conference). New Orleans, Estados Unidos, February 14-17, 2000.
- FERNANDES, A.C., SANTOS, M.F., RIBEIRO, M., et. al., “Avaliação do Método Pendular de Instalação de Manifold através de Análise Numérica e Ensaios com Modelo Reduzido no LabOceano”, Relatório Final, para PETROBRAS, Rio de Janeiro, Maio, 2004.
- FERNANDES, A.C., SANTOS, M.F., ARAUJO, J.B., et al., “Hydrodynamic Aspects of the Torpedo Anchor Installation”, XXIV International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2005); paper OMAE2005-67201, Halkidiki, Greece, June 12-17, 2005a;
- FERNANDES, A.C., SANTOS, M.F., MINEIRO, F.P.S., et al., “Análise da Instalação do Segundo Manifold de Roncador através de Lançamento Pendular sob a Luz de Métodos Numéricos e Ensaios com Modelos Reduzidos em Diferentes Escalas (PEN06518)”, Relatório Técnico, Etapa 2, Versão 1, para FMC TECHNOLOGIES DO BRASIL LTDA COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Julho, 2005b.

FERNANDES, A.C., SANTOS, M.F., MINEIRO, F.P.S., et al., “Análise da Instalação do Segundo Manifold de Roncador através de Lançamento Pendular sob a Luz de Métodos Numéricos e Ensaio com Modelos Reduzidos em Diferentes Escalas (PEN06518)”, Relatório Técnico, Etapa 3, Versão 2, para FMC TECHNOLOGIES DO BRASIL LTDA COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Julho, 2005c.

FERNANDES, A.C., SANTOS, M.F., MINEIRO, F.P. and NEVES, C.R. “Análise da Instalação do Segundo Manifold de Roncador através de Lançamento Pendular sob a Luz de Métodos Numéricos e Ensaio com Modelos Reduzidos em Diferentes Escalas (PEN06518)” Relatório Etapa 4, versão 2a, Dezembro, 2005d.

FERNANDES, A.C., MINEIRO, F.P.S., NEVES, C.R. e SALES, J.S “Análise da Instalação do Segundo Manifold de Roncador através de Lançamento Pendular sob a Luz de Métodos Numéricos e Ensaio com Modelos Reduzidos em Diferentes Escalas (PEN06518)”, Relatório Técnico, Etapa 4, Versão 2b, para FMC TECHNOLOGIES DO BRASIL LTDA COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Dezembro, 2005e.

FERNANDES, A.C., MINEIRO, F.P.S. e NEVES, C.R., “Comments on Manifold Fluttering”, Relatório Técnico, Versão 1, para FMC TECHNOLOGIES DO BRASIL LTDA, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Fevereiro, 2006.

HOERNER, S. F., Fluid-Dynamic Drag Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance, Hardcover 1958.

MINEIRO, F.P.S. “Propriedades Hidrodinâmicas de Corpos de Geometria Complexa como Manifolds para Operação em Águas Profundas”, Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2006.

NEVES, C.R. “Instalação de Manifolds em Águas Profundas pelo Método Pendular à Luz de Ensaios com Modelos Reduzidos em Tanque Oceânico e Verificação Numérica”, Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2005.

NEWMAN, J.N., “Marine Hydrodynamics”, The Massachusetts Institute of Technology, 1978.

ORCINA SOFTWARE Ltd., “Visual Orcaflex User Manual, UK, 2005.

PESAVENTO, U. “Unsteady Aerodynamics of Falling Plates”, Phd. Thesis dissertation, Cornell University, USA, January, 2006.

RIBEIRO, M., BOAS, M.V., e FERREIRA, J.A.N., “Subsea Manifold Design for Pendulous Installation Method in Ultra Deep Water”, Workshop on the Pendulous Installation Method (PIM) for Deployment of Heavy Subsea Hardware in Ultra Deepwater - 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Hamburg, Germany, 2006.

SCHACHTER, R.D., JORDANI, C.G. and FERNANDES, A.C., “A Design Approach for Storage Spar Buoy Platforms in the Concept and Preliminary Design Phases”, XXI International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE); Oslo, Noruega, June 23-28, 2002.

TRIANAFYLLOU, M. S. and HOVER, F. S., Maneuvering and Control of Marine Vehicles, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts USA

## **APÊNDICE I – DESENHOS DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM**





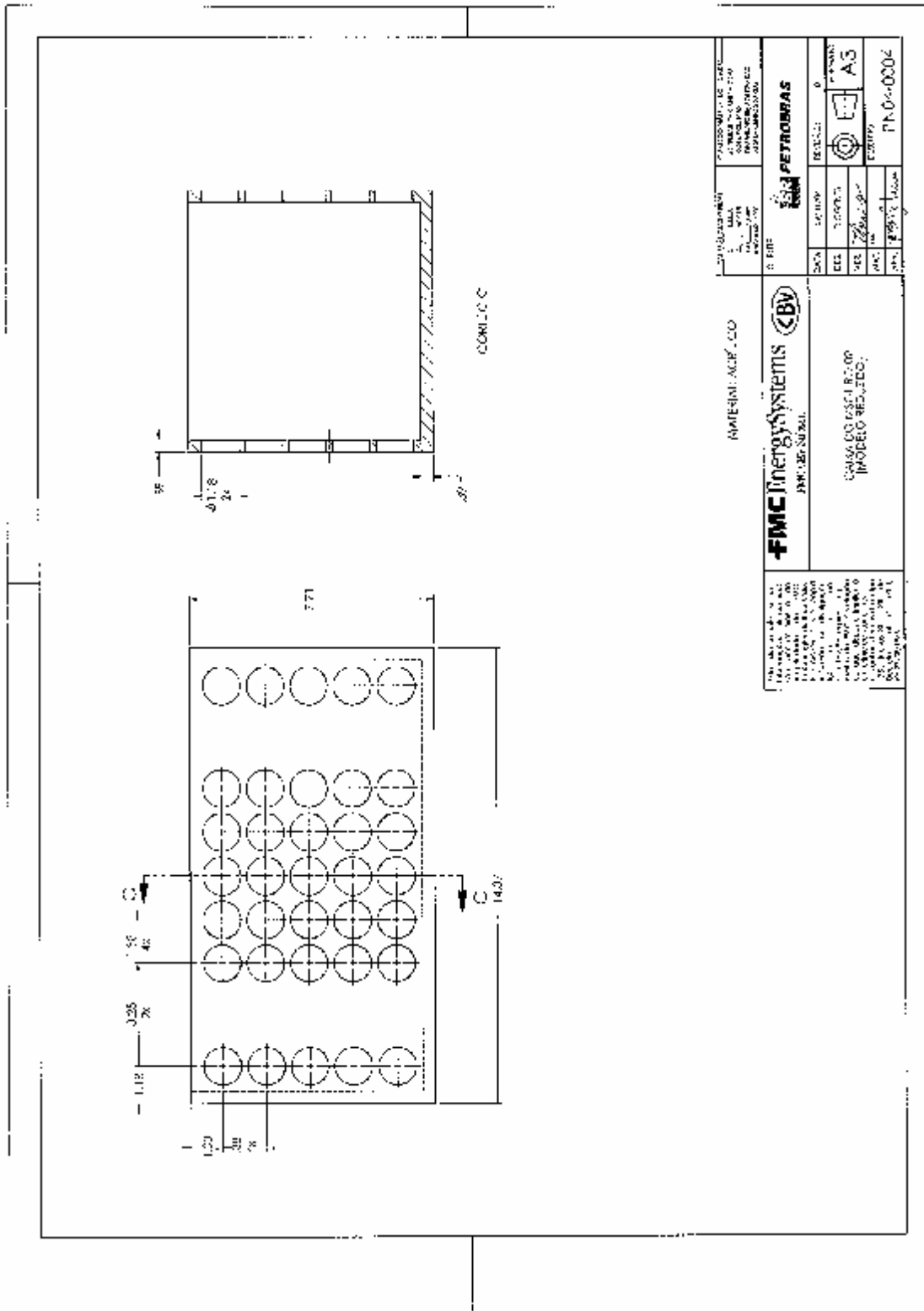


Figura A.3 – Caixa de acrílico do MSGL-RO-02.





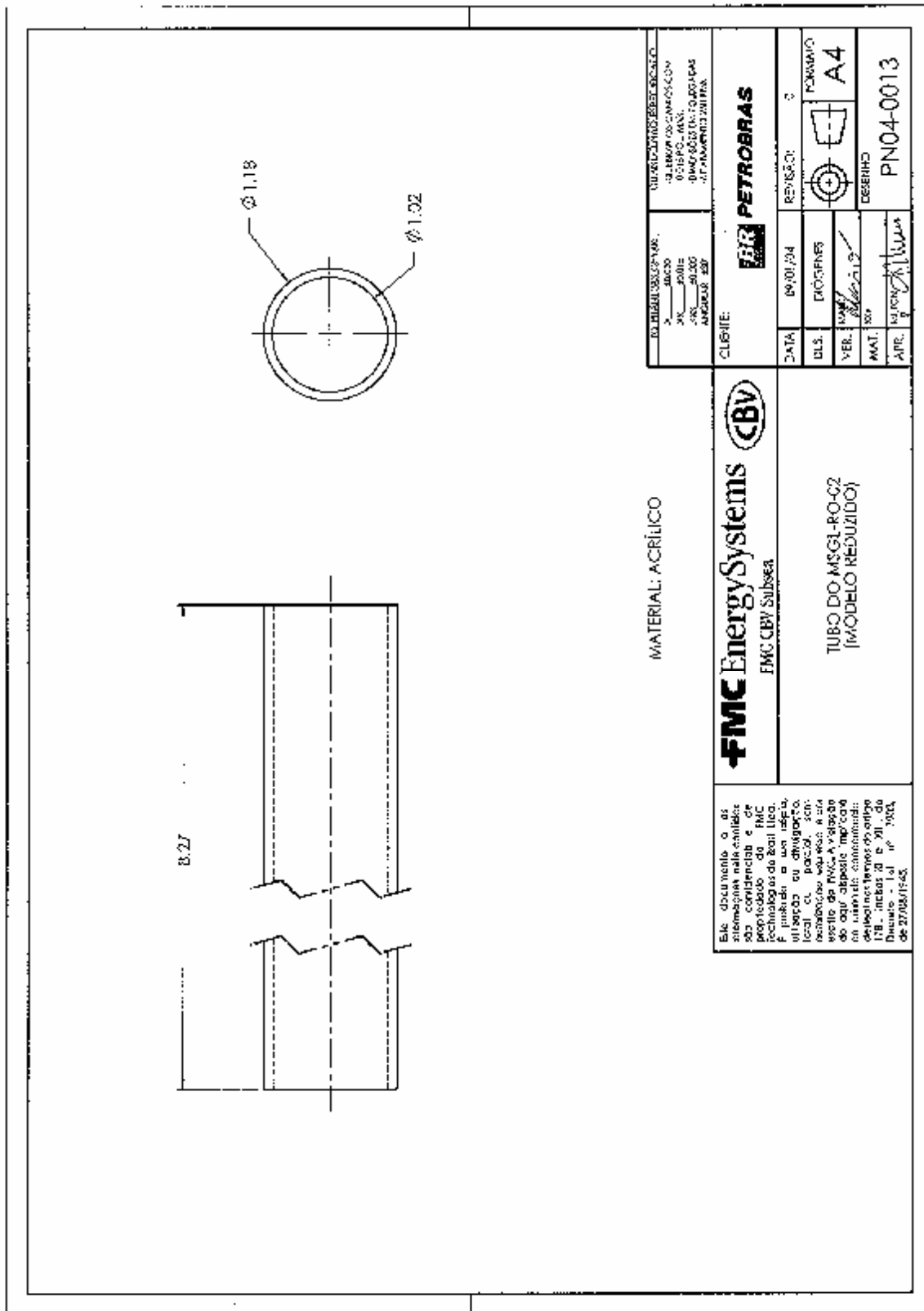


Figura A.5 – Tubo de acrílico para representação da porosidade do MSGL-RO-02.

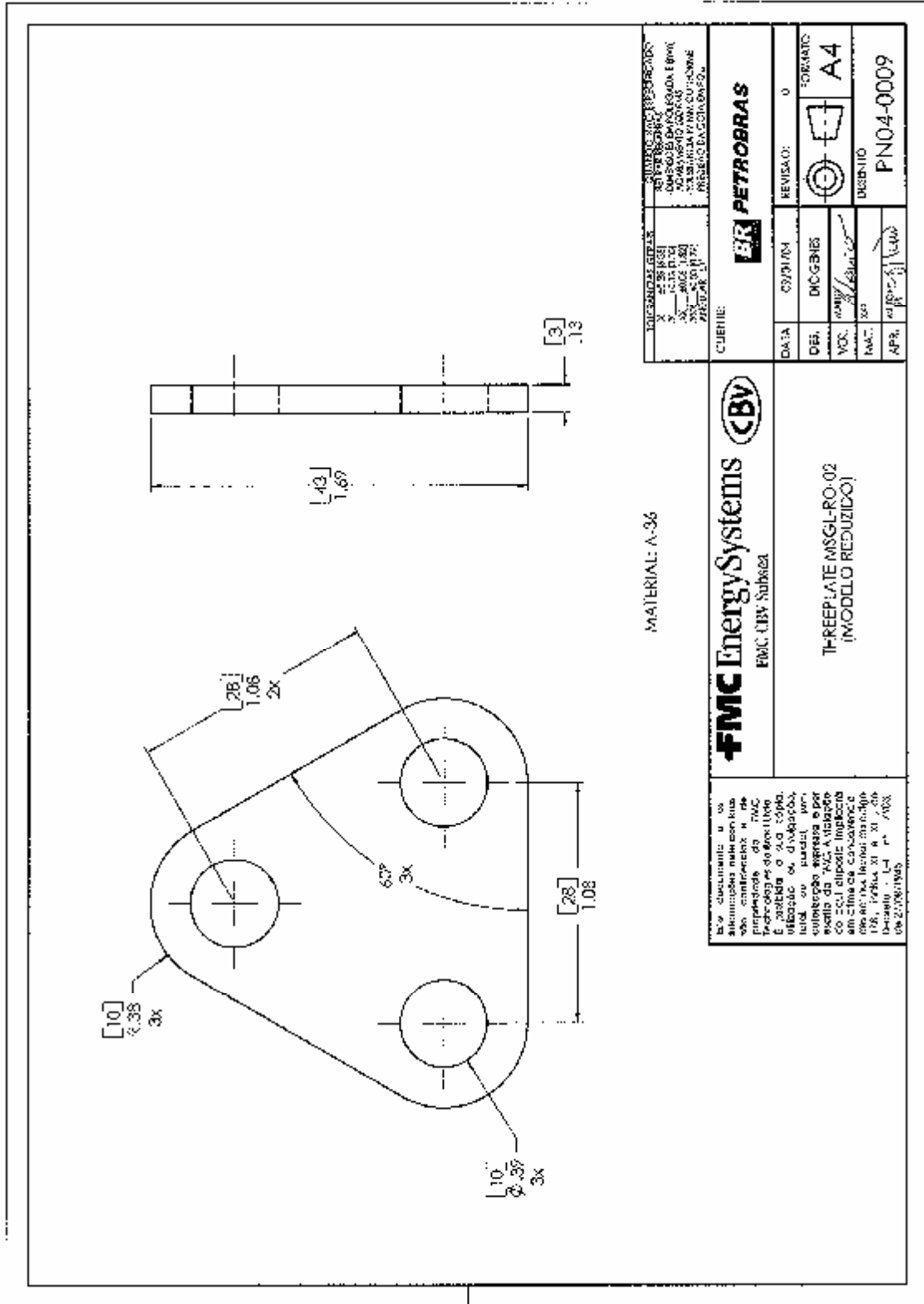


Figura A.6 – Placa triangular.

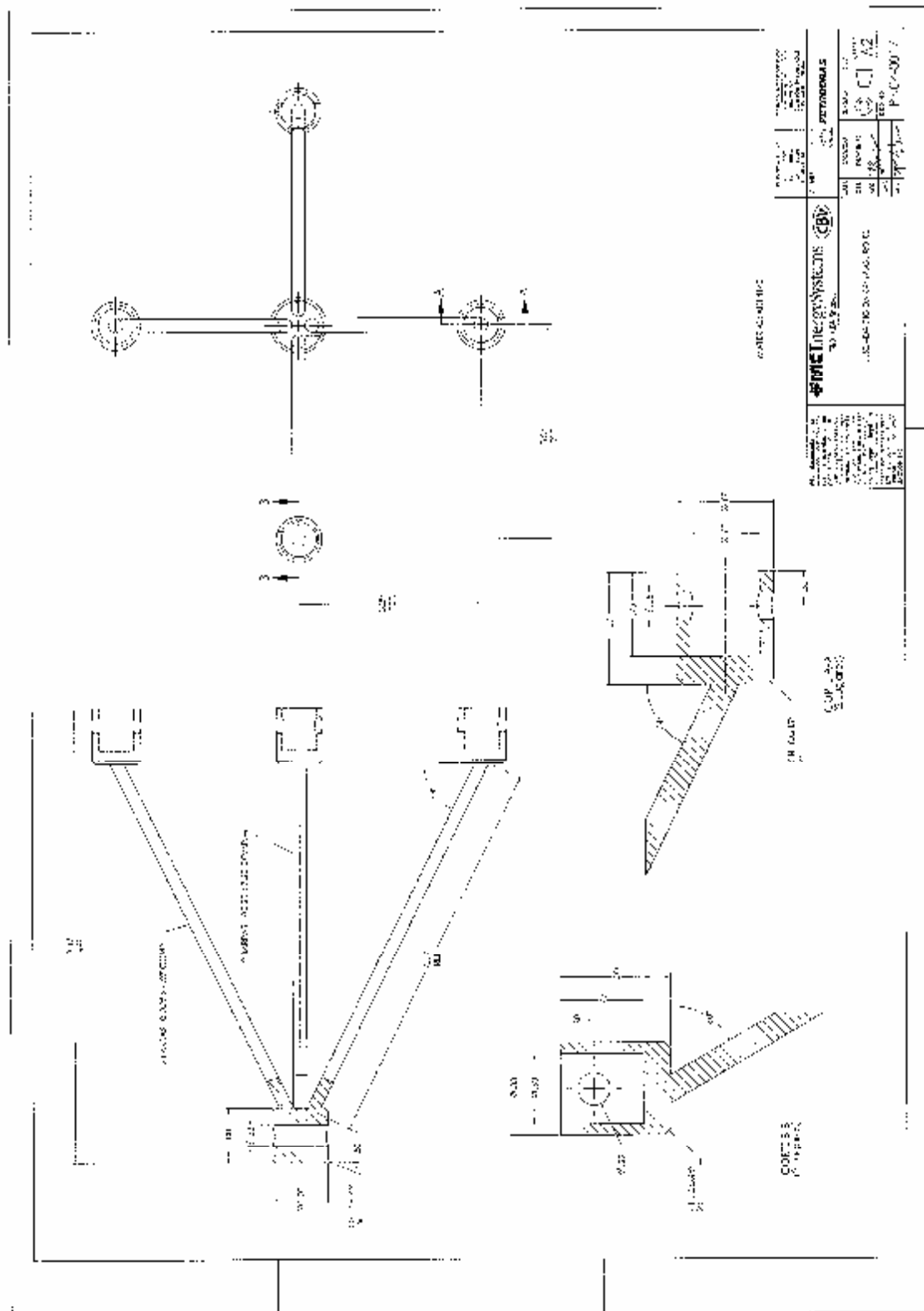


Figura A.7 – Lingada rígida em cruz.

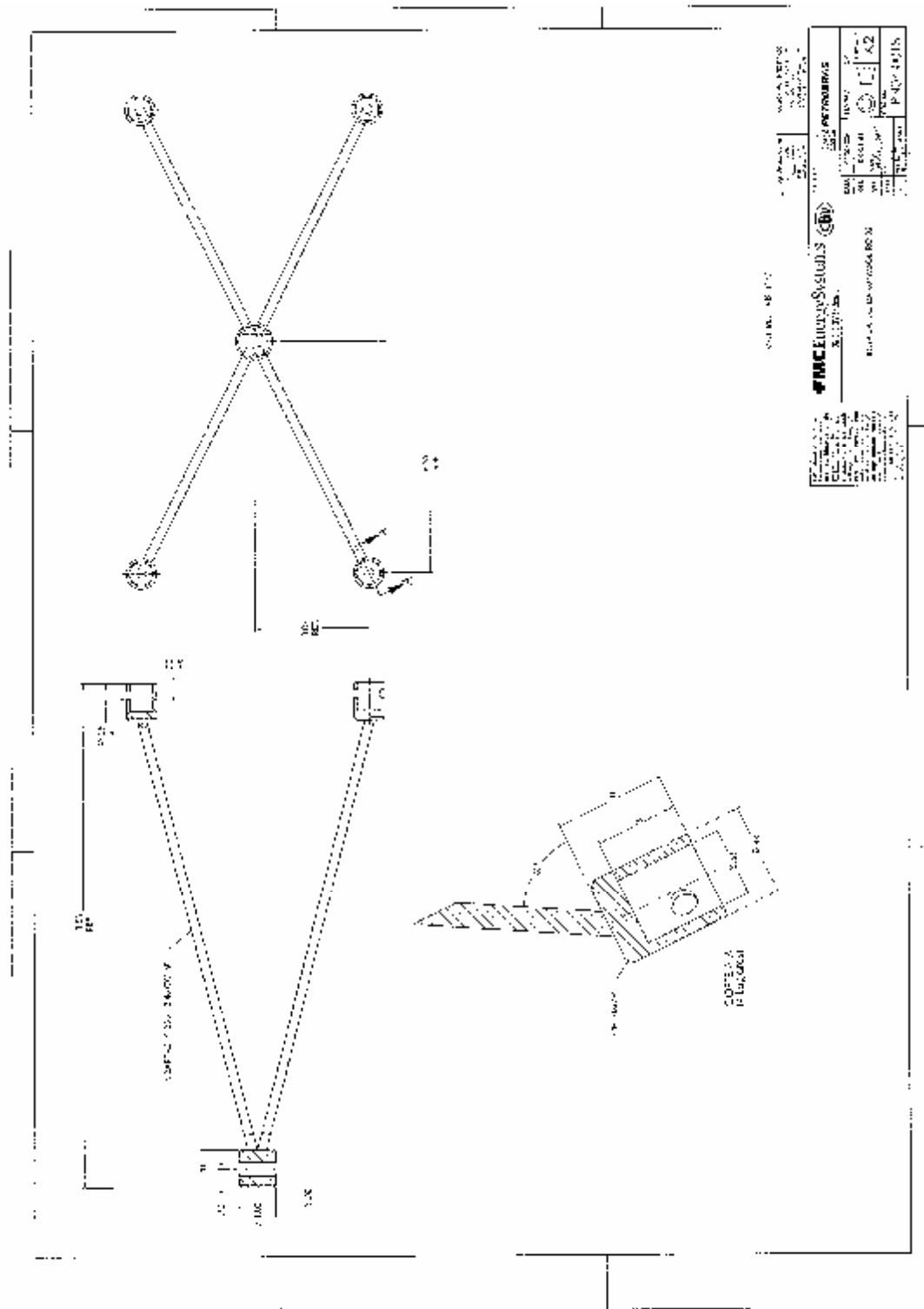


Figura A.8 – Lingada rígida retangular.

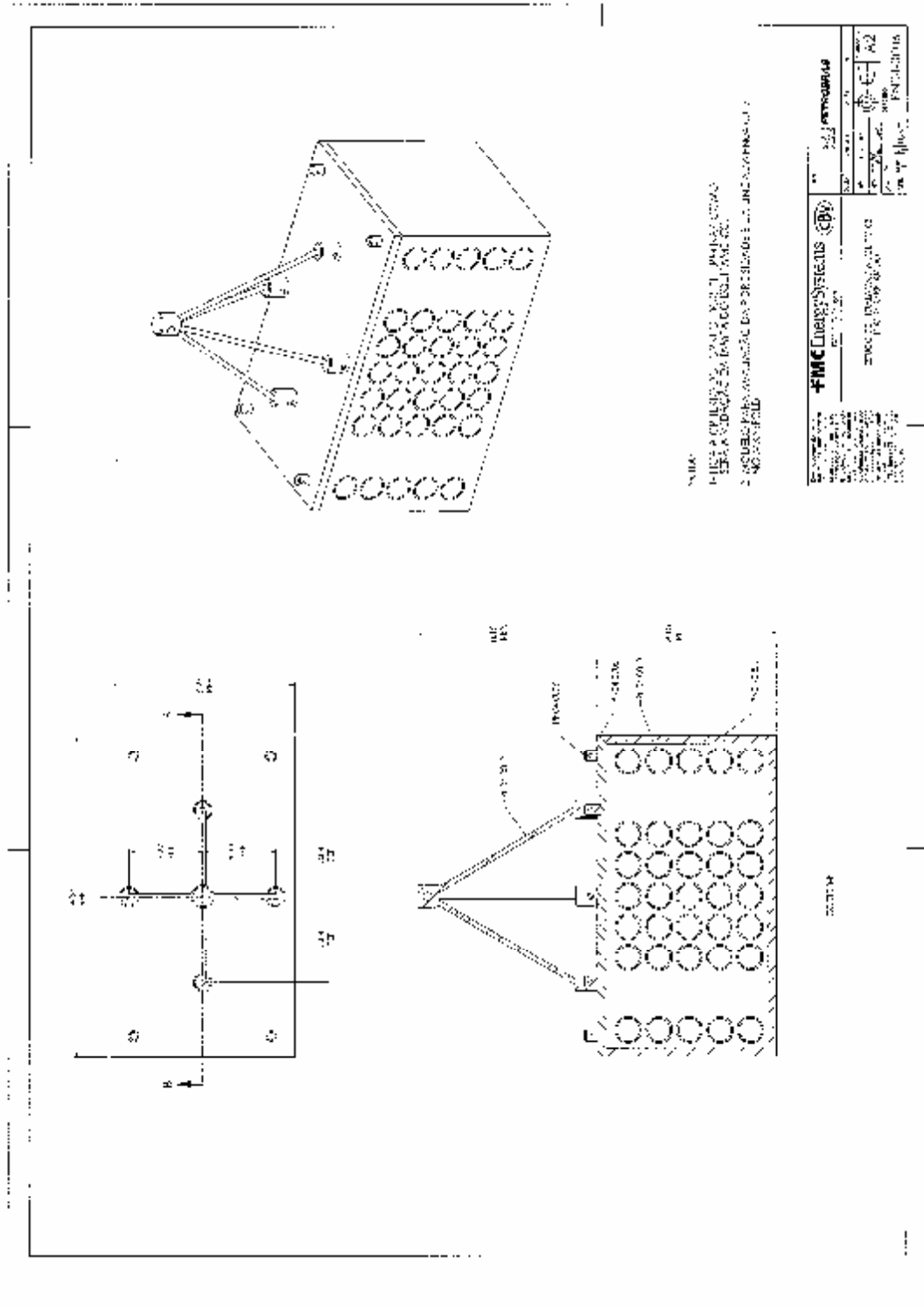


Figura A.9 – Montagem da caixa de acrílico com a lingada em cruz.



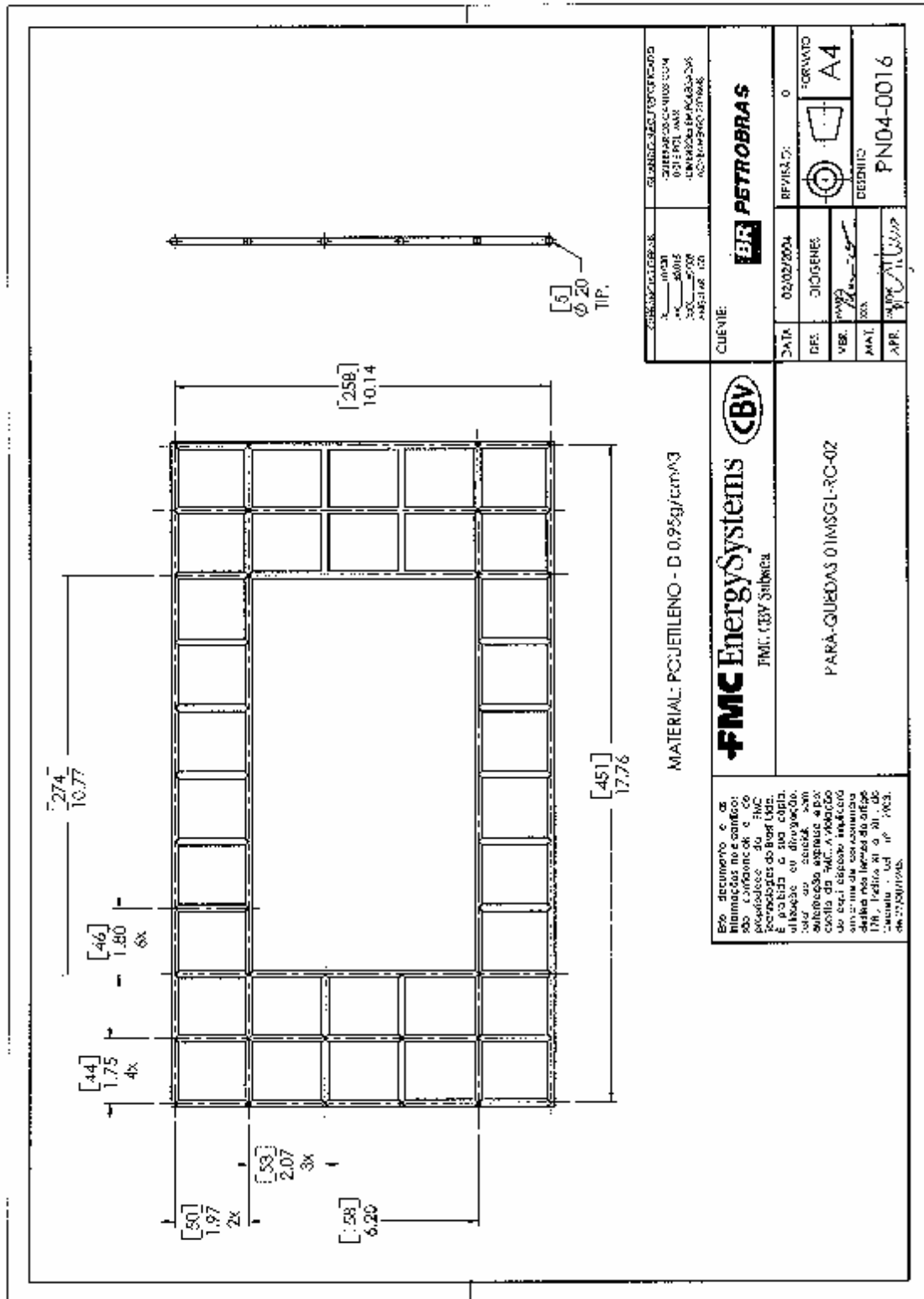


Figura A.11 – Para-quedas tipo grade.

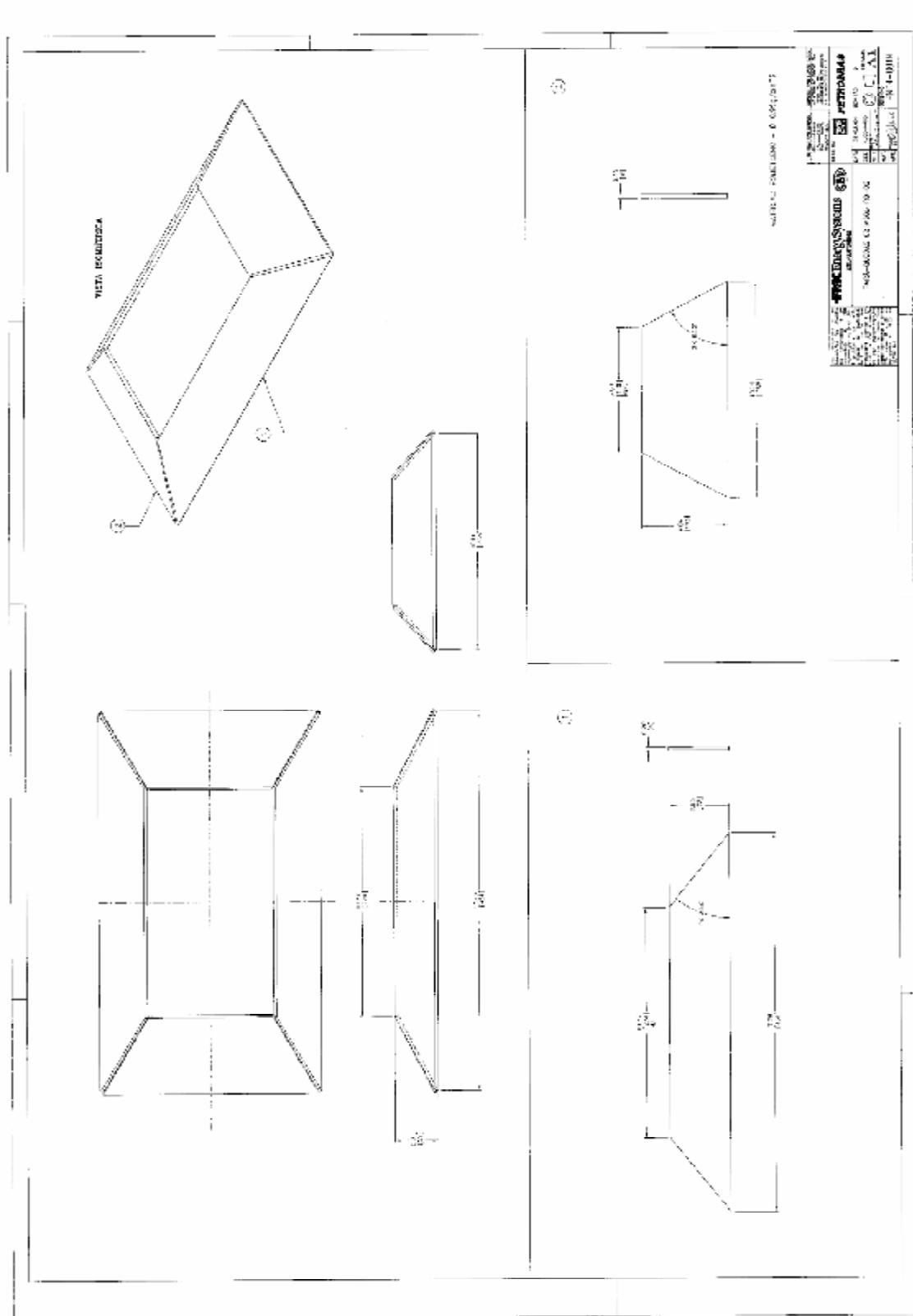


Figura A.12 – Pára-quedas tipo prisma.



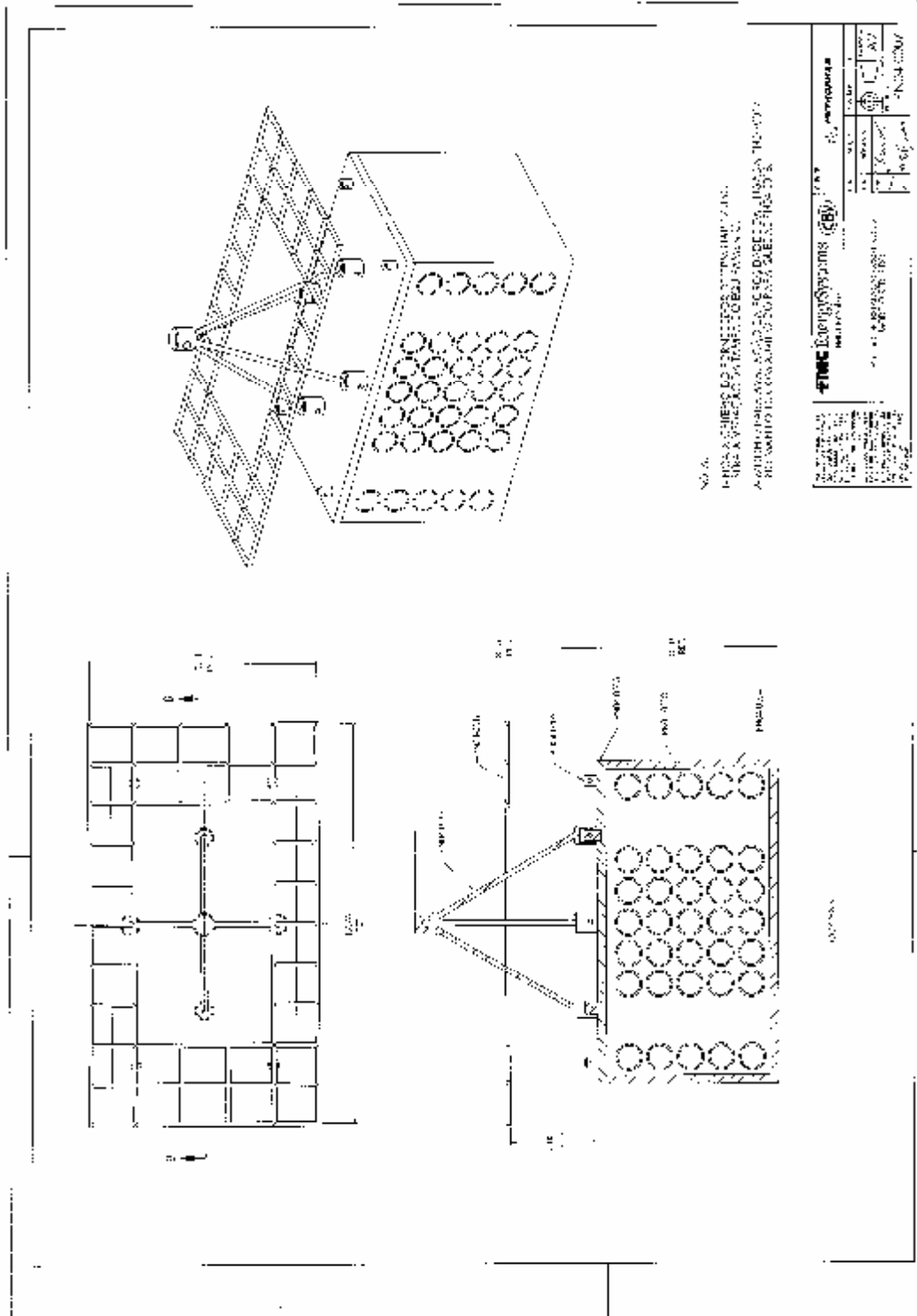


Figura A.13 – Montagem do conjunto caixa de acrílico com o pára-quadras tipo grade.



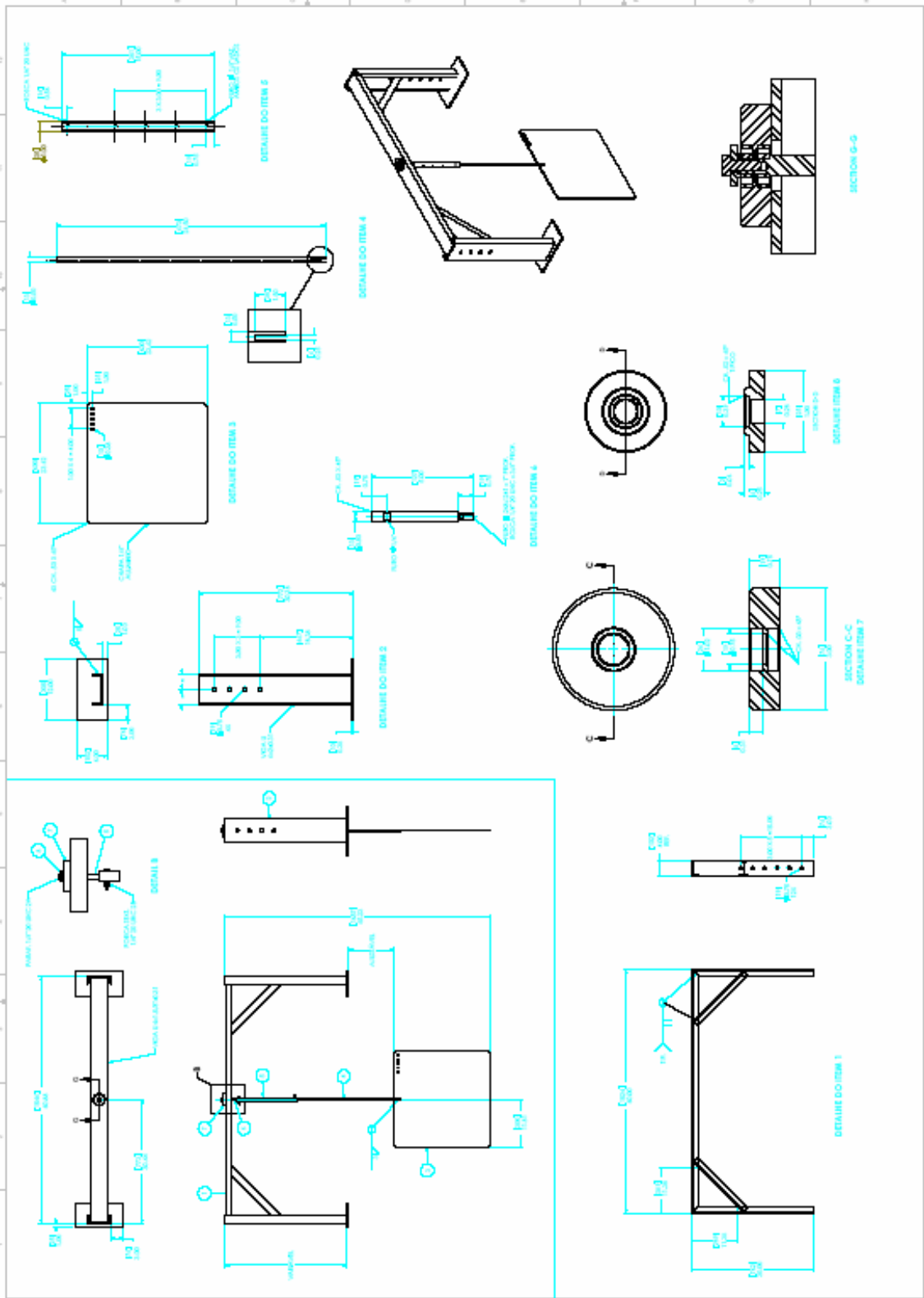
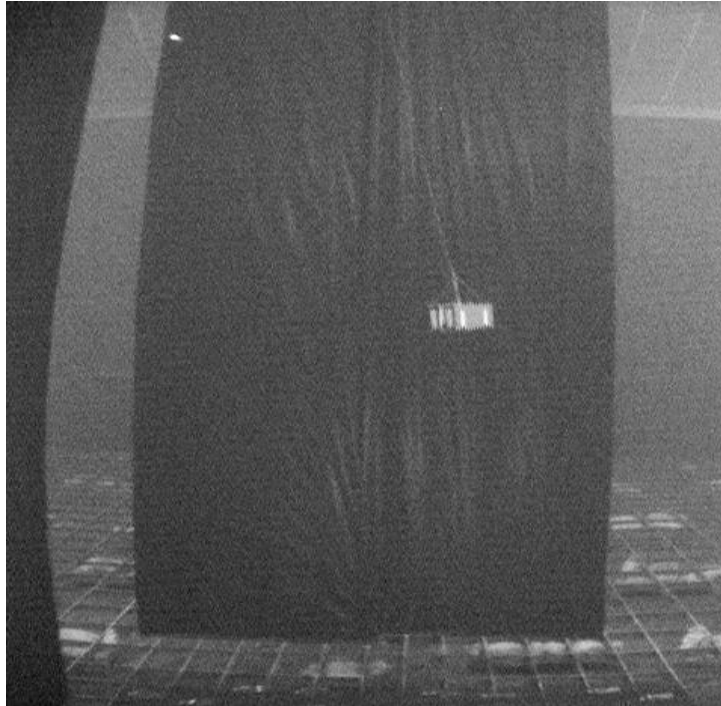
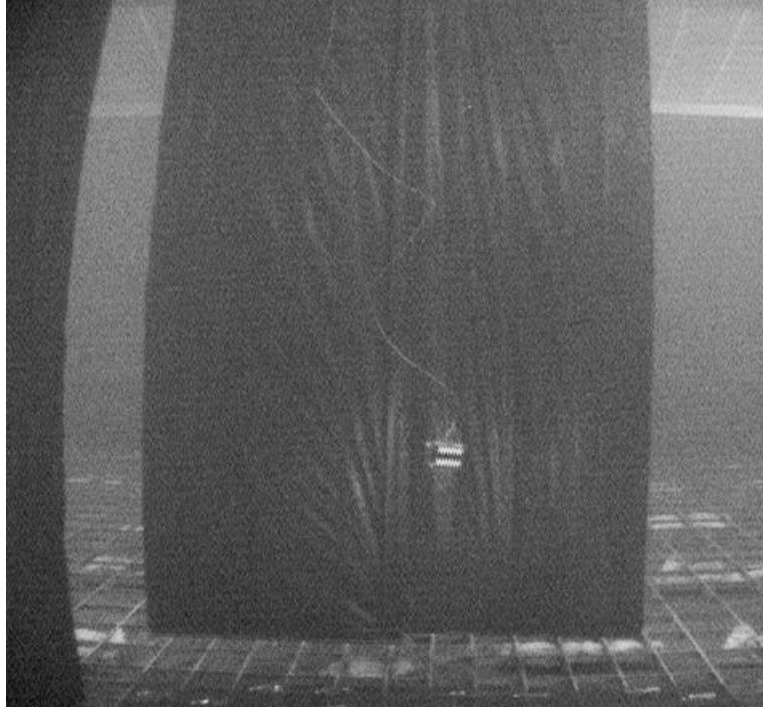


Figura A.15 – Montagem do sistema para estudo de rotação em placa plana.

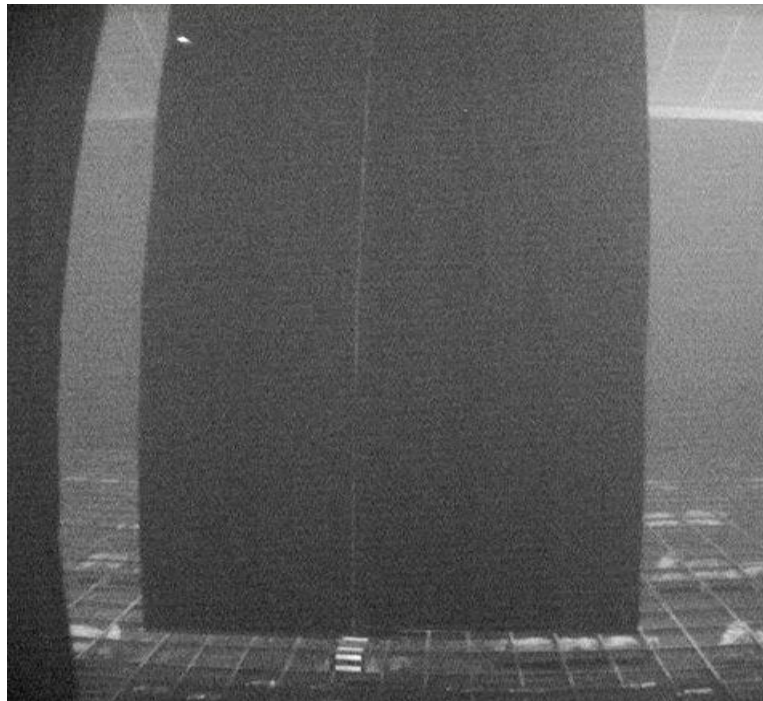
**APÊNDICE II – IMAGEM DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS NO  
LABOCEANO – LANÇAMENTO VERTICAL**



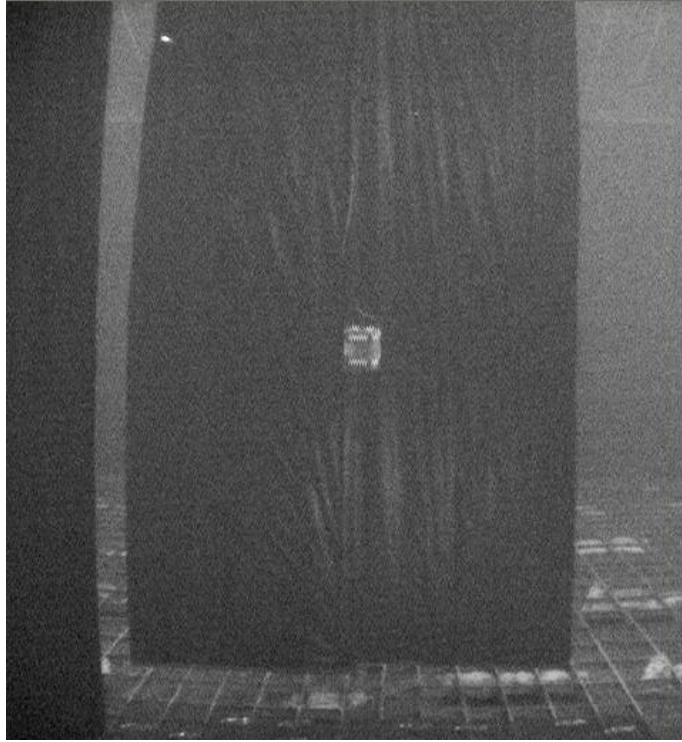
**Figura B.1 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da caixa de acrílico no eixo Z do modelo com porosidade 0% (REF. VERT-CAI-Z-PO0).**



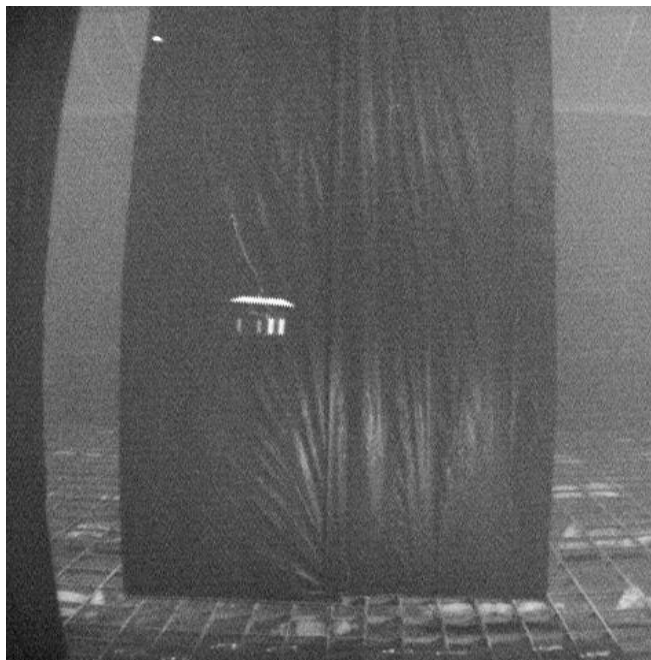
**Figura B.2 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da caixa de acrílico no eixo Y do modelo e com porosidade 0% (REF. VERT-CAI-Y-PO0).**



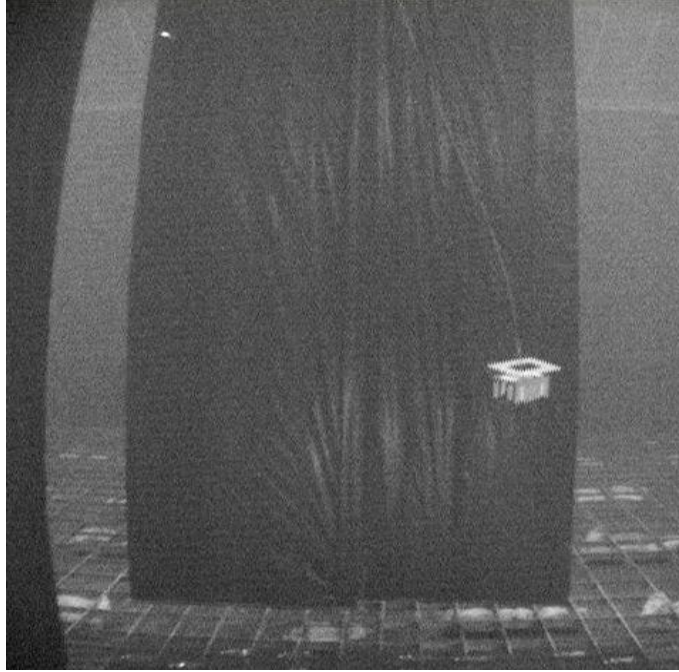
**Figura B.3 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da caixa de acrílico no eixo Y do modelo e com porosidade 25% (REF. VERT-CAI-Y-PO25).**



**Figura B.4 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da caixa de acrílico no eixo x do modelo e com porosidade 0% (REF. VERT-CAI-X-PO0).**



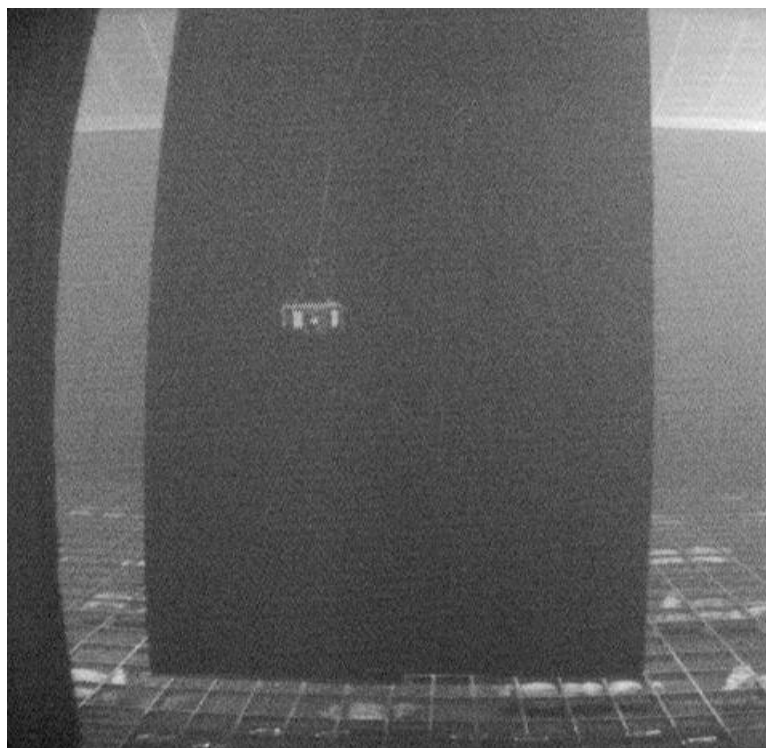
**Figura B.5 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da caixa de acrílico no eixo Z do modelo com porosidade 0% e com para-queda 1 em forma de funil (REF. VERT-CAI-Z-PO0-PQ1).**



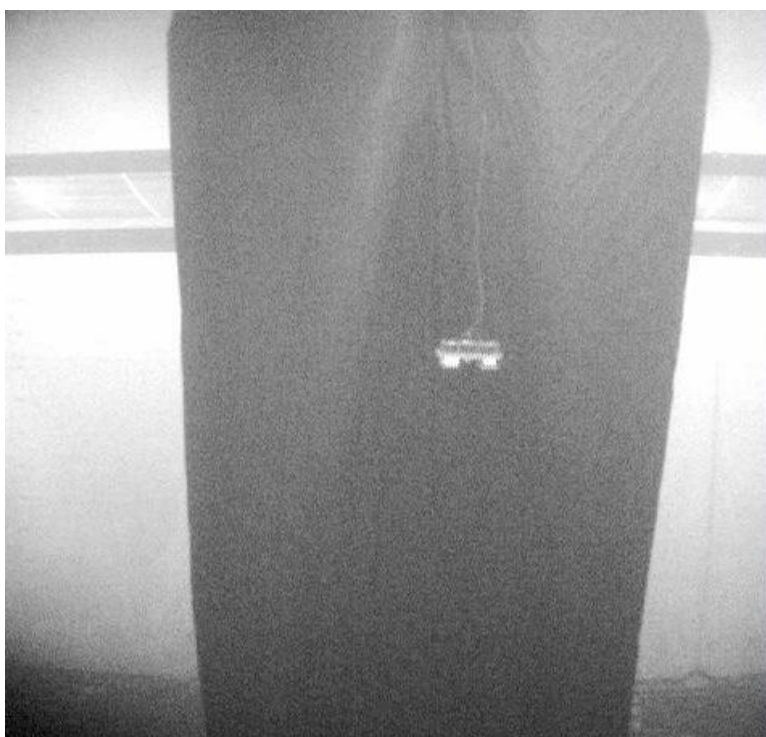
**Figura B.6 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical da caixa de acrílico no eixo Z do modelo com porosidade 0% e com para-queda 2 gradiado (REF. VERT-CAI-Z-PO0-PQ2).**



**Figura B.7 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical do manifold MSGL-RO-01 no eixo X do modelo (REF. VERT-MSGL-X).**



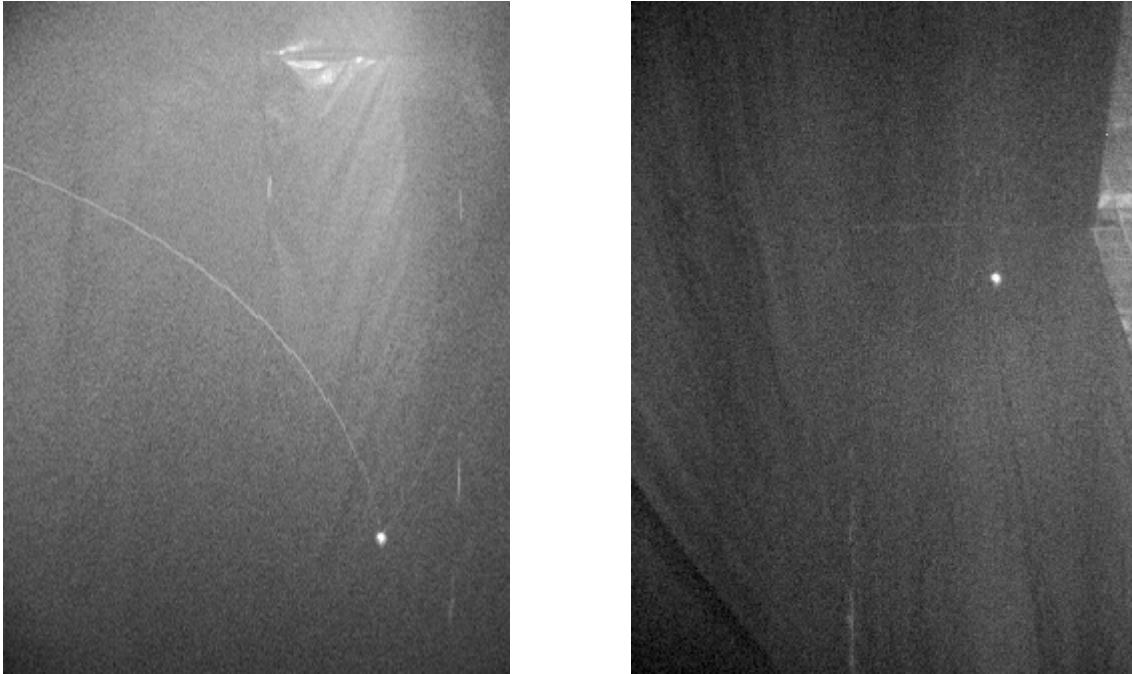
**Figura B.8 - Imagem da câmera C4 do lançamento vertical do manifold MSGL-RO-01 no eixo Y do modelo (REF. VERT-MSG-L-Y).**



**Figura B.9 - Imagem da câmera C1 do lançamento vertical do manifold MSGL-RO-01 no eixo Z do modelo (REF. VERT-MSG-L-Z).**



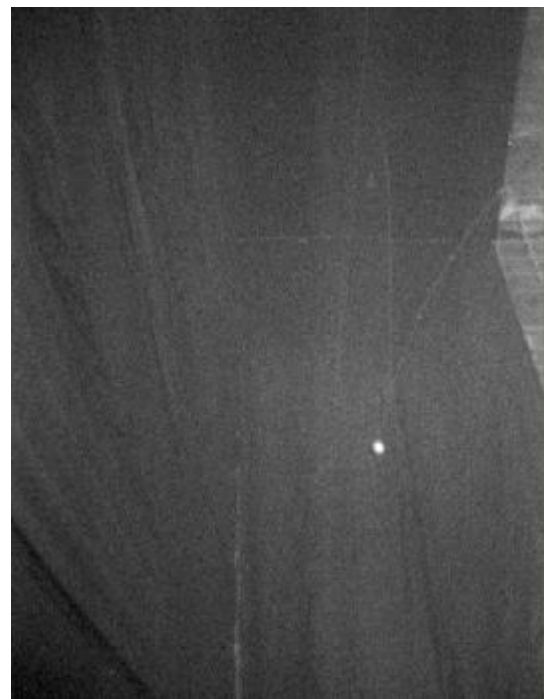
**APÊNDICE III – IMAGEM DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS NO  
LABOCEANO – LANÇAMENTO PENDULAR**



**Figura C.1 - Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C3-D12-PO0-H1VERT).**



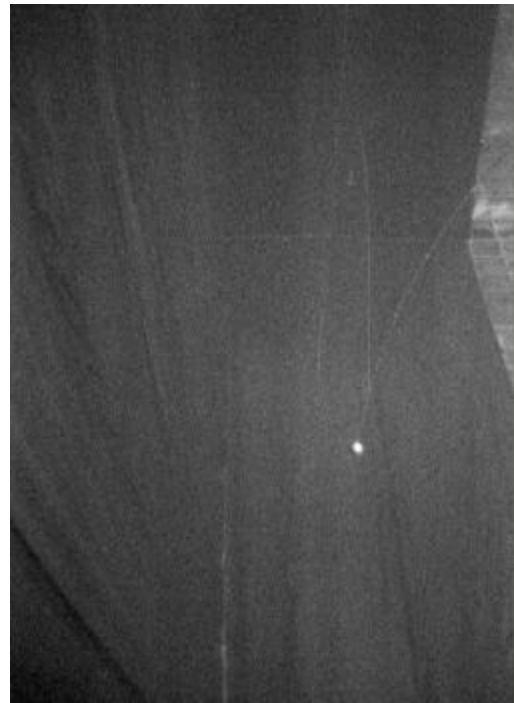
**Figura C.2 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C6-D12-PO0-H1).**



**Figura C.3 – Imagem da câmera C3 e câmera 2 C2 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C10-D12-PO0-H1).**



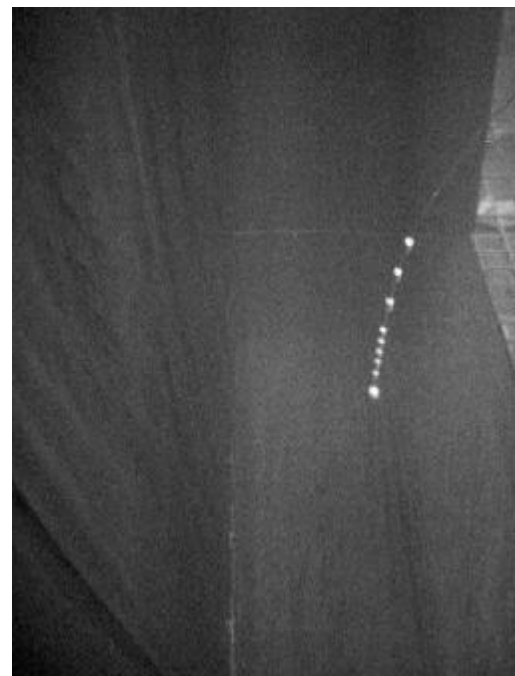
**Figura C.4 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C20-D12-PO0-H1).**



**Figura C.5 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C25-D12-PO0-H1).**



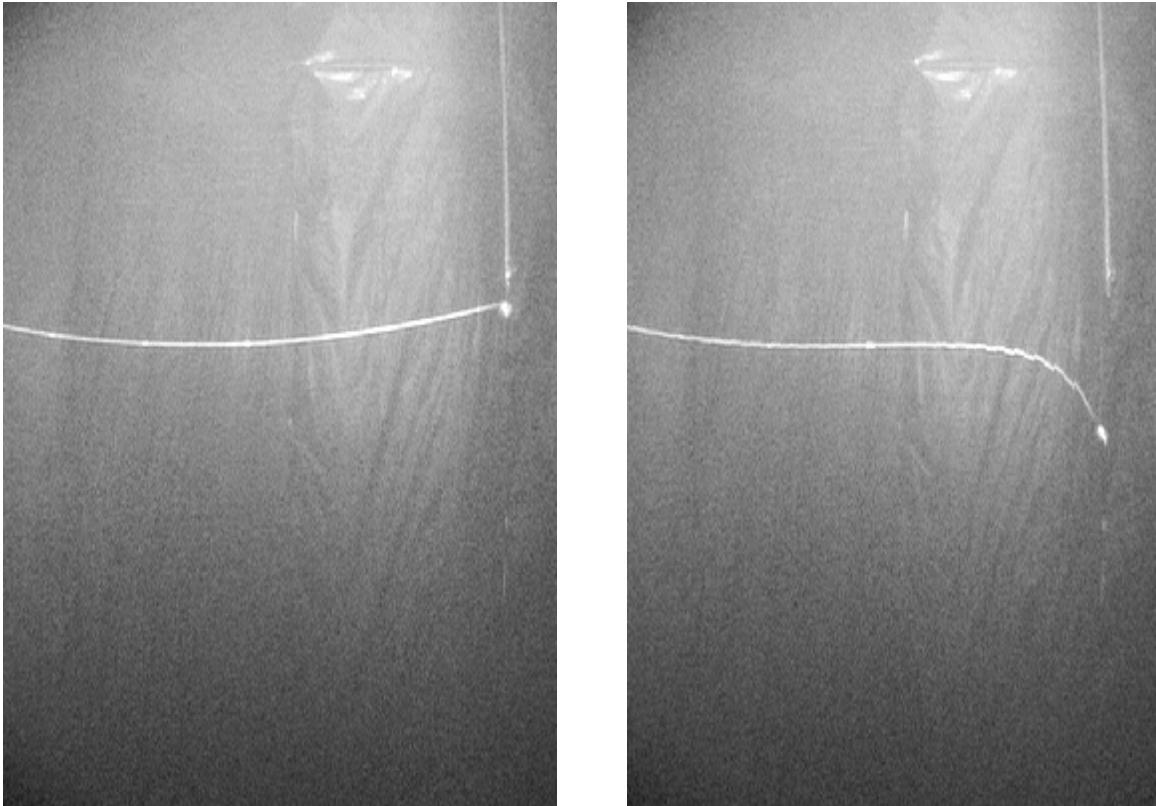
**Figura C.6 – Imagens da câmera C3 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C10-D9-PO0-H2).**



**Figura C.7 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C10-D12-F1-PO0-H2).**



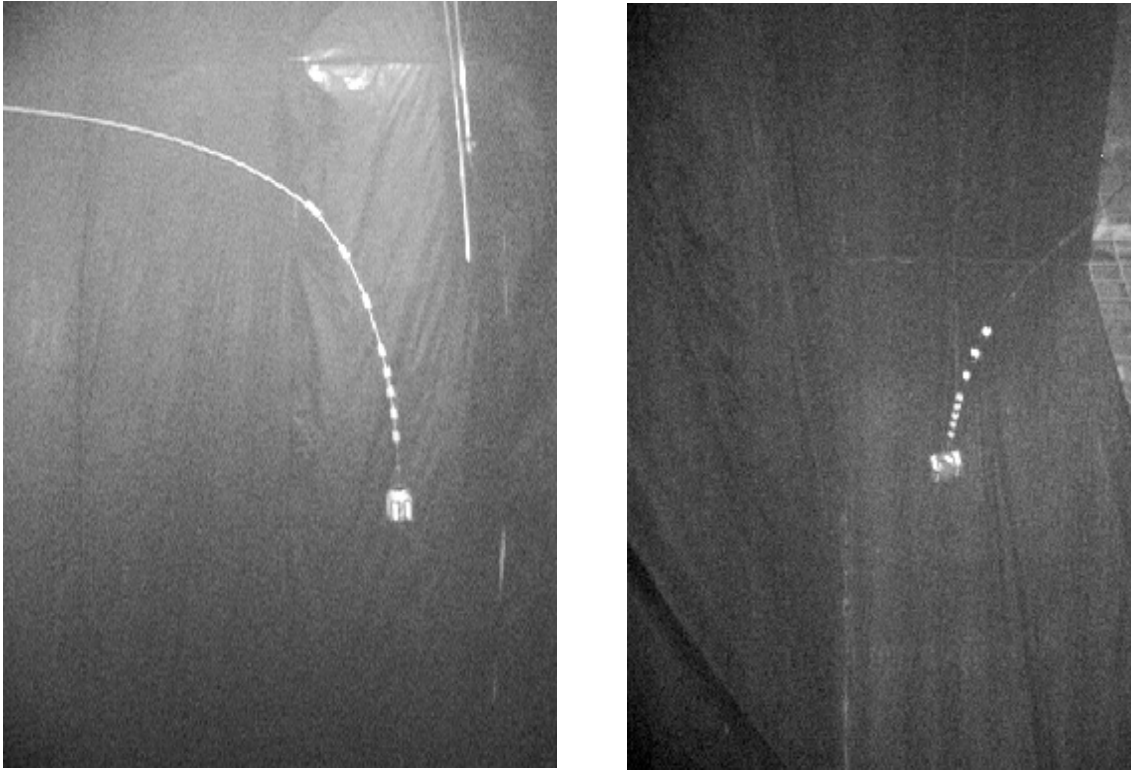
**Figura C.8 – Imagem da câmera C3 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C10-D12-PO0-H2).**



**Figura C.9 – Imagens da câmera C3 do lançamento pendular da esfera (REF. ESF-C10-D12-PO0-H3).**



**Figura C.10 – Imagem da câmera C2 do lançamento pendular da caixa de acrílico (REF. CAI-C10-D12-F1-LI4-PO0-H1).**



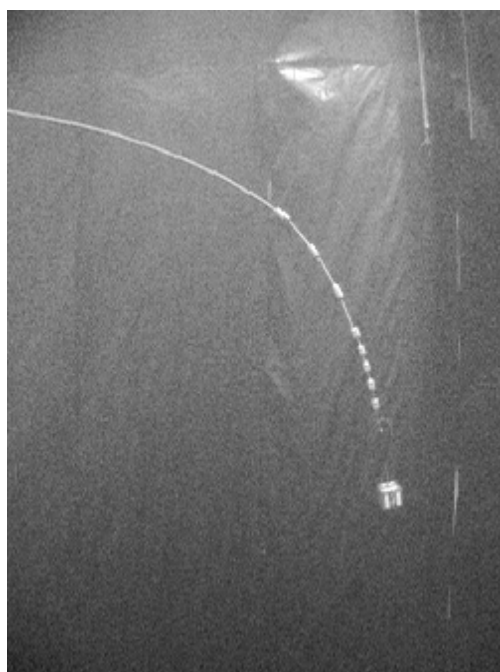
**Figura C.11 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da caixa de acrílico (REF. CAI-C10-D12-F1-LI4-PO25-H2-CG3).**



**Figura C.12 – Imagem da câmera C3 do lançamento pendular da caixa de acrílico (REF. CAI-C10-D12-F1-LI4-PO0-H2-CG3).**

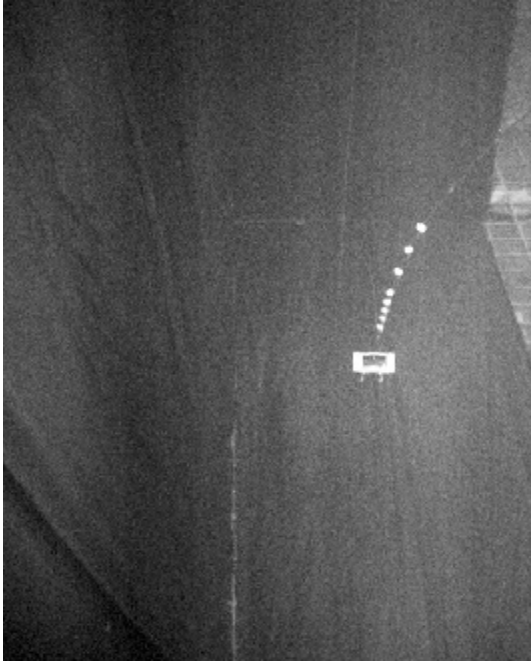


**Figura C.13 – Imagem da câmera C3 do lançamento pendular da caixa de acrílico (REF. CAI-C10-D12-F1-LI3-PO0-H2-CG3).**



**Figura C.14 – Imagem da câmera C3 do lançamento pendular da caixa de acrílico (REF. CAI-C10-D12-F1-LI3-PO0-H2-CG-HT40).**





**Figura C.15 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da caixa de acrílico (REF. CAI-C10-D12-F1-LI4-PO0-PQ1-H2-CG3-HT40).**



**Figura C.16 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular da caixa de acrílico (REF. CAI-C10-D12-F1-LI4-PO0-PQ2-H2-CG3-HT40).**



**Figura C.17 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular do manifold MSGL-RO-01 (REF. MSGL-C10-D12-LI1-H2-F1).**



**Figura C.18 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular do manifold MSGL-RO-01 (REF. MSGL-C10-D12-LI2-H2-F1).**



**Figura C.19 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular do manifold MSGL-RO-01 (REF. MSGL-C10-D12-LI3-H2-F1).**

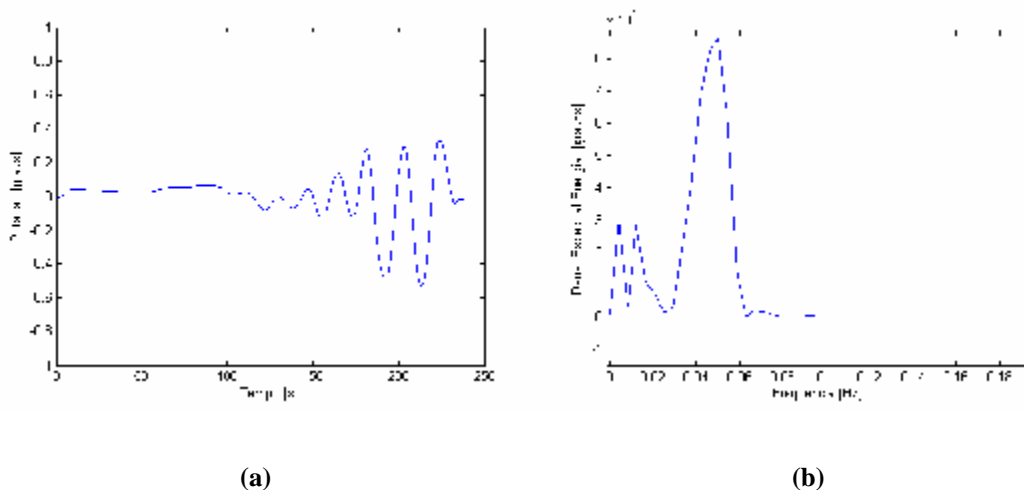


**Figura C.20 – Imagem da câmera C3 e câmera C2 do lançamento pendular do manifold MSGL-RO-01 (REF. MSGL-C10-D12-LI4-H2-F1).**

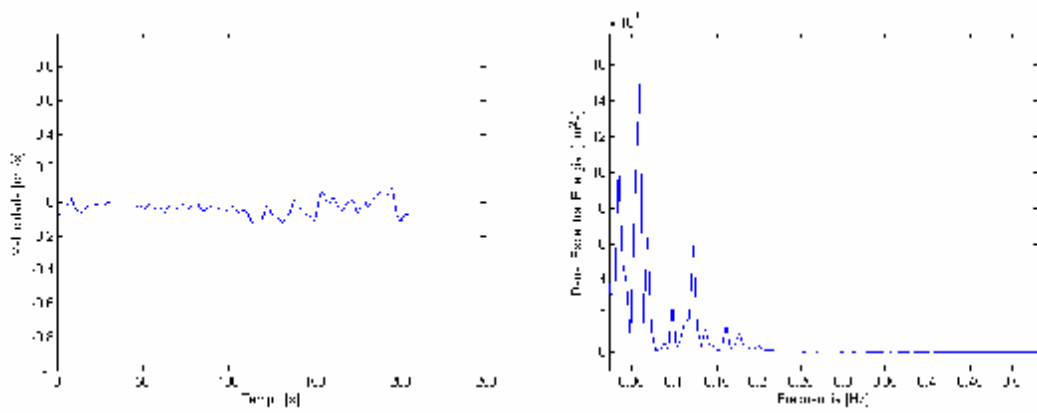
**APENDICE IV – SÉRIES TEMPORAIS DE ROTAÇÃO, VELOCIDADE DE FLUXO MEDIDA NA ESTEIRA E RESPECTIVOS ESPECTROS DE DENSIDADE DE ENERGIA PARA A PLACA DE ALUMÍNIO DE 0,6 METROS DE LARGURA.**

Medição	Velocidade de Correnteza [m/s]
1	0,095617
2	0,140345
3	0,15462
4	0,166992
5	0,166584
6	0,180315
7	0,207913
8	0,233608
9	0,239318
10	0,277385
11	0,299273
12	0,310693
13	0,319258
14	0,324017
15	0,32592
16	0,345905
17	0,335437

Obs.: Os valores da rotação em graus estão divididos por 100, apesar de não constar na legenda do gráfico, portanto onde se lê 0,2 graus, por exemplo, o valor do ângulo é de 20 graus. A escala das séries temporais é idêntica a todos os gráficos. Já para os gráficos que apresentam densidade espectral de energia, uma escala padrão não foi mantida de forma a favorecer a visualização da frequência de pico para cada caso.



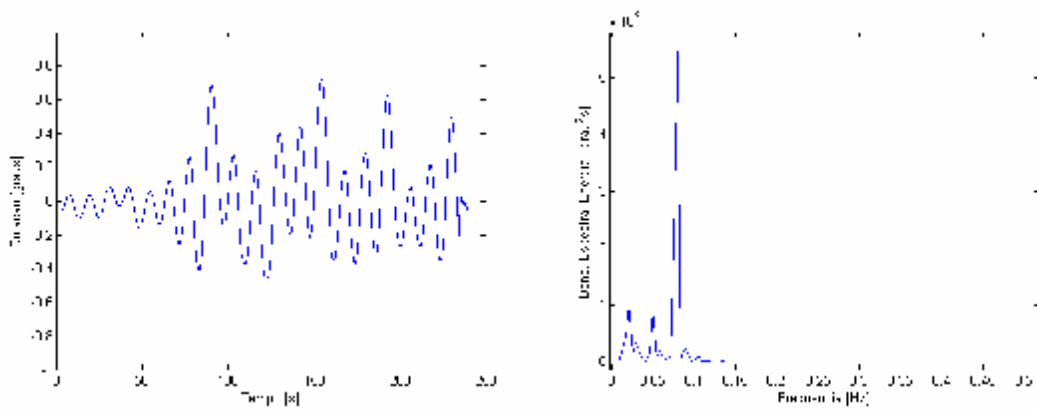
**Figura D.1 – Medição 1: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

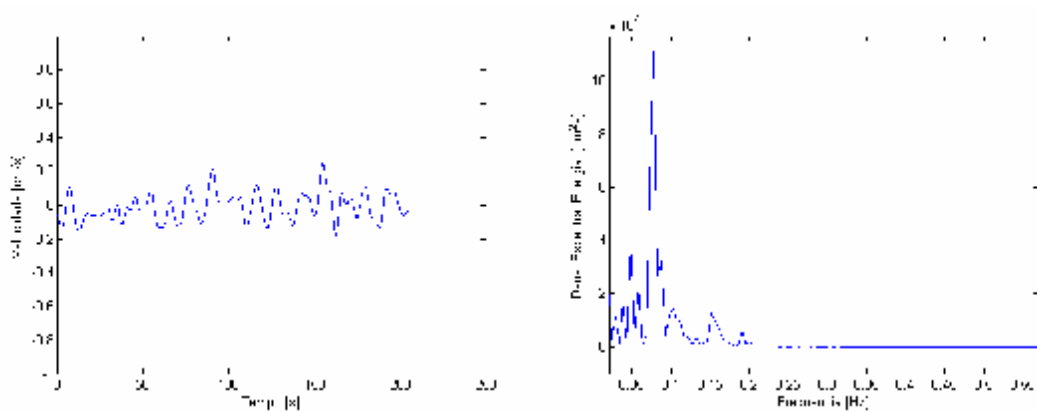
**Figura D.2 – Medição 1: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

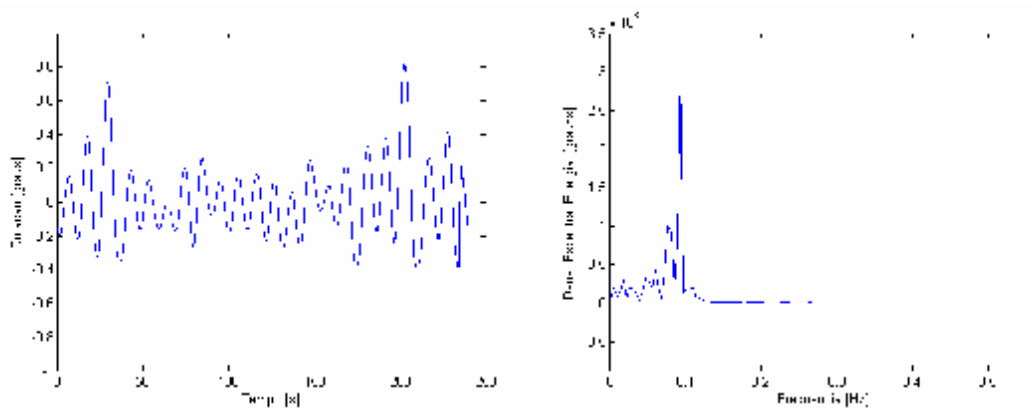
**Figura D.3 – Medição 2: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

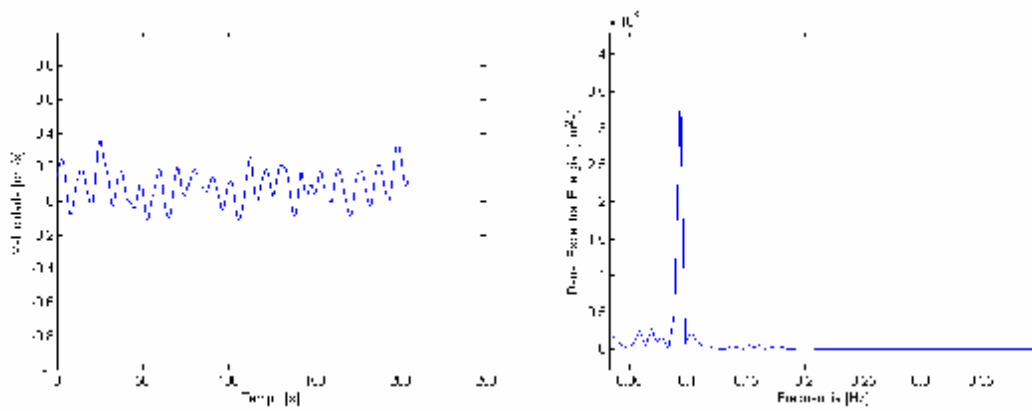
**Figura D.4 – Medição 2: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

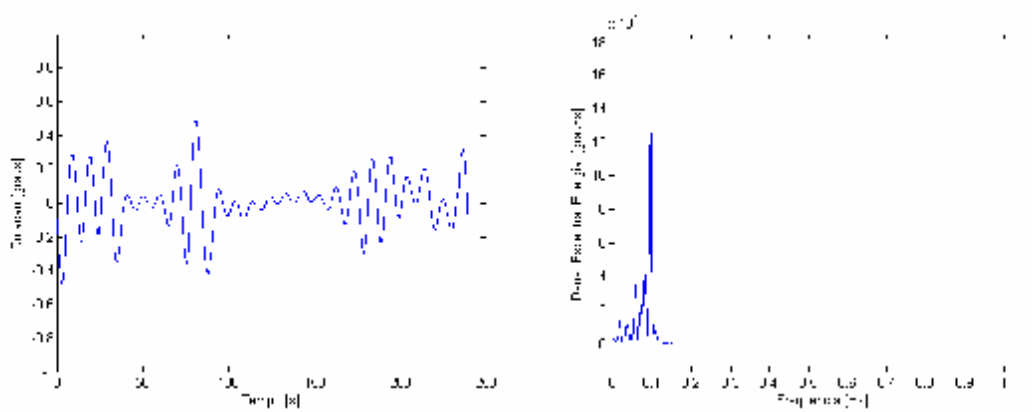
**Figura D.5 – Medição 3: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

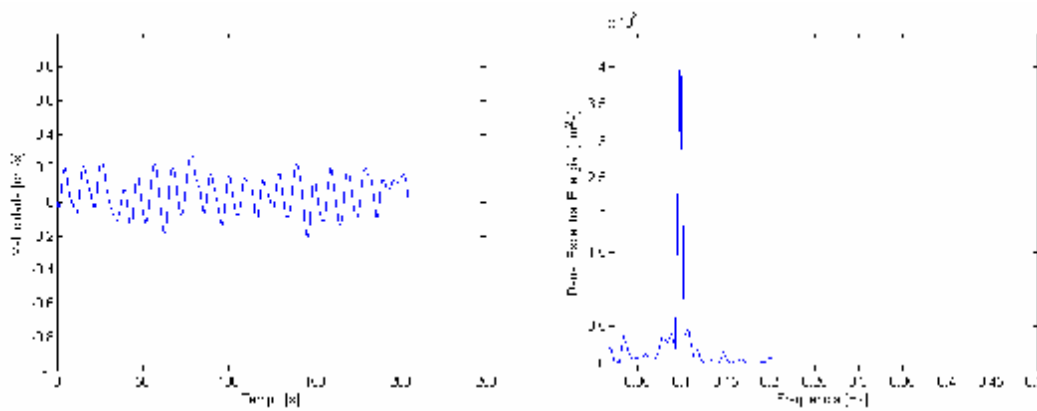
**Figura D.6 – Medição 3: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

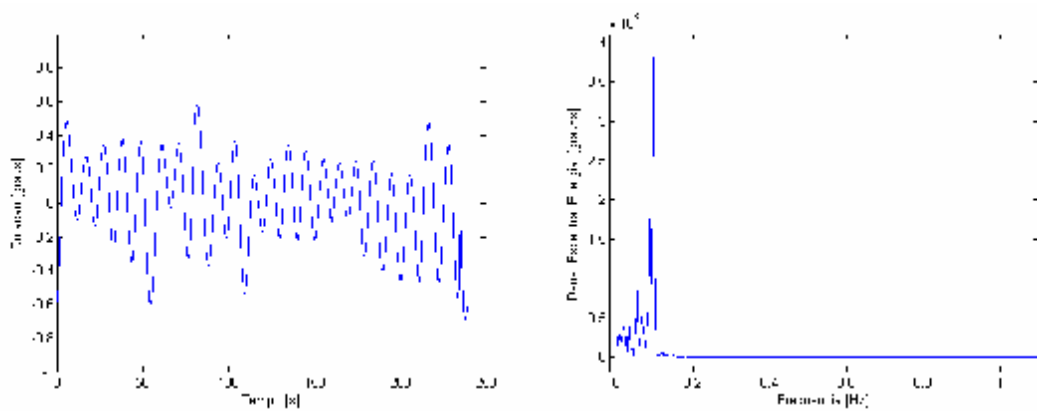
**Figura D.7 – Medição 4: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

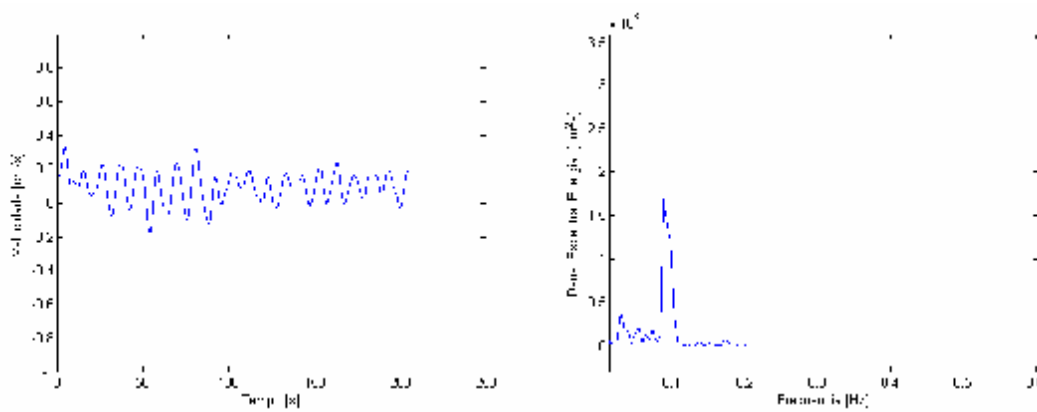
**Figura D.8 – Medição 4: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

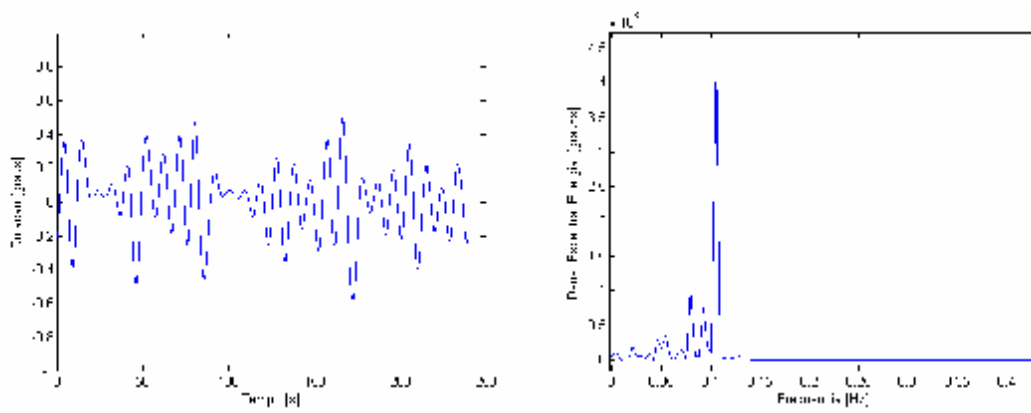
**Figura D.9 – Medição 5: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

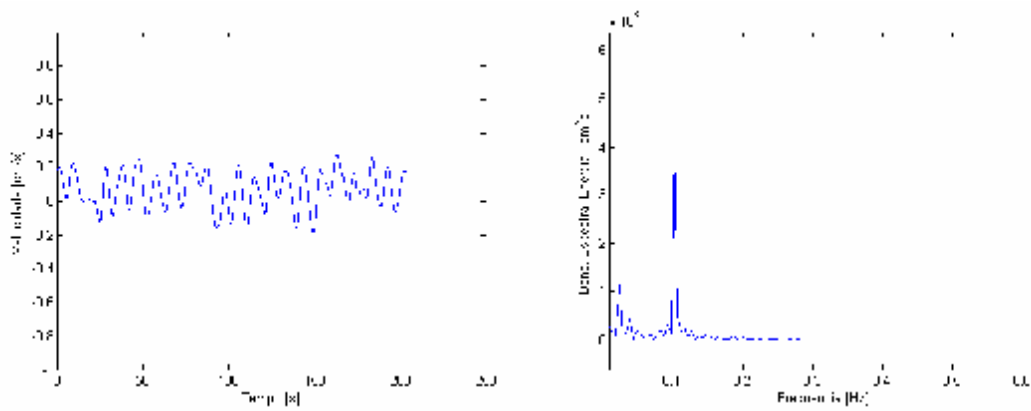
**Figura D.10 – Medição 5: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

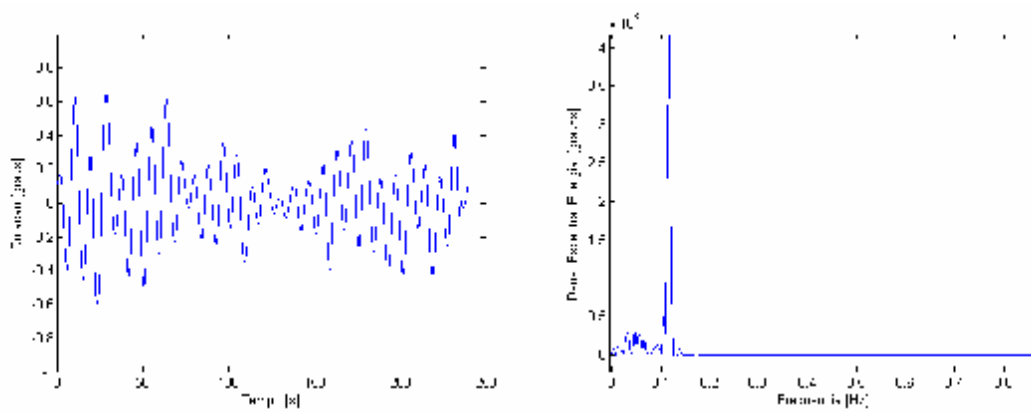
**Figura D.11 – Medição 6: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

**Figura D.12 – Medição 6: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

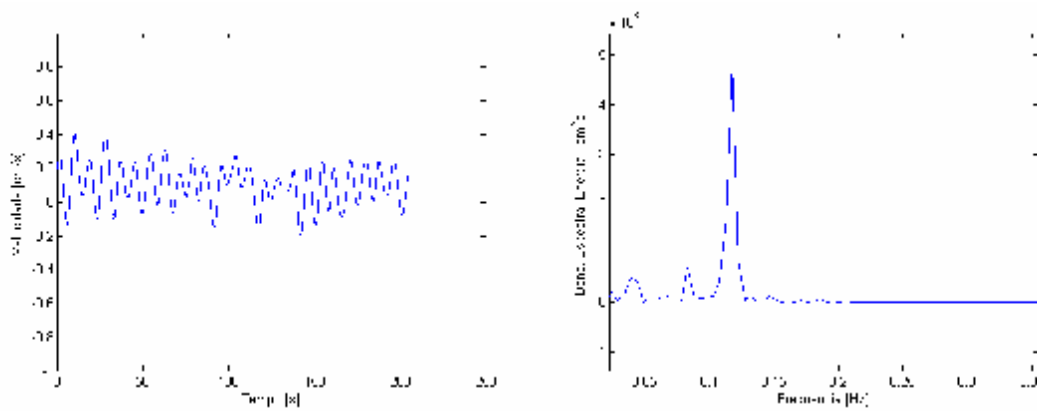


(a)

(b)

**Figura D.13 – Medição 7: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**

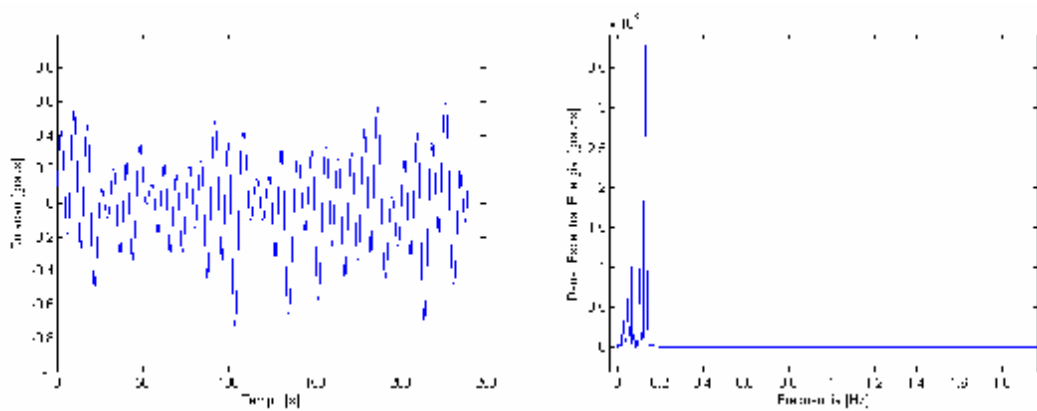




(a)

(b)

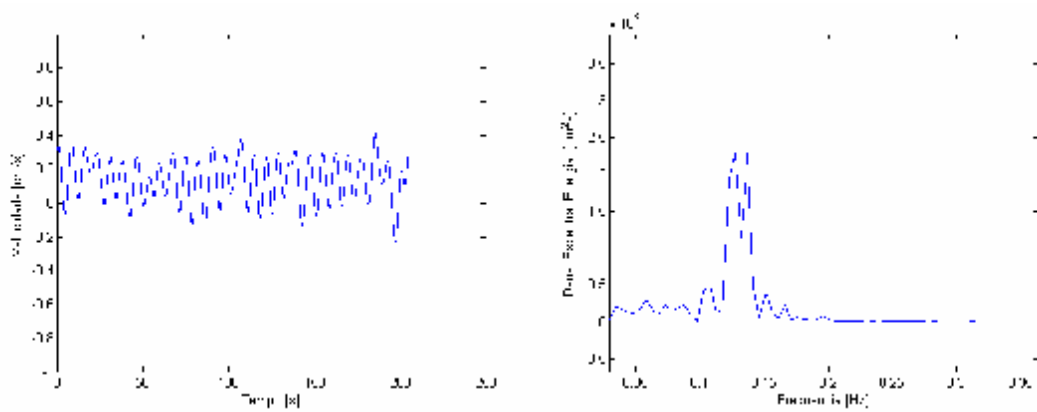
**Figura D.14 – Medição 7: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

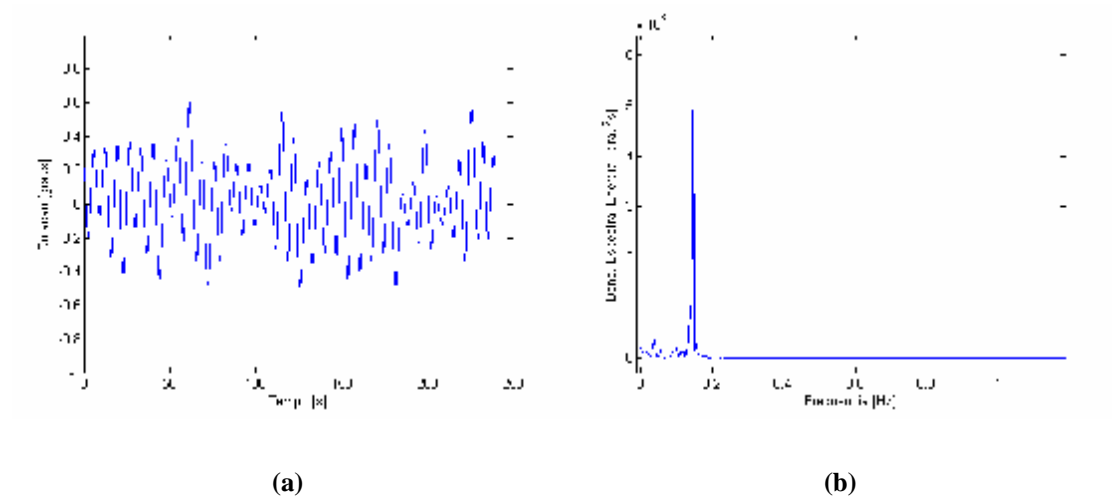
**Figura D.15 – Medição 8: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



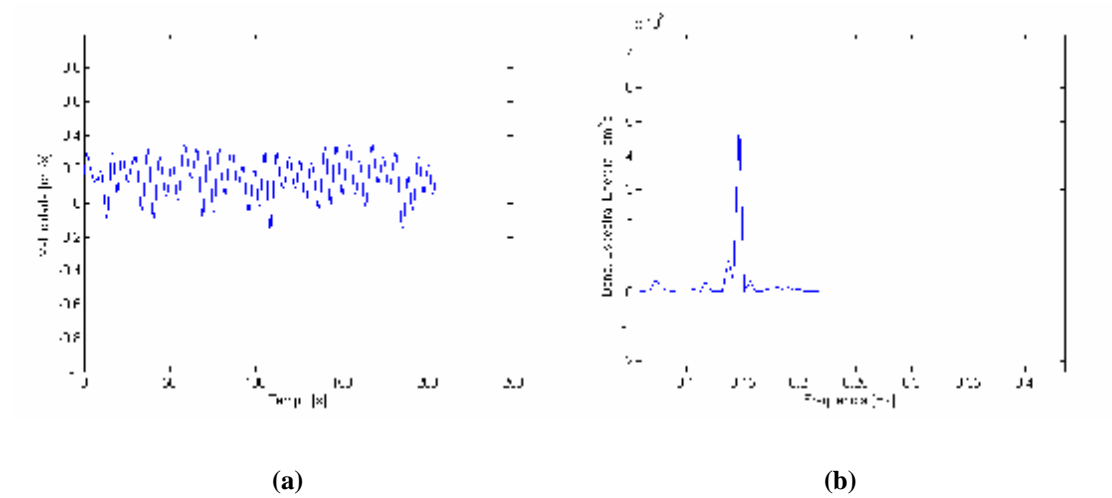
(a)

(b)

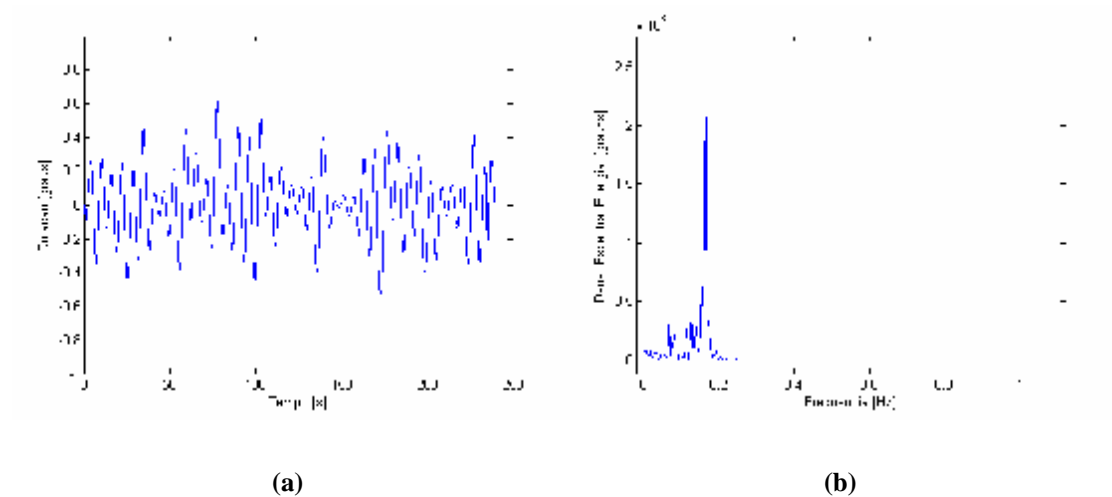
**Figura D.16 – Medição 8: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



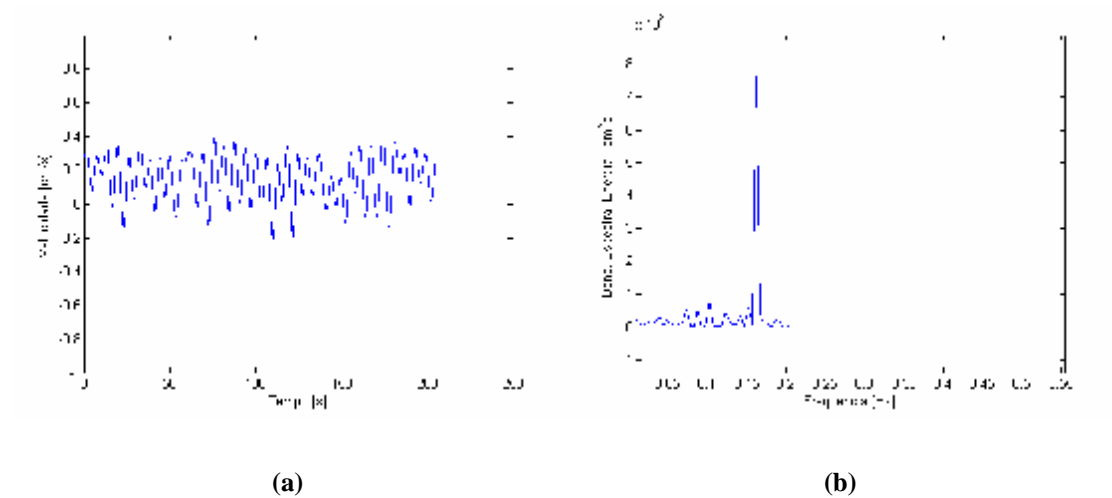
**Figura D.17 – Medição 9: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



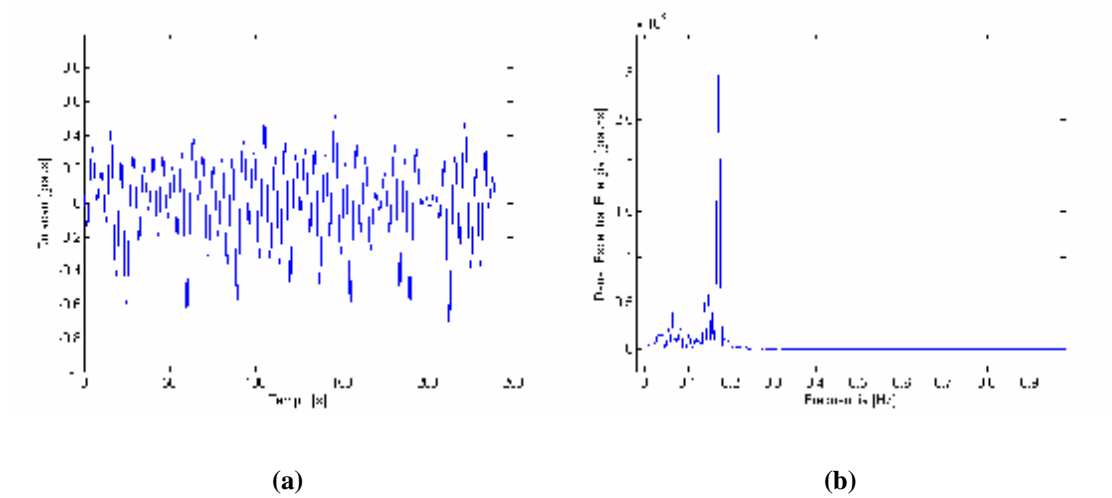
**Figura D.18 – Medição 9: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



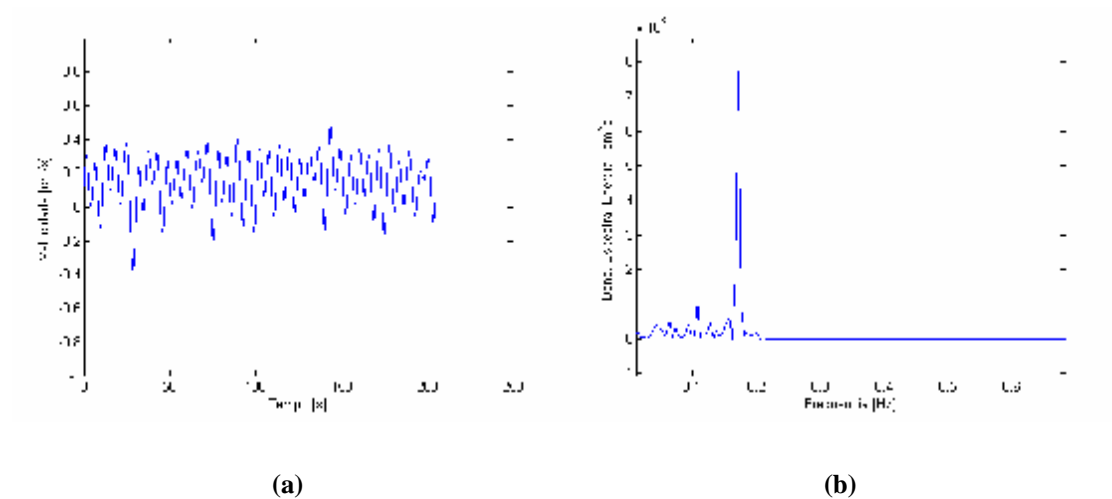
**Figura D.19 – Medição 10: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



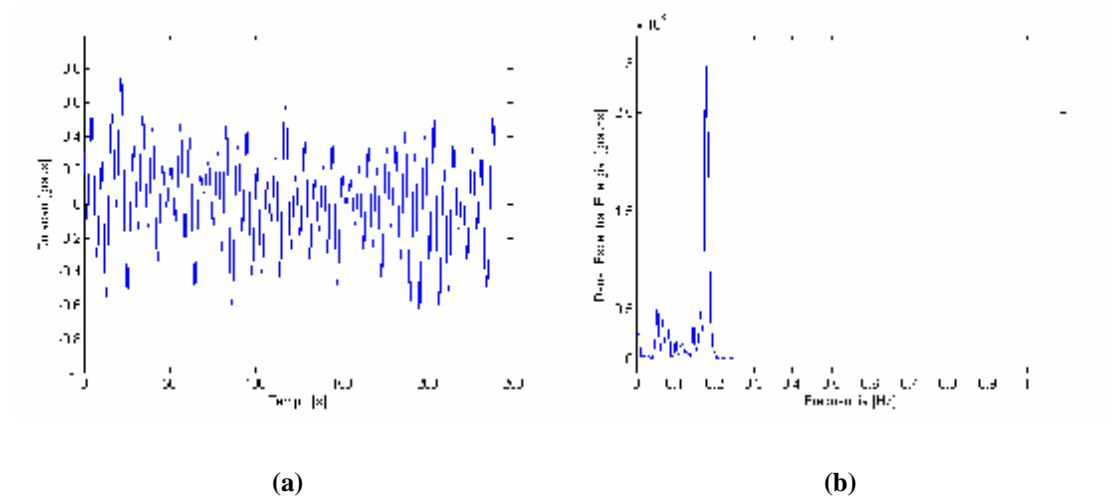
**Figura D.20 – Medição 10: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



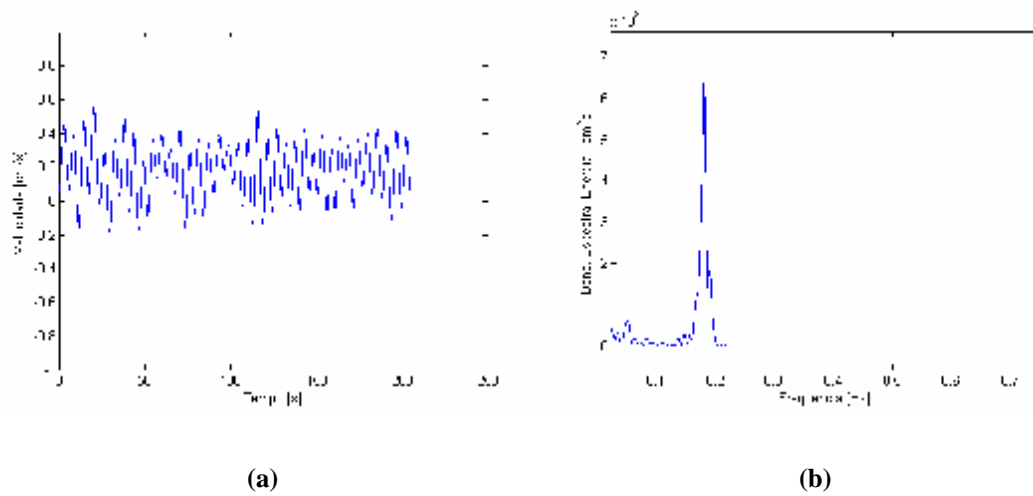
**Figura D.21 – Medição 11: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



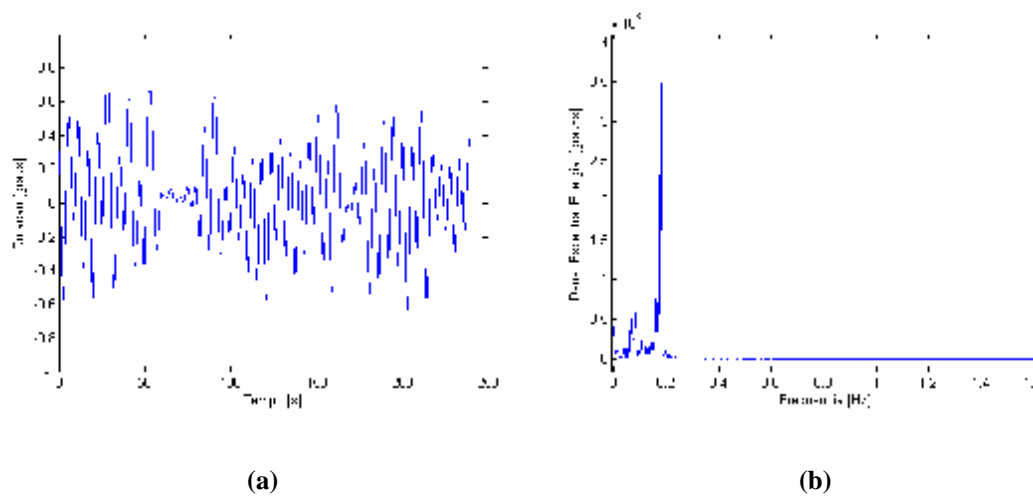
**Figura D.22 – Medição 11: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



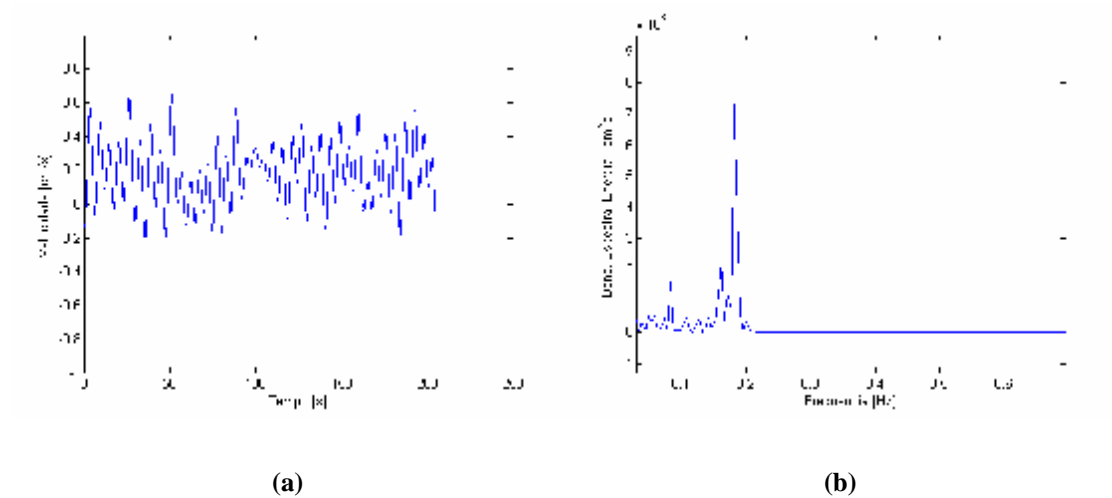
**Figura D.23 – Medição 12: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



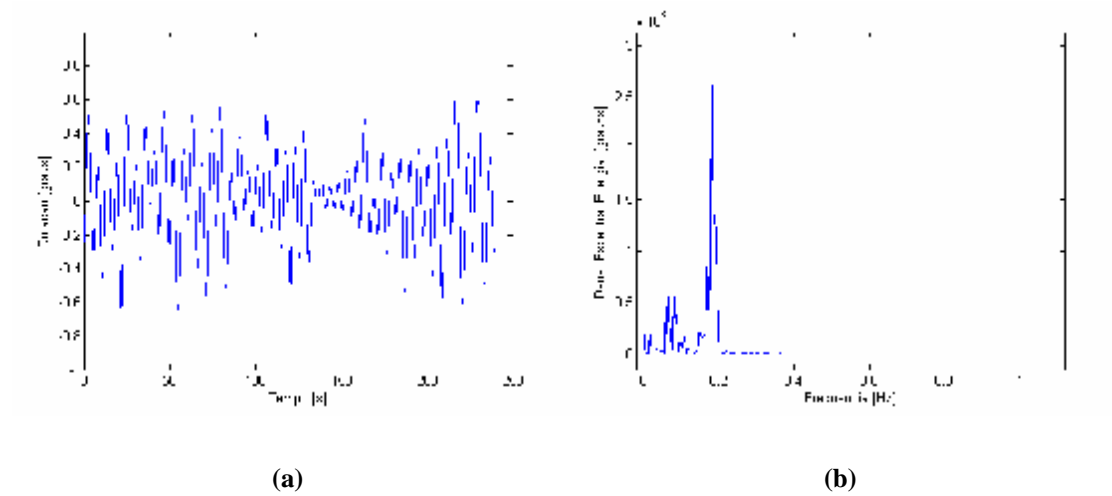
**Figura D.24 – Medição 12: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



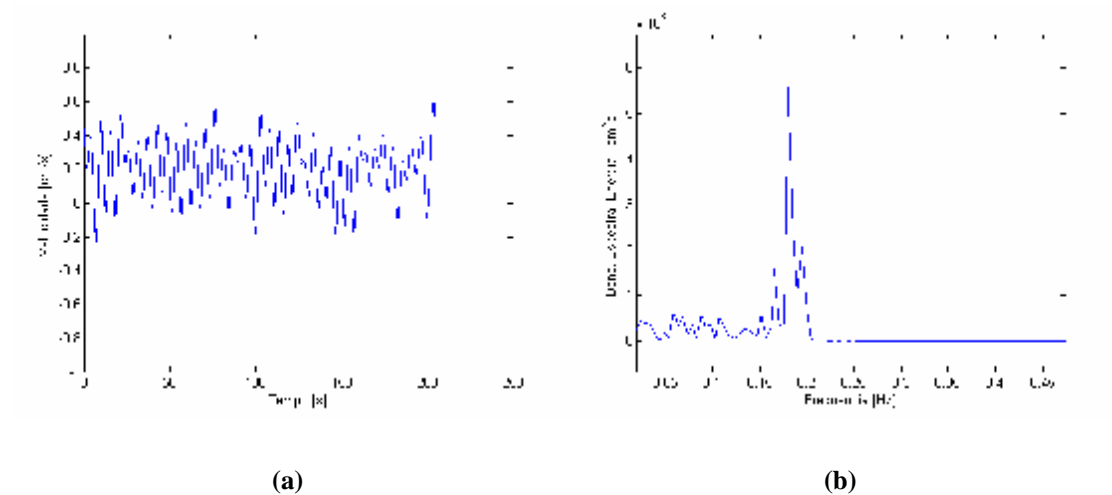
**Figura D.25 – Medição 13: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



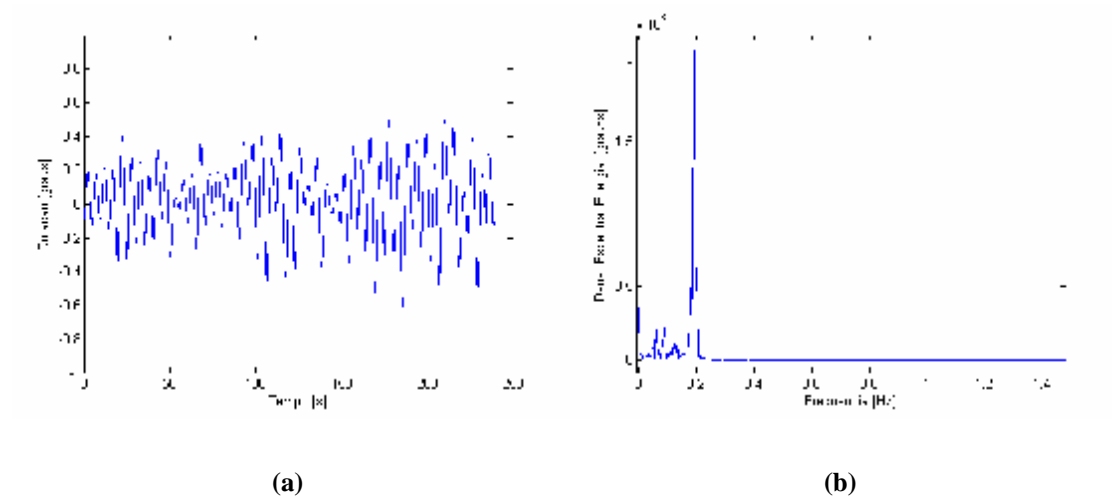
**Figura D.26 – Medição 13: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



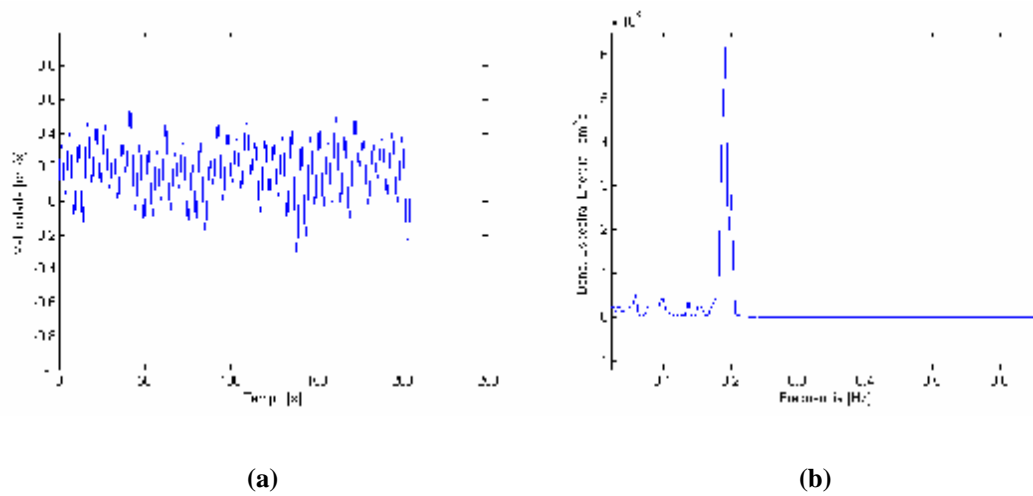
**Figura D.27 – Medição 14: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



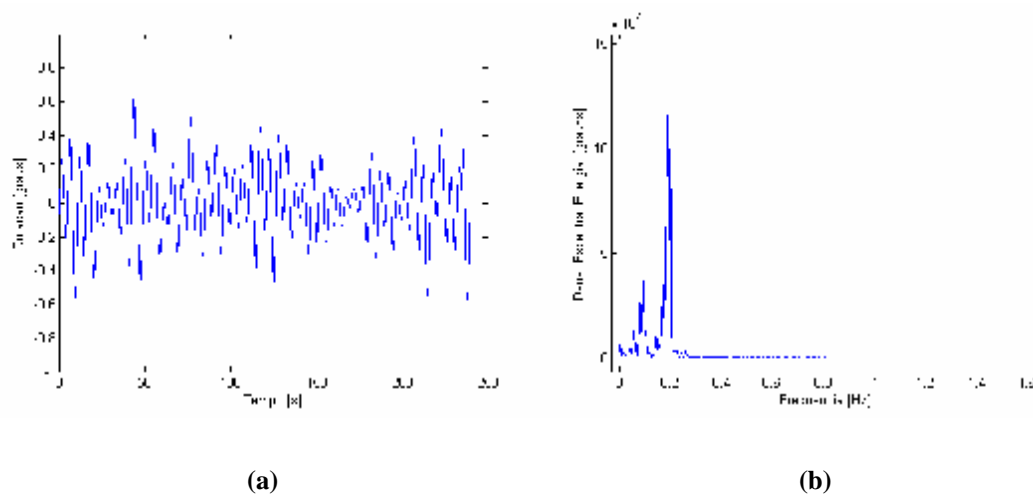
**Figura D.28 – Medição 14: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



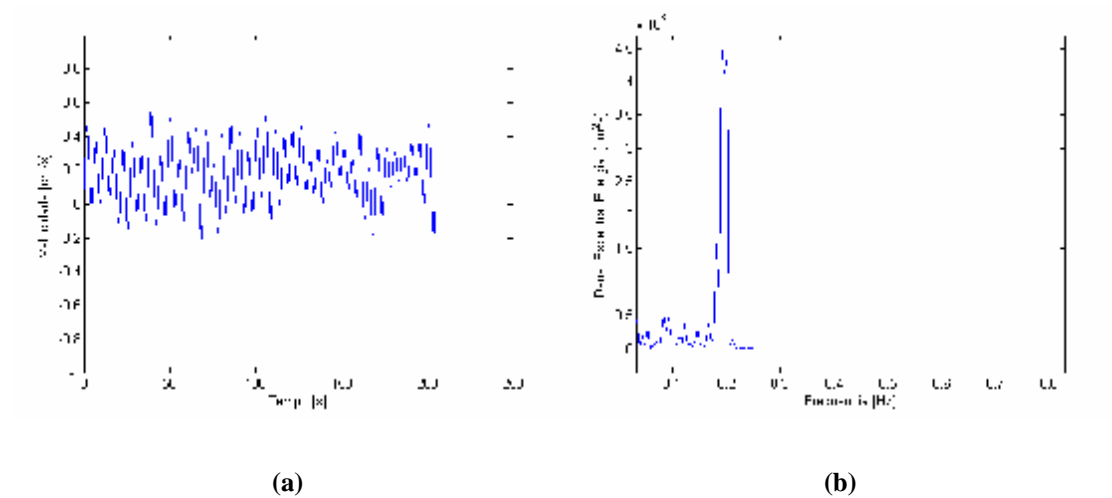
**Figura D.29 – Medição 15: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



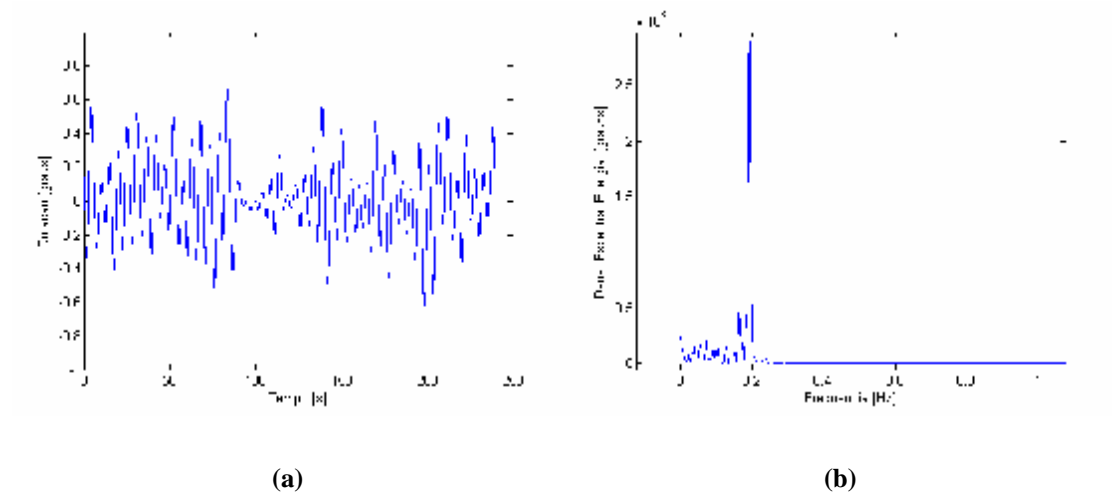
**Figura D.30 – Medição 15: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



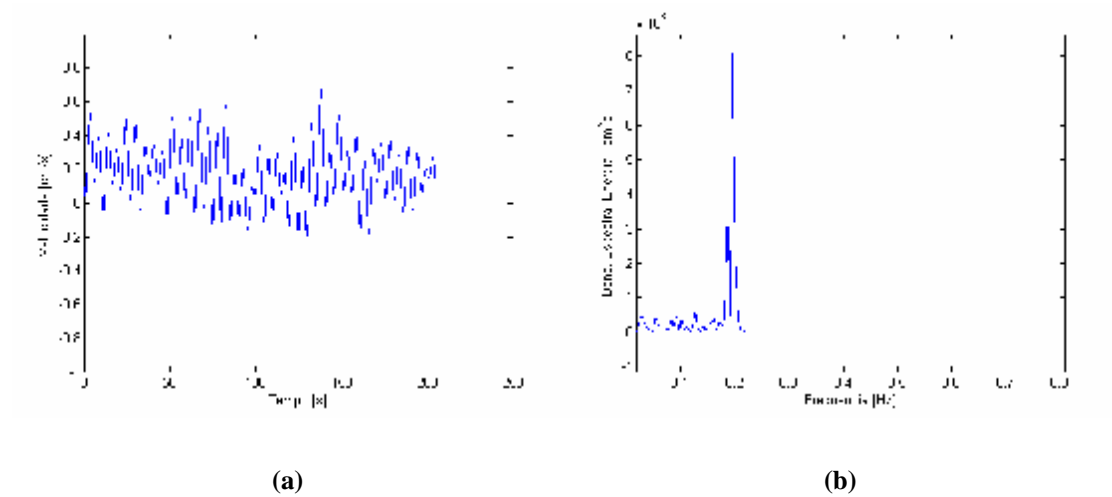
**Figura D.31 – Medição 16: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



**Figura D.32 – Medição 16: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



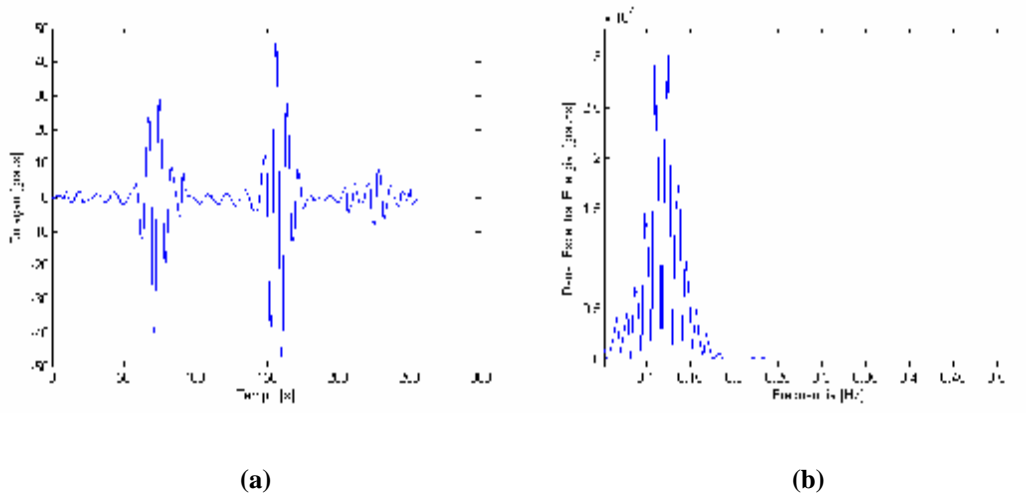
**Figura D.33 – Medição 17: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



**Figura D.34 – Medição 17: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

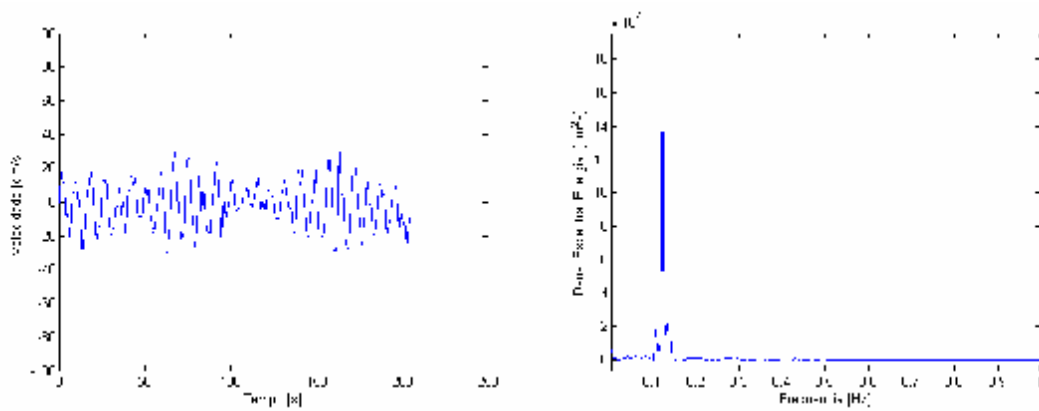
**APENDICE V – SÉRIES TEMPORAIS DE ROTAÇÃO, VELOCIDADE DE FLUXO MEDIDA NA ESTEIRA E RESPECTIVOS ESPECTROS DE DENSIDADE DE ENERGIA PARA A PLACA DE ALUMÍNIO DE 0,3 METROS DE LARGURA.**

Medição	Velocidade de Correnteza [m/s]
1	0,179363333
2	0,18888
3	0,231705
4	0,281191667
5	0,306886667
6	0,3145
7	0,334485



**Figura E.1 – Medição 1: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**

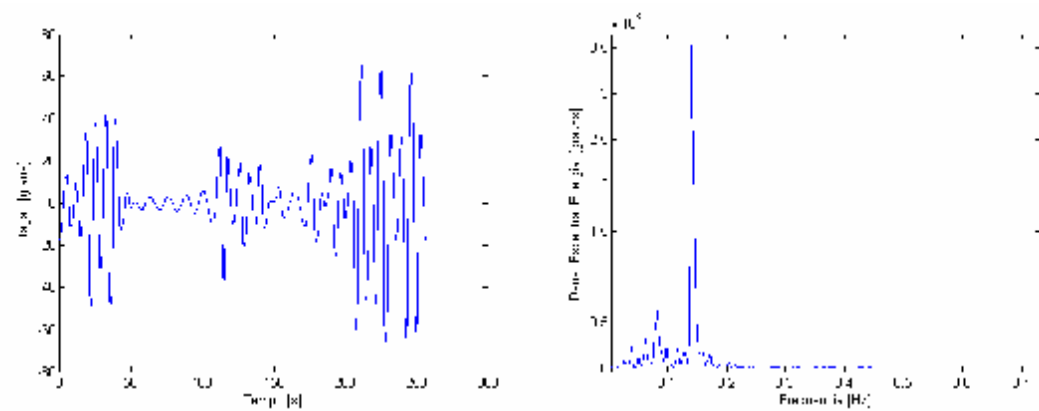




(a)

(b)

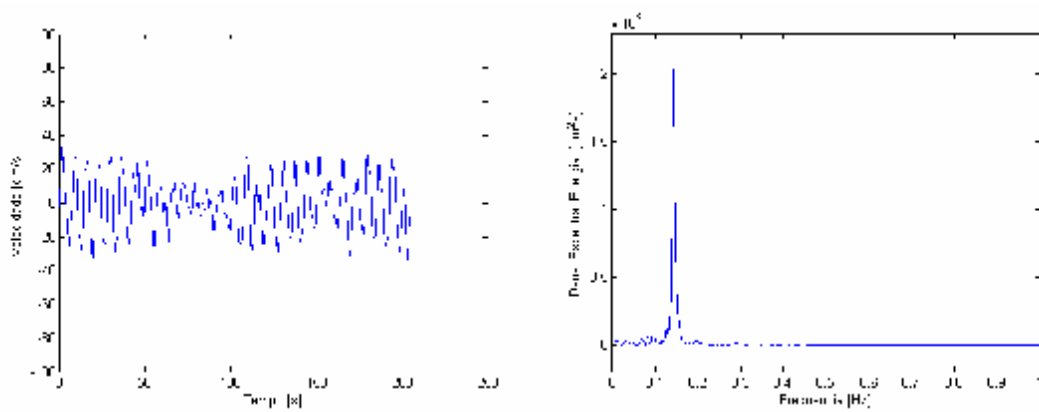
**Figura E.2 – Medição 1: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

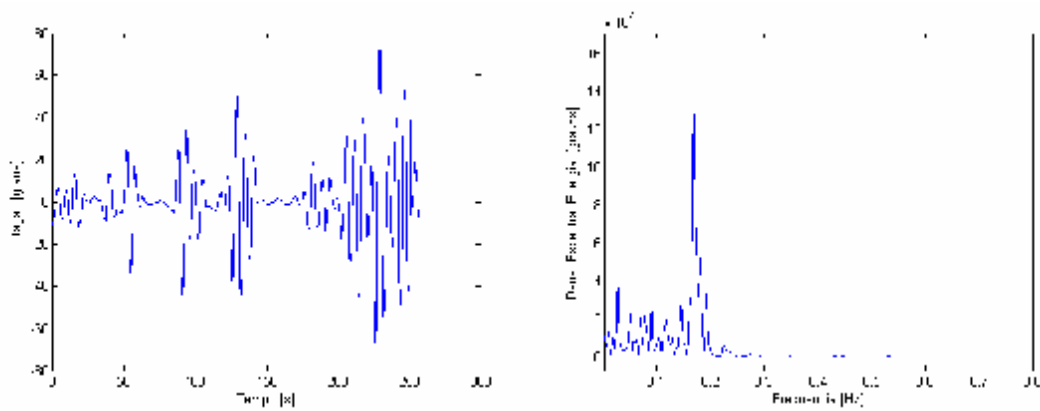
**Figura E.3 – Medição 2: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

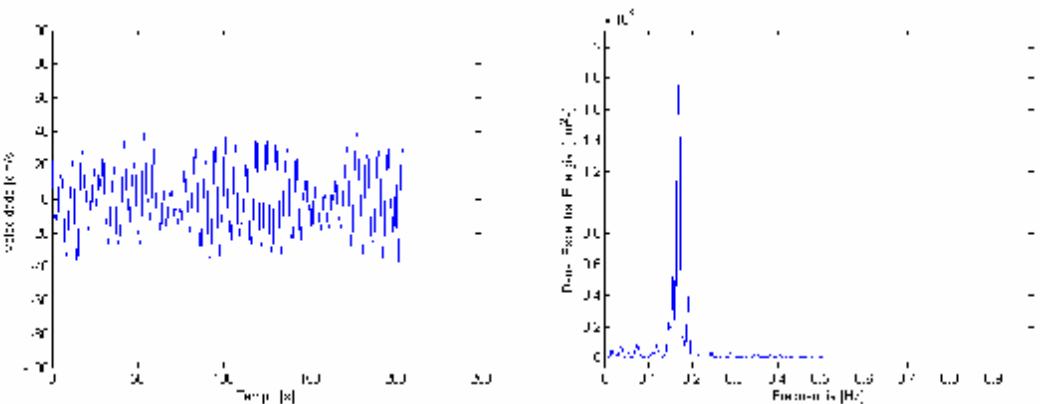
(b)

**Figura E.4 – Medição 2: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



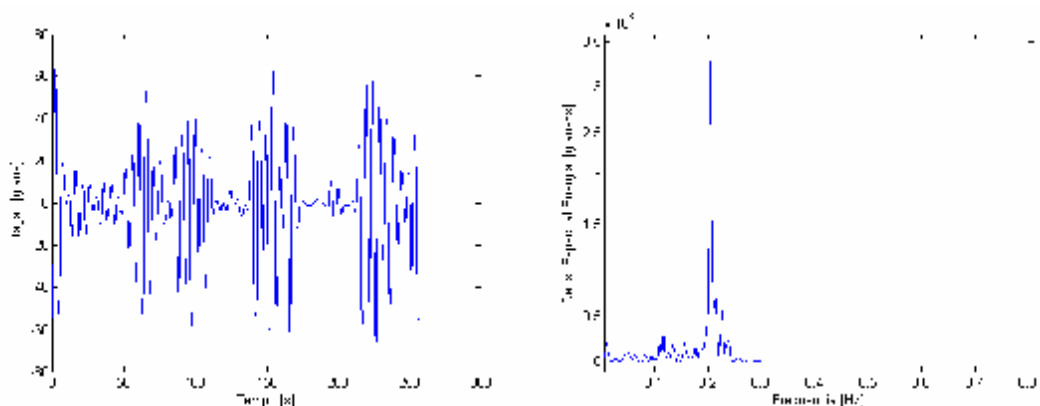
(a) (b)

**Figura E.5 – Medição 3: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



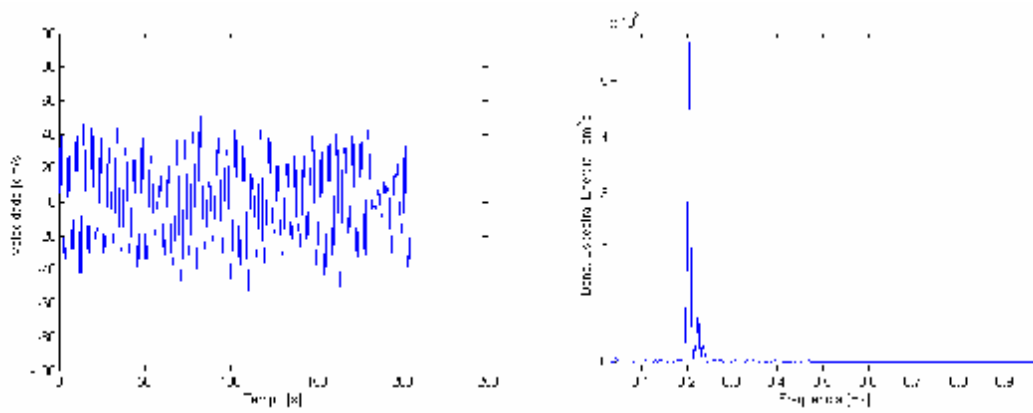
(a) (b)

**Figura E.6 – Medição 3: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a) (b)

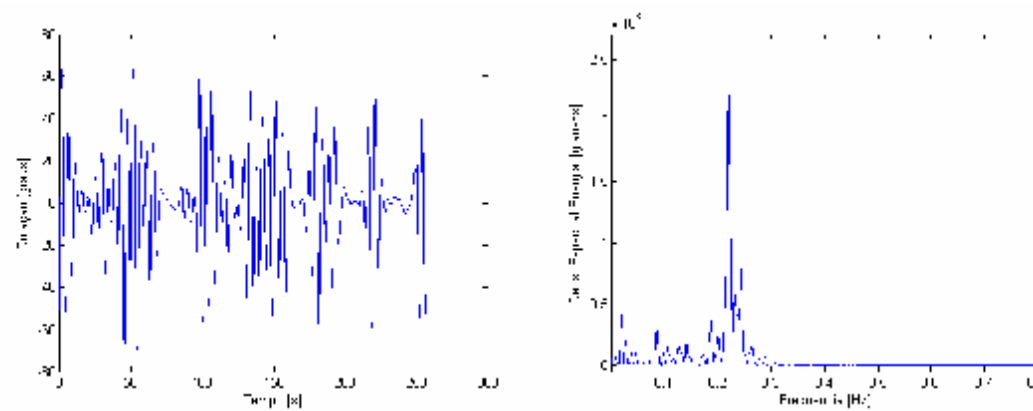
**Figura E.7 – Medição 4: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

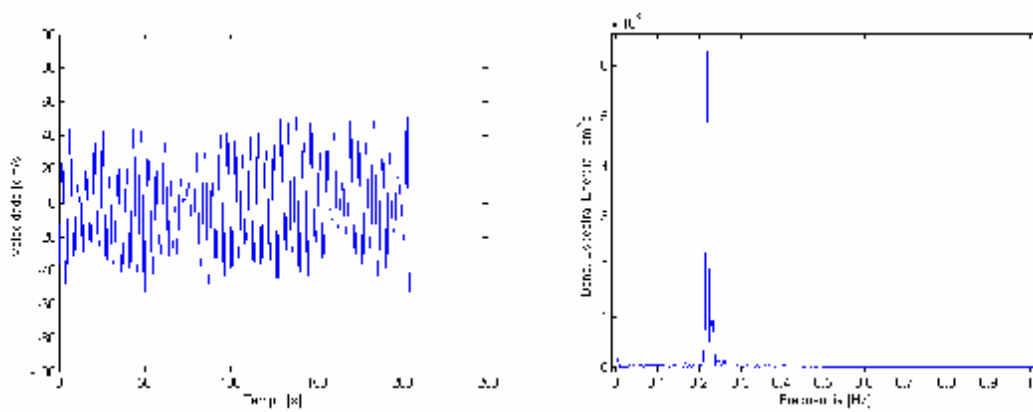
**Figura E.8 – Medição 4: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

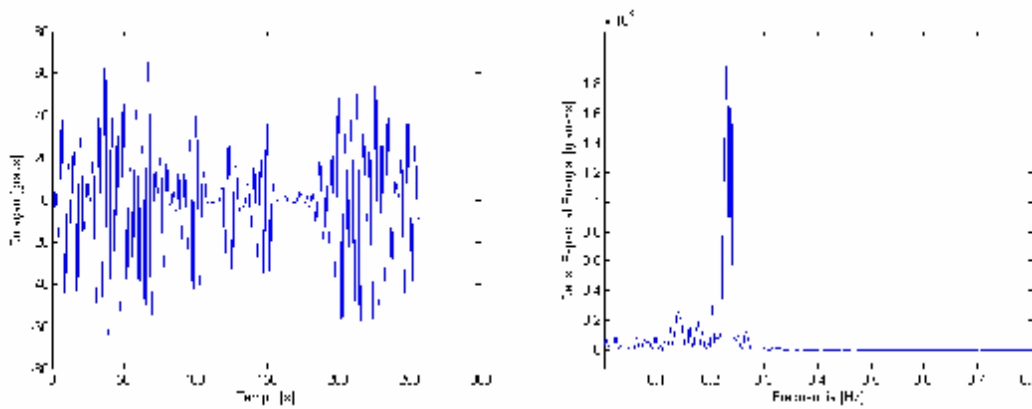
**Figura E.9 – Medição 5: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

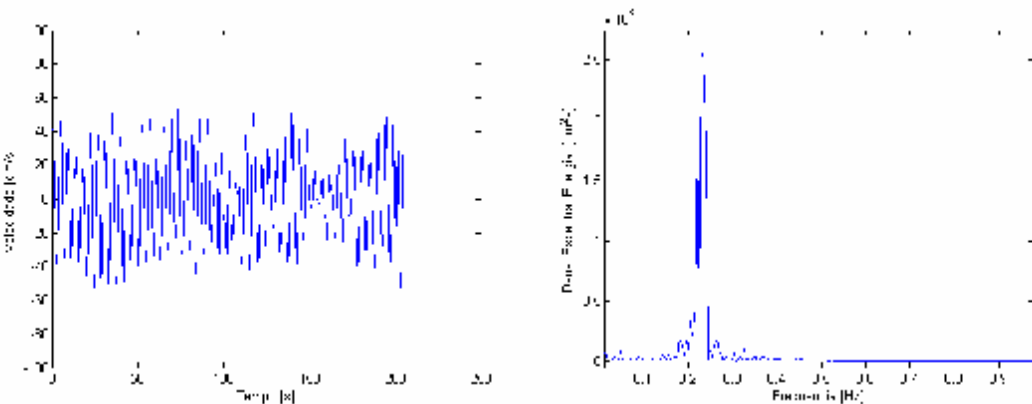
(b)

**Figura E.10 – Medição 5: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



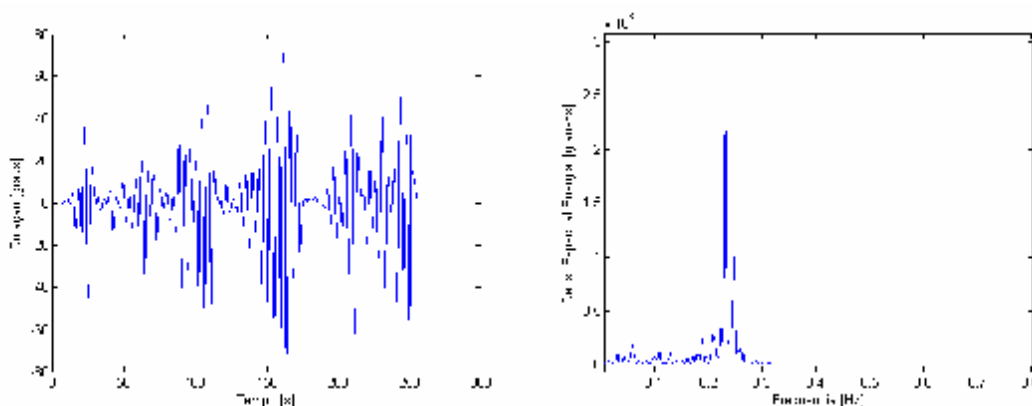
(a) (b)

**Figura E.11 – Medição 6: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



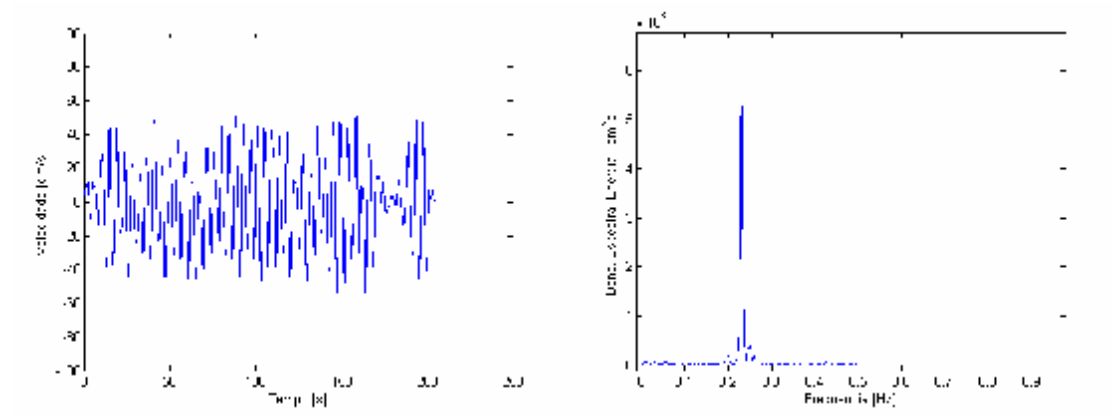
(a) (b)

**Figura E.12 – Medição 6: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a) (b)

**Figura E.13 – Medição 7: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



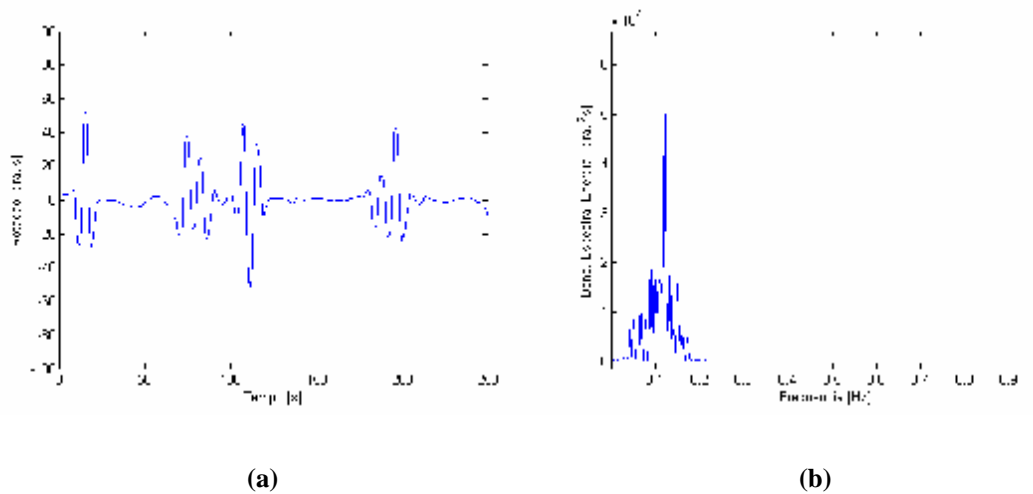
(a)

(b)

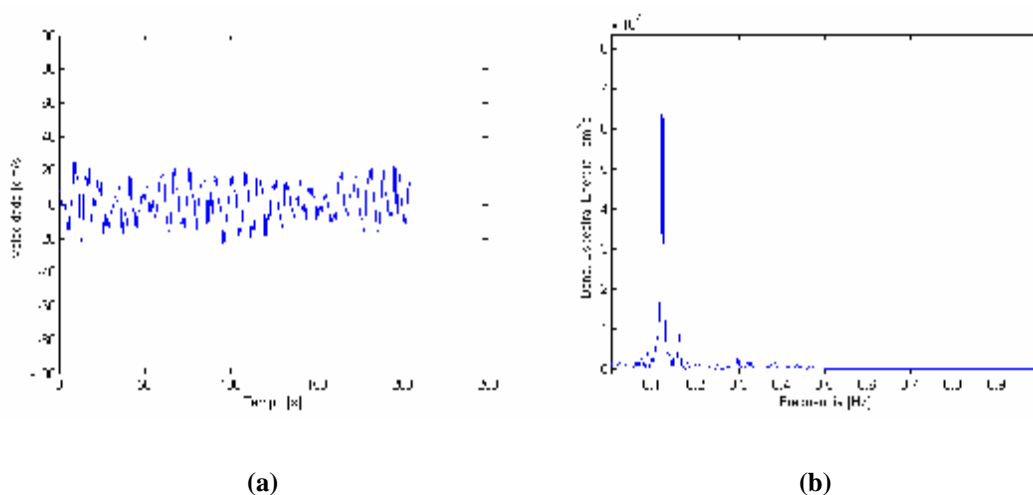
**Figura E.14 – Medição 7: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

**APENDICE VI – SÉRIES TEMPORAIS DE ROTAÇÃO, VELOCIDADE DE FLUXO MEDIDA NA ESTEIRA E RESPECTIVOS ESPECTROS DE DENSIDADE DE ENERGIA PARA A PLACA DE PVC DE 0,3 METROS DE LARGURA.**

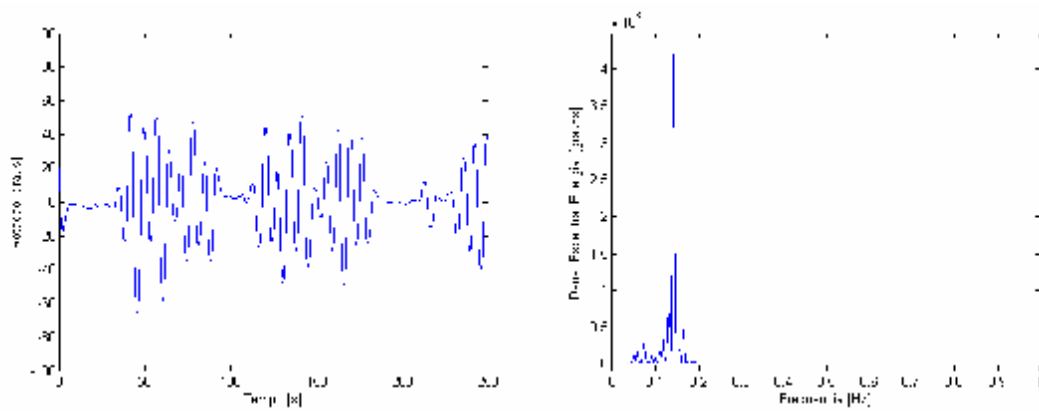
Medição	Velocidade de Correnteza [m/s]
1	0,095617
2	0,140345
3	0,15462
4	0,166992
5	0,166992
6	0,180315
7	0,207913



**Figura F.1 – Medição 1: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



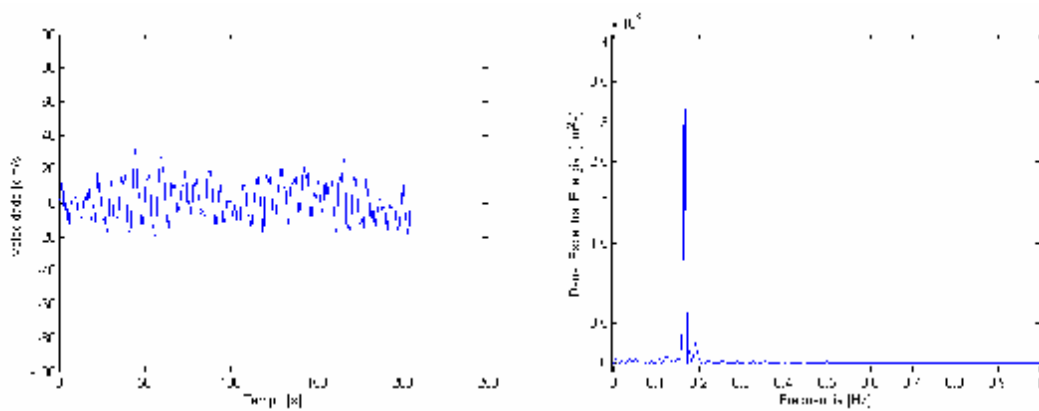
**Figura F.2 – Medição 1: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

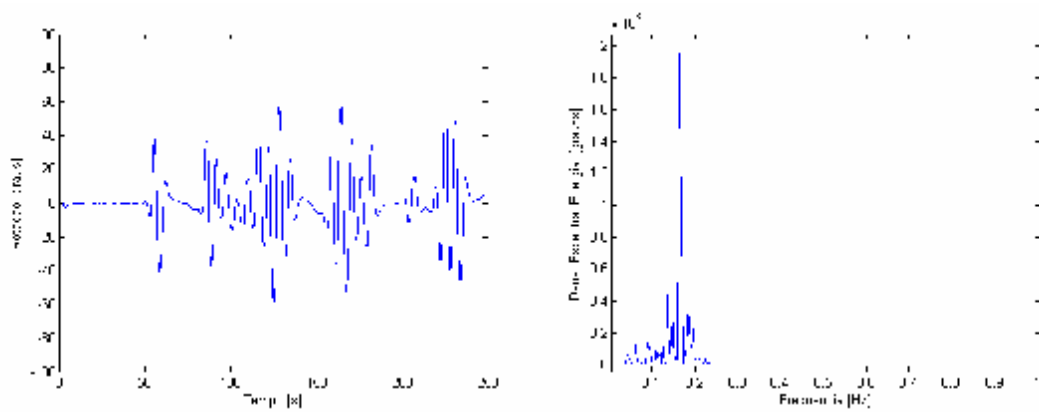
**Figura F.3 – Medição 2: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

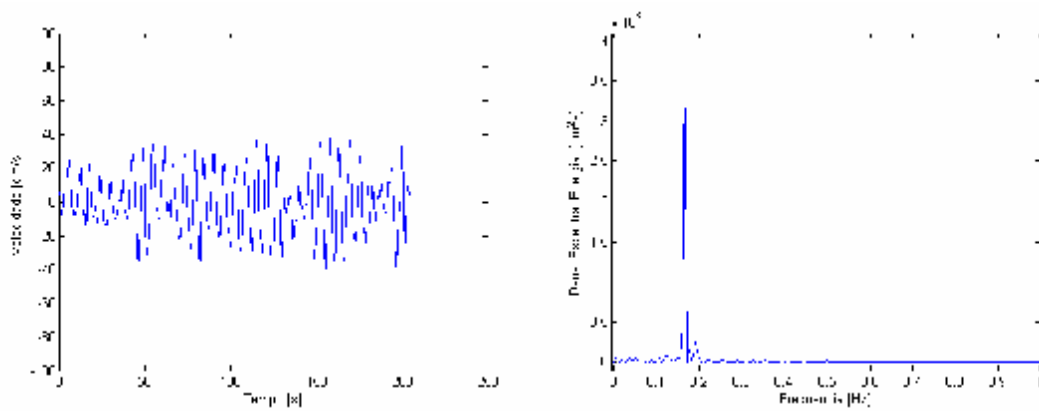
**Figura F.4 – Medição 2: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

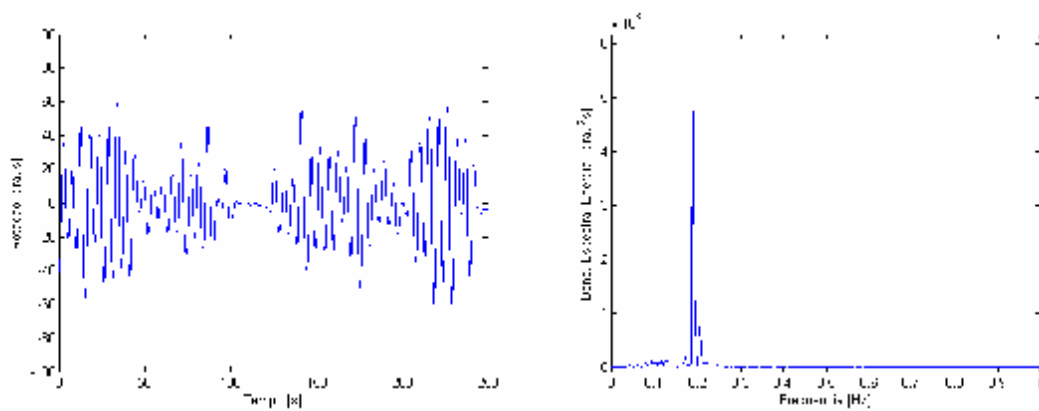
**Figura F.5 – Medição 3: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

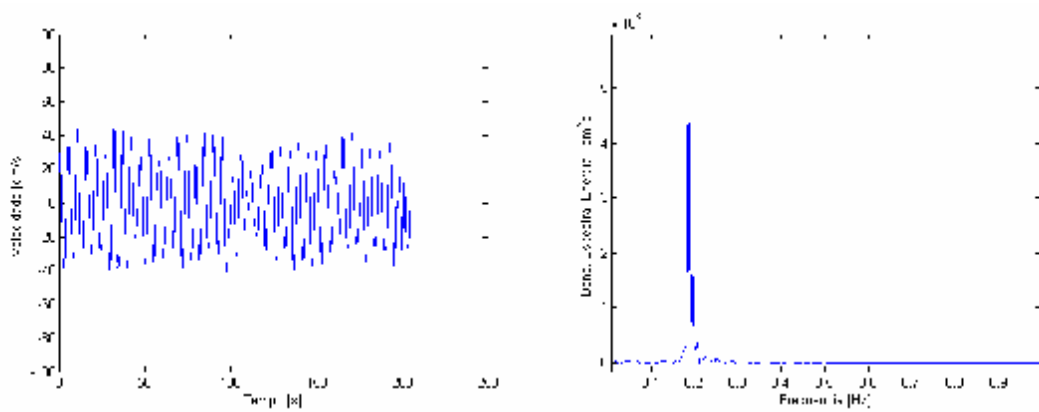
**Figura F.6 – Medição 3: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

**Figura F.7 – Medição 4: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**

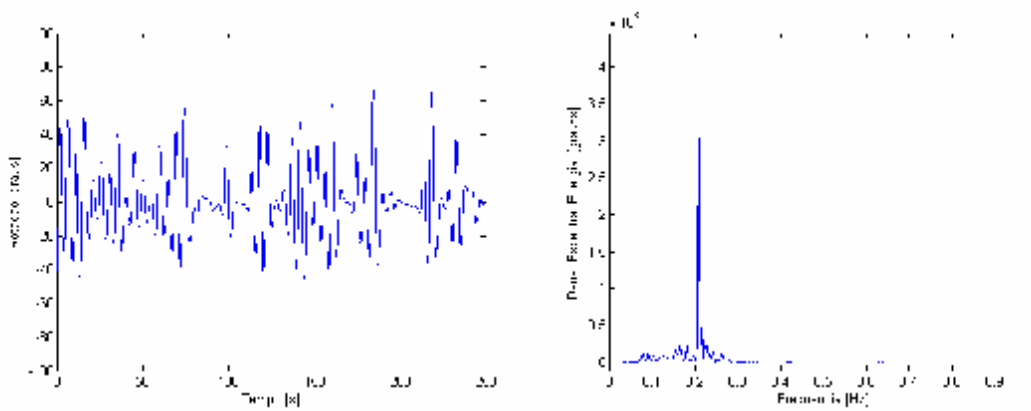


(a)

(b)

**Figura F.8 – Medição 4: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

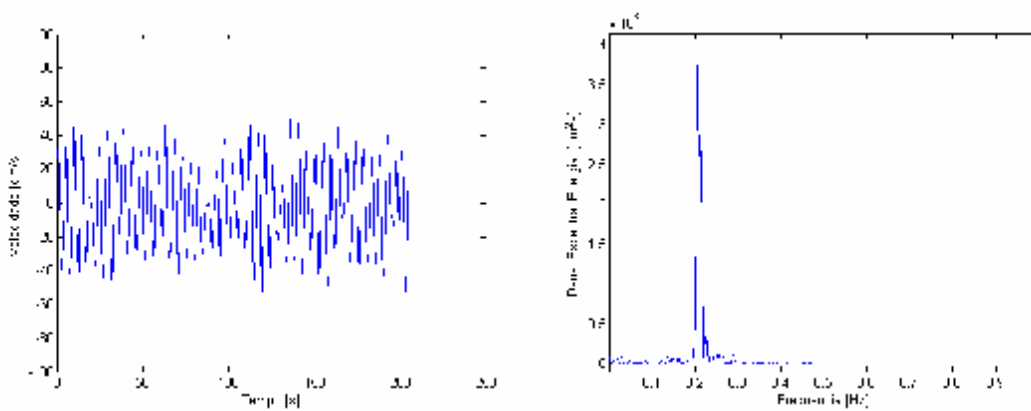




(a)

(b)

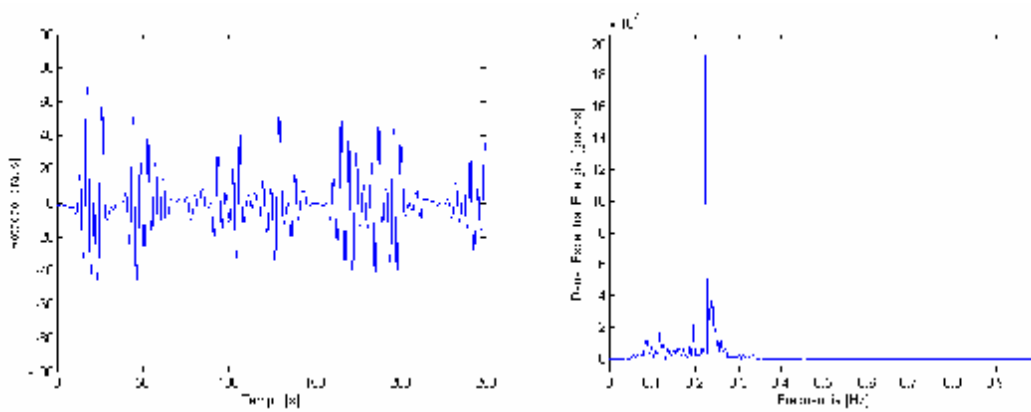
**Figura F.9 – Medição 5: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

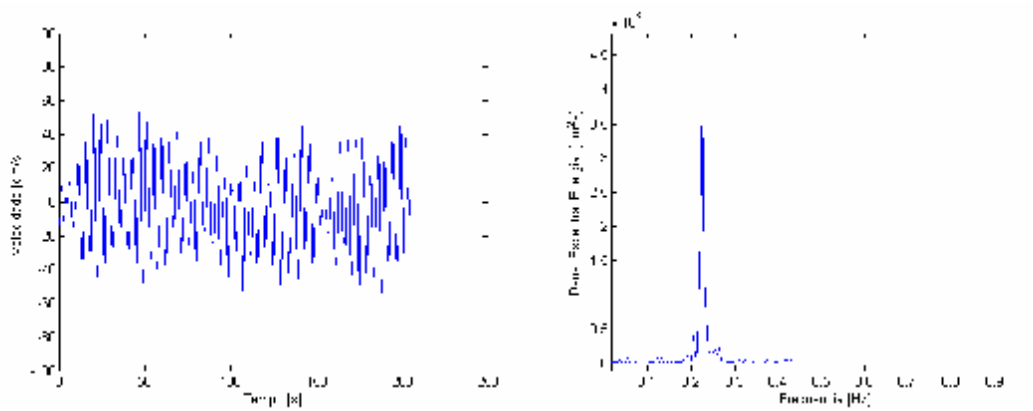
**Figura F.10 – Medição 5: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

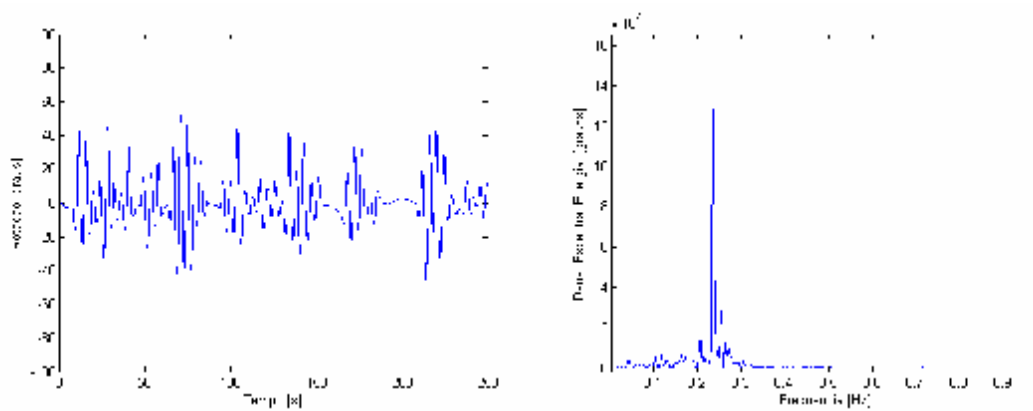
**Figura F.11 – Medição 6: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

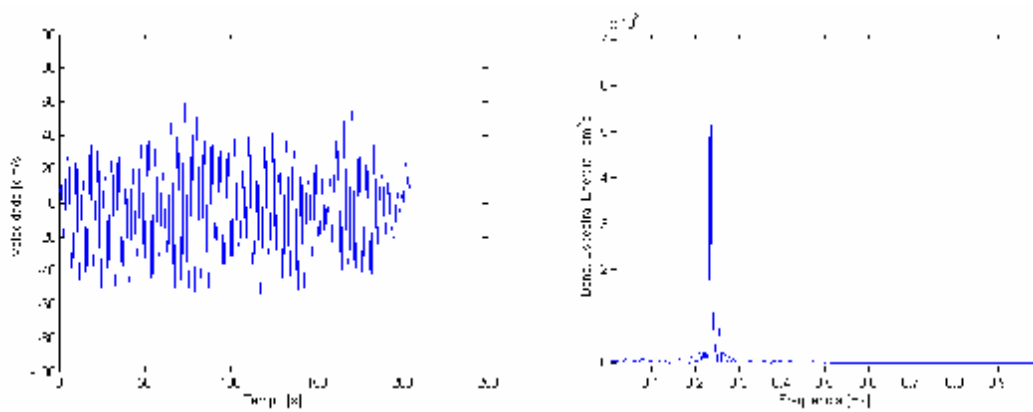
**Figura F.12 – Medição 6: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

**Figura F.13 – Medição 7: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



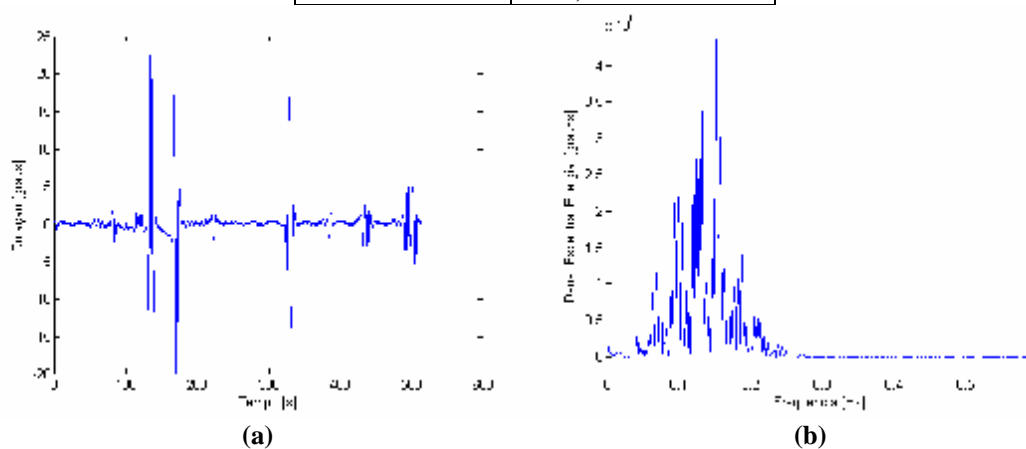
(a)

(b)

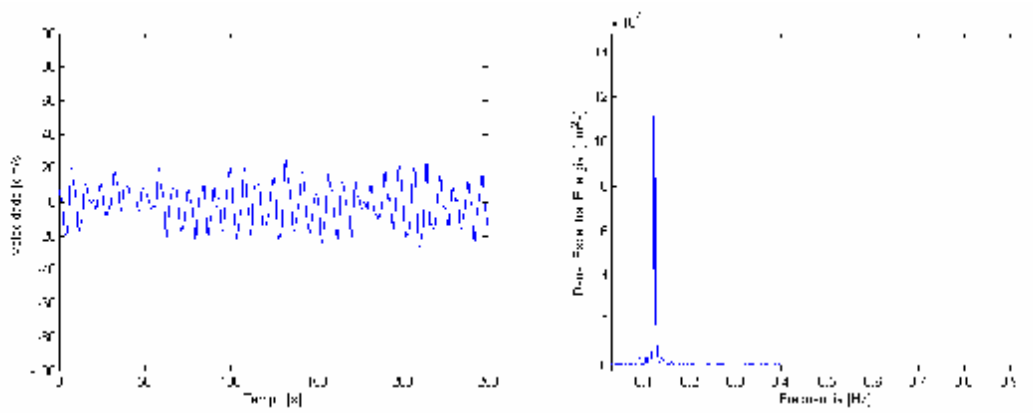
**Figura F.14 – Medição 7: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

**APENDICE VII– SÉRIES TEMPORAIS DE ROTAÇÃO, VELOCIDADE DE FLUXO MEDIDA NA ESTEIRA E RESPECTIVOS ESPECTROS DE DENSIDADE DE ENERGIA PARA A PLACA DE PVC DE 0,2 METROS DE LARGURA.**

Medição	Velocidade de Correnteza [m/s]
1	0,168895
2	0,169846667
3	0,204106667
4	0,238366667
5	0,265013333
6	0,287853333
7	0,300225
8	0,313548333
9	0,329726667



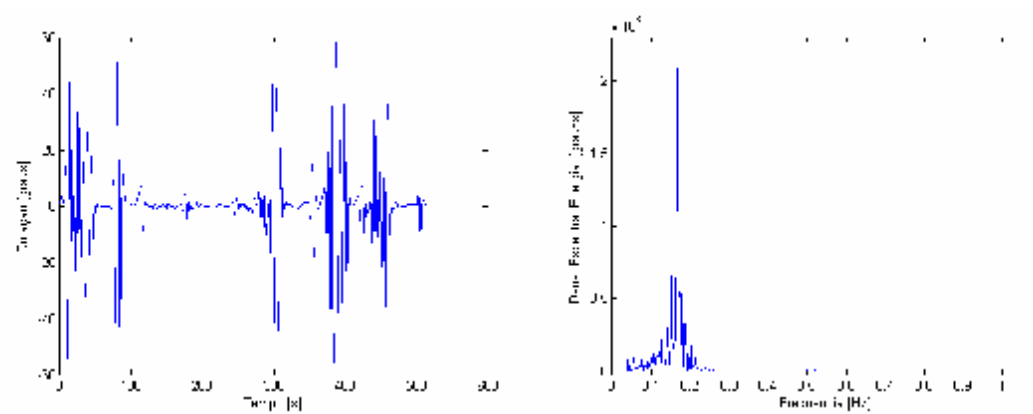
**Figura G.1 – Medição 1: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

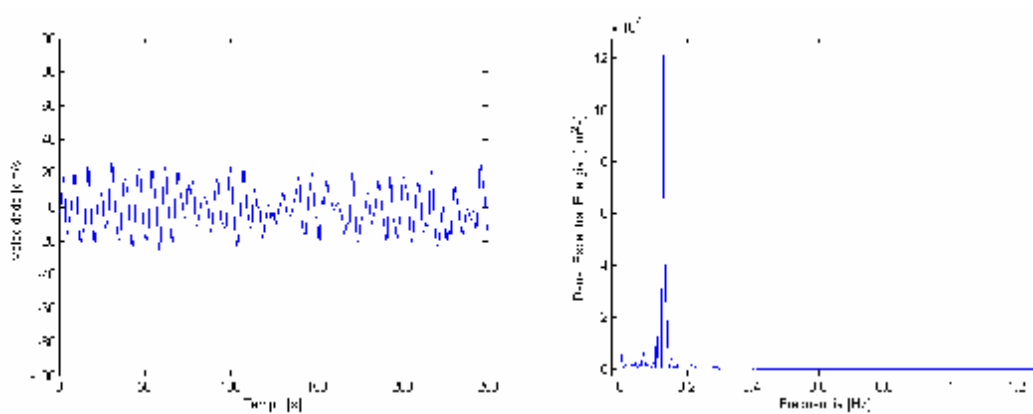
**Figura G.2 – Medição 1: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

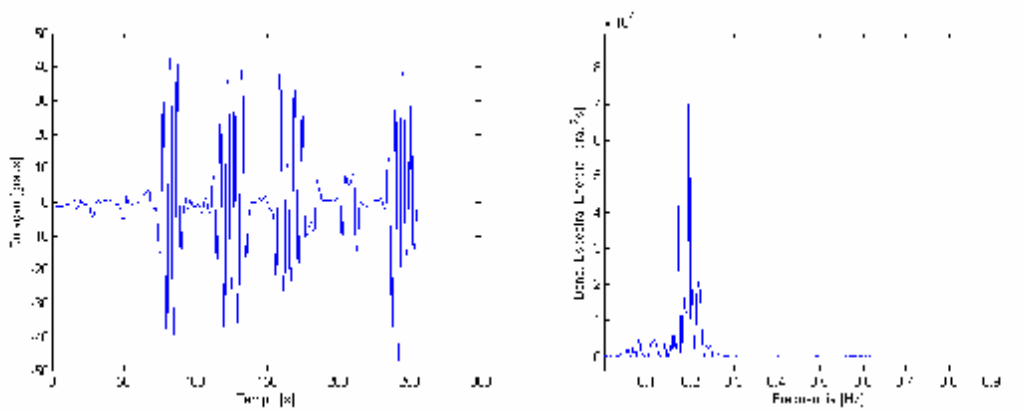
**Figura G.3 – Medição 2: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

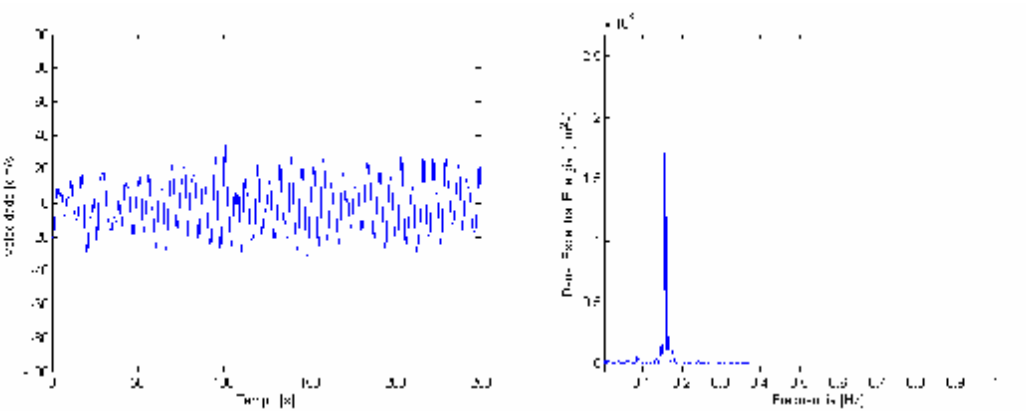
**Figura G.4 – Medição 2: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

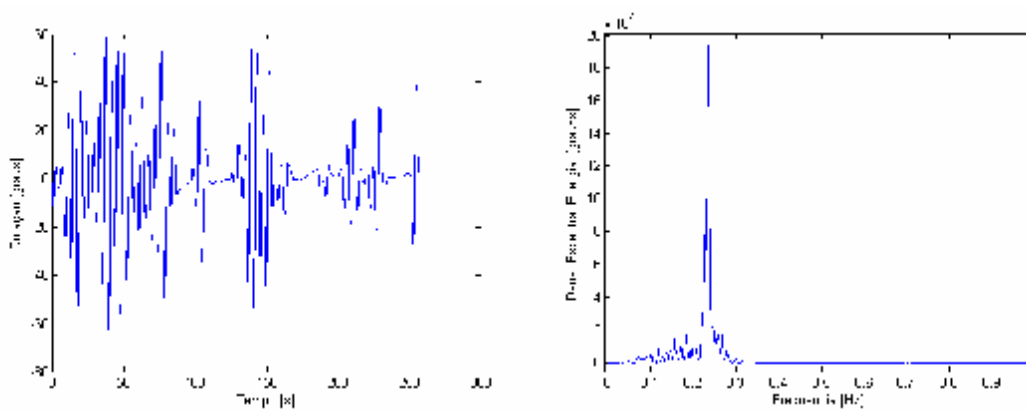
**Figura G.5 – Medição 3: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

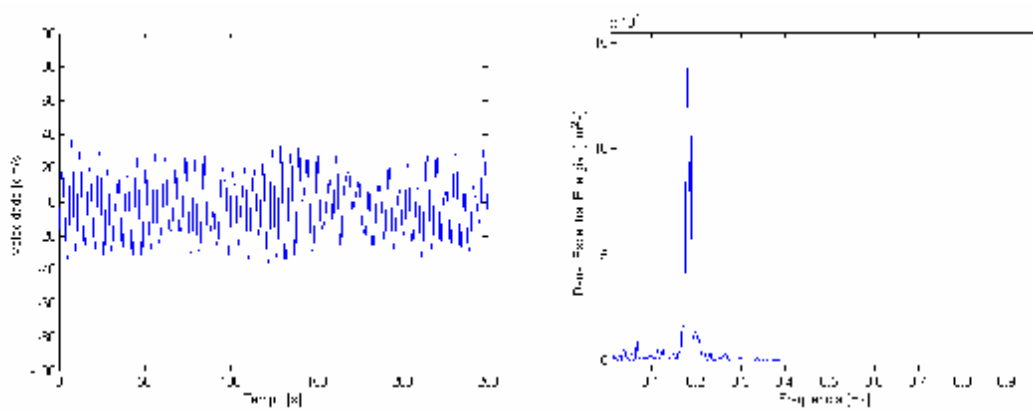
**Figura G.6 – Medição 3: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

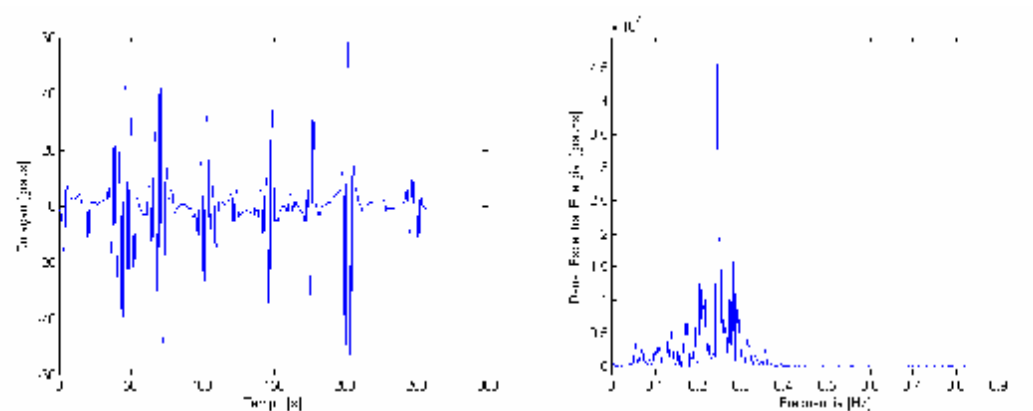
**Figura G.7 – Medição 4: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

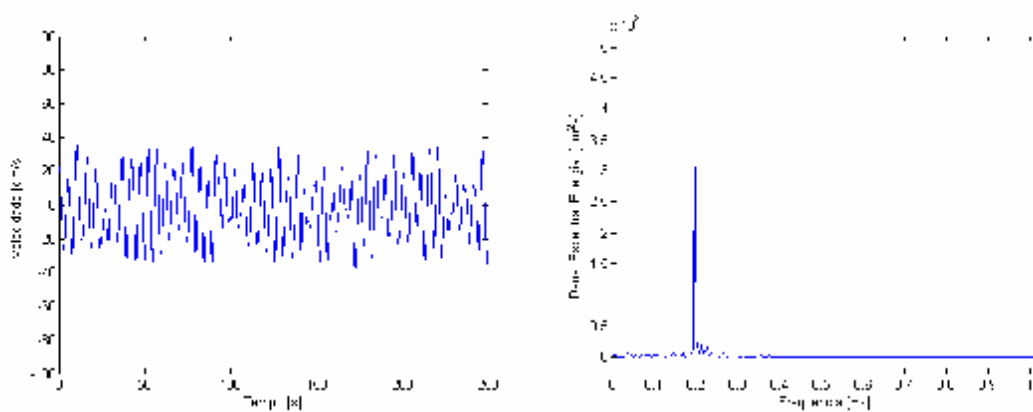
**Figura G.8 – Medição 4: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

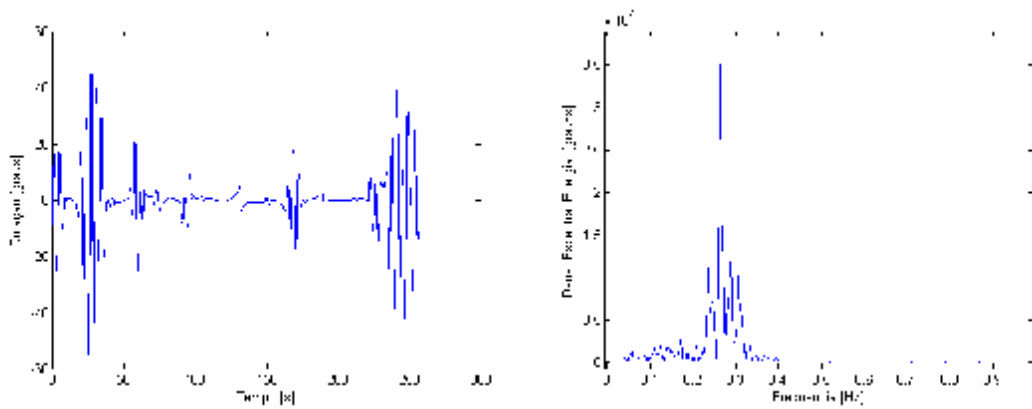
**Figura G.9 – Medição 5: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

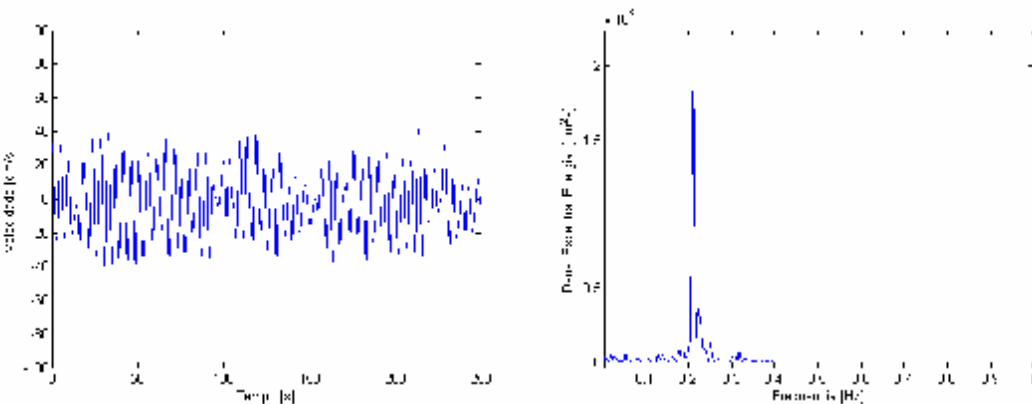
(b)

**Figura G.10 – Medição 5: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



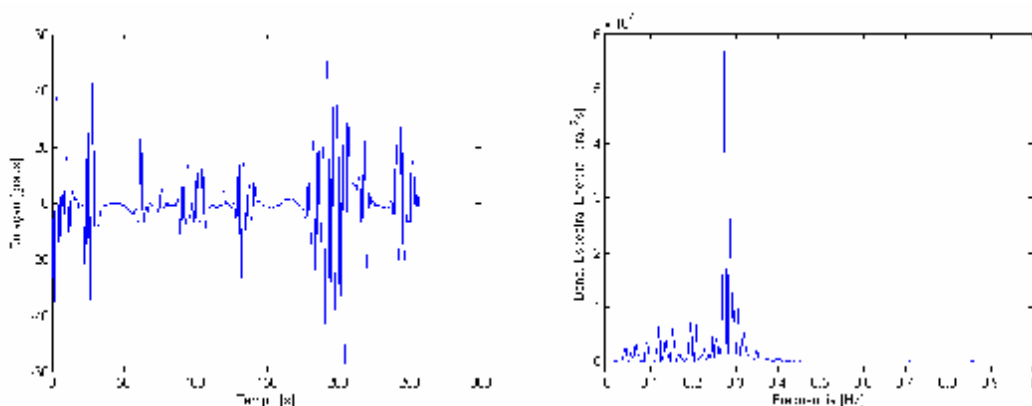
(a) (b)

**Figura G.11 – Medição 6: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



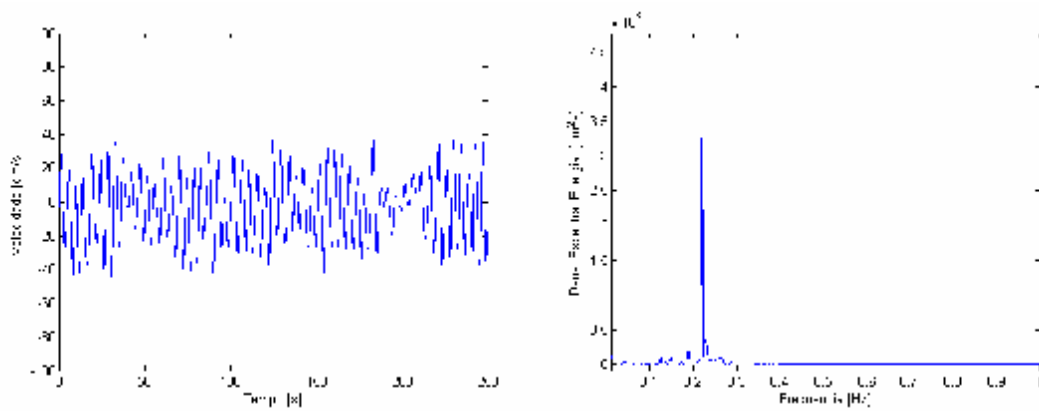
(a) (b)

**Figura G.12 – Medição 6: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a) (b)

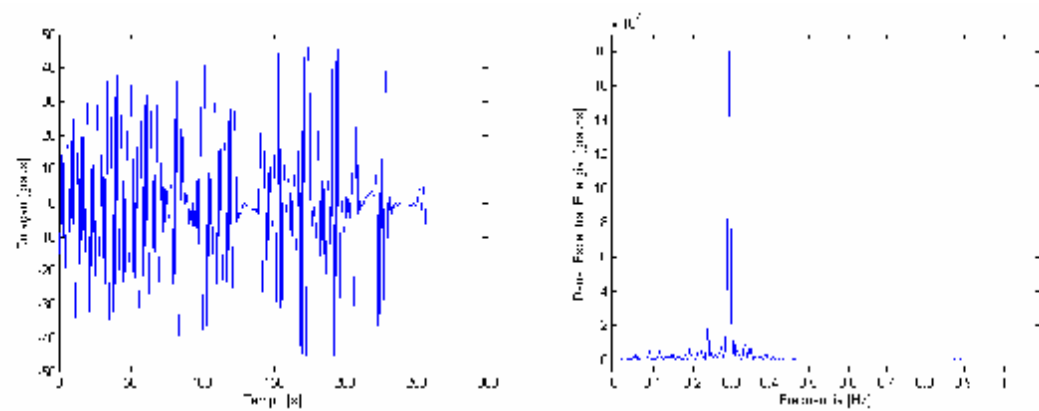
**Figura G.13 – Medição 7: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

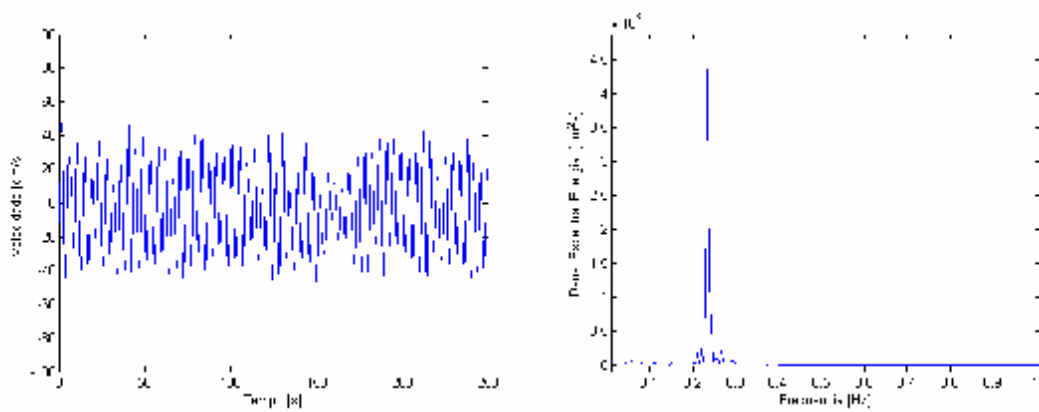
**Figura G.14 – Medição 7: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

**Figura G.15 – Medição 8: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**

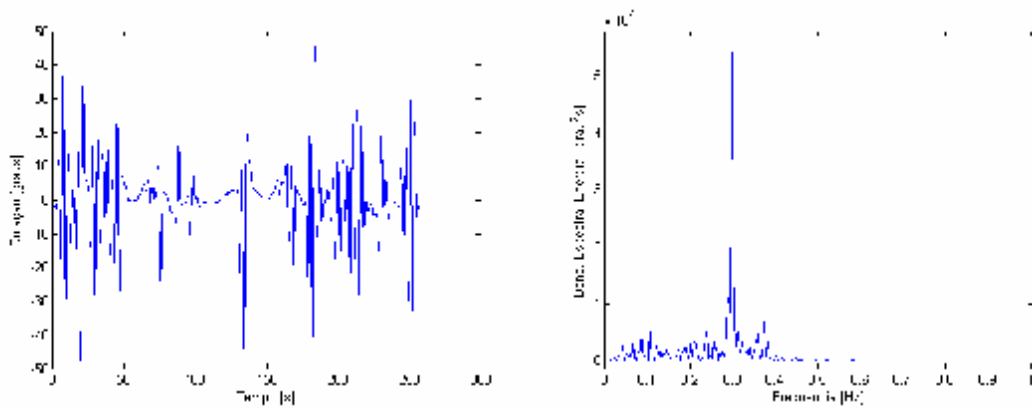


(a)

(b)

**Figura G.16 – Medição 8: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

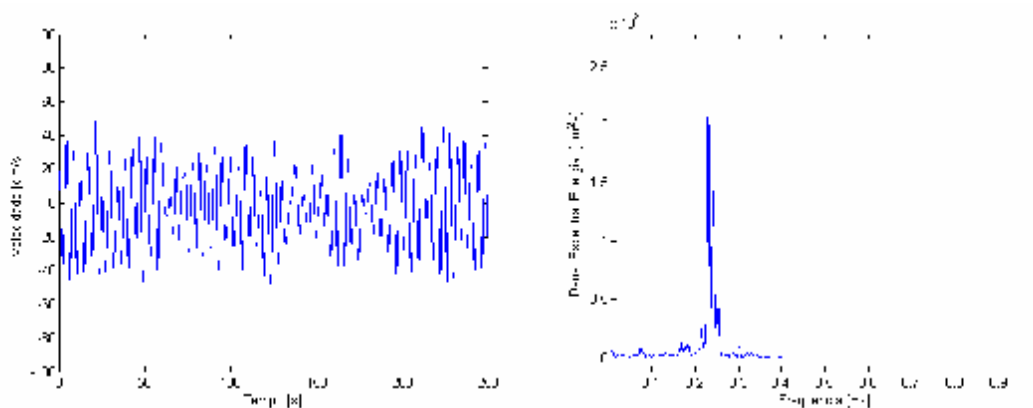




(a)

(b)

**Figura G.17 – Medição 9: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



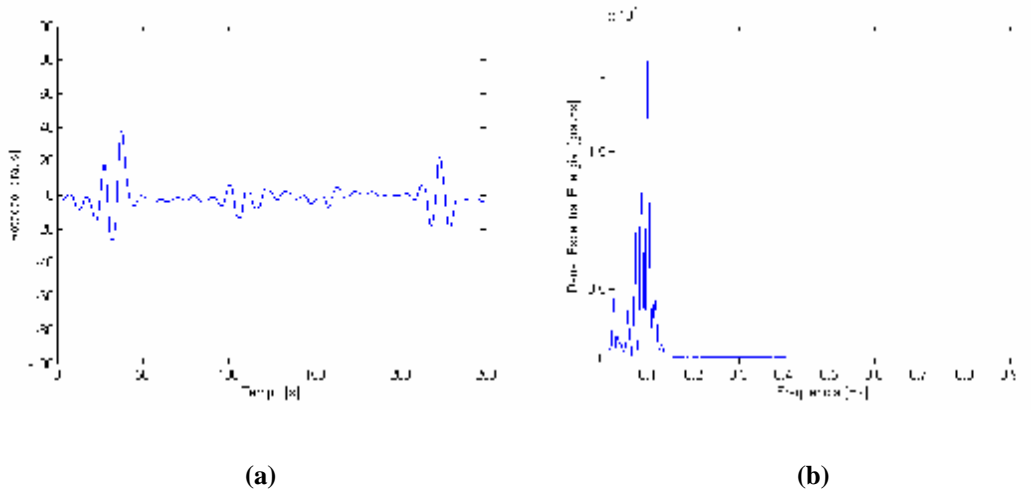
(a)

(b)

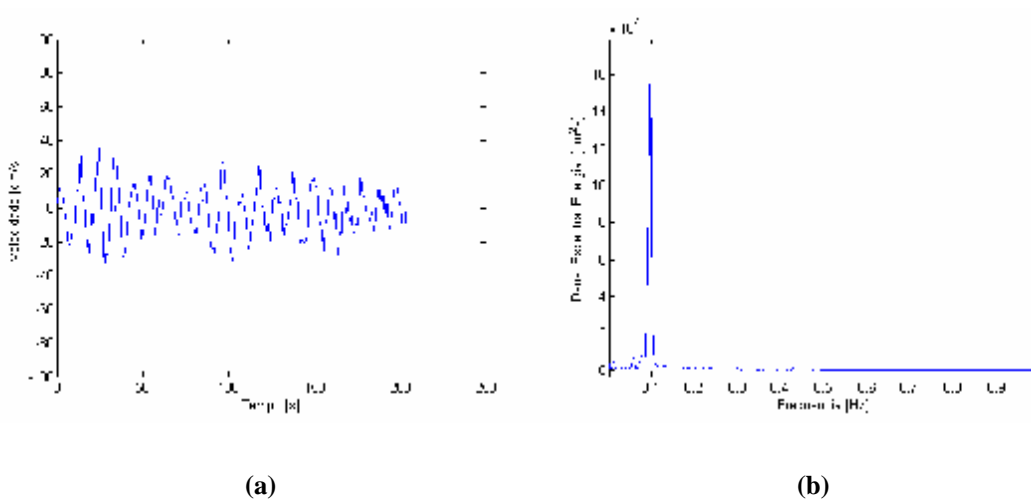
**Figura G.18 – Medição 9: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

**APENDICE VIII – SÉRIES TEMPORAIS DE ROTAÇÃO, VELOCIDADE DE FLUXO MEDIDA NA ESTEIRA E RESPECTIVOS ESPECTROS DE DENSIDADE DE ENERGIA PARA A PLACA DE ALUMÍNIO DE 0,3 METROS DE LARGURA COM FAIRING SUPRESSOR.**

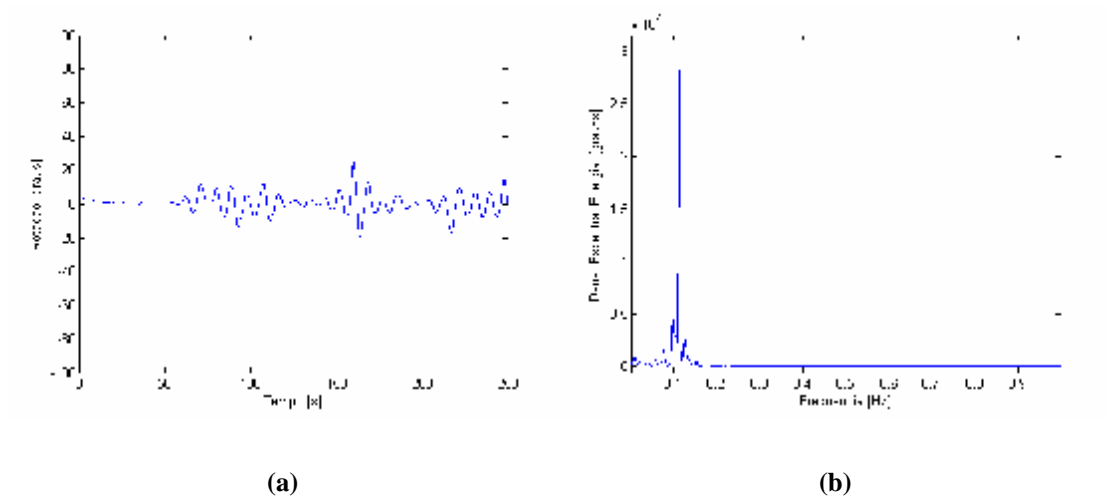
Medição	Velocidade de Correnteza [m/s]
1	0,158426667
2	0,174605
3	0,213623333
4	0,255496667
5	0,290708333
6	0,30879
7	0,332581667



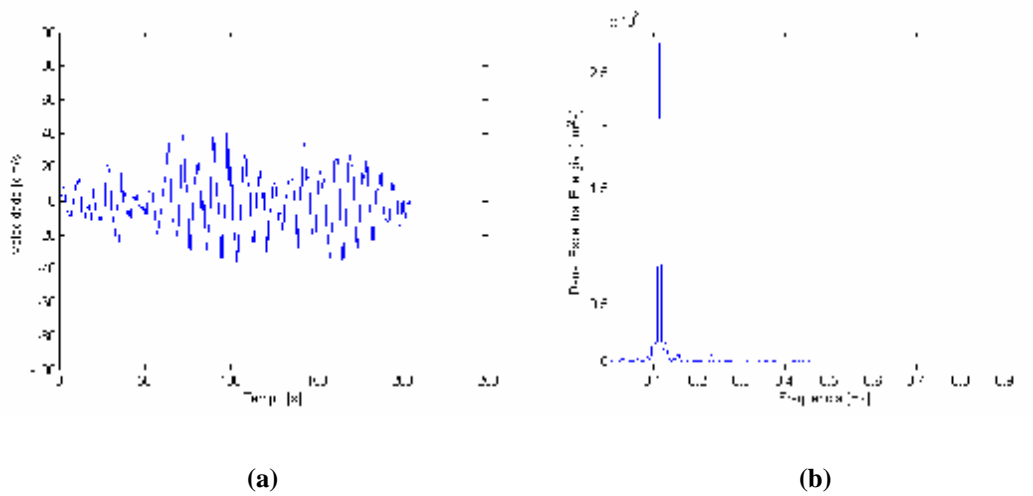
**Figura H.1 – Medição 1: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



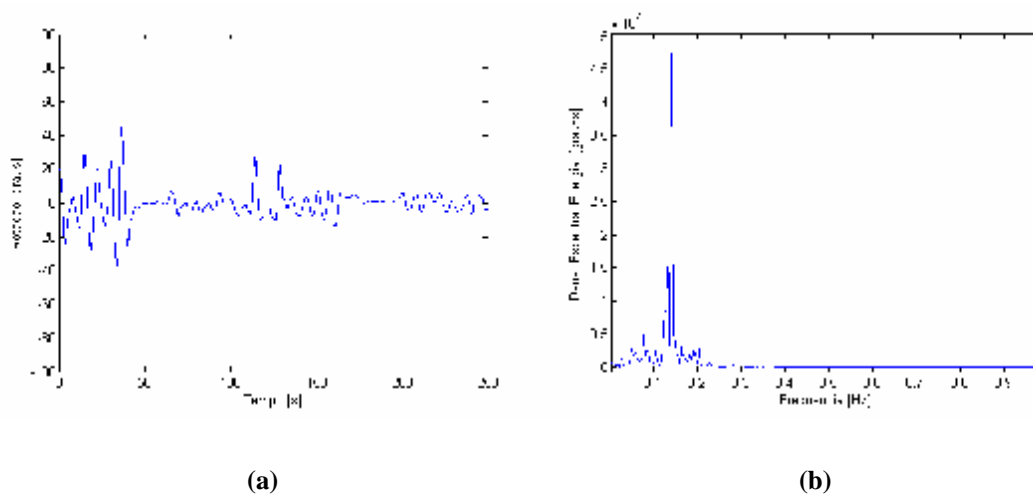
**Figura H.2 – Medição 1: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



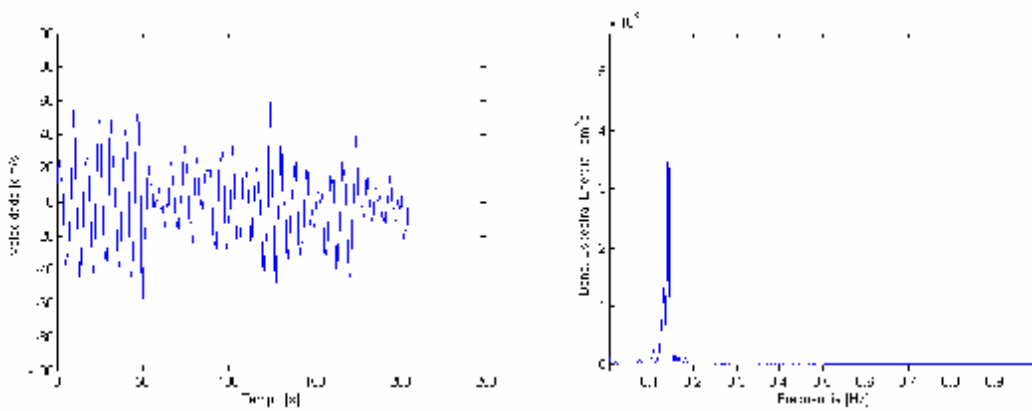
**Figura H.3 – Medição 2: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



**Figura H.4 – Medição 2: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



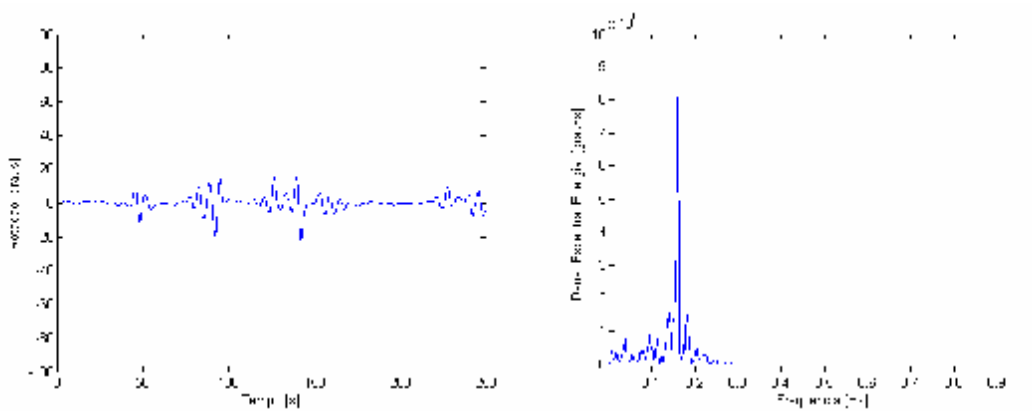
**Figura H.5 – Medição 3: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

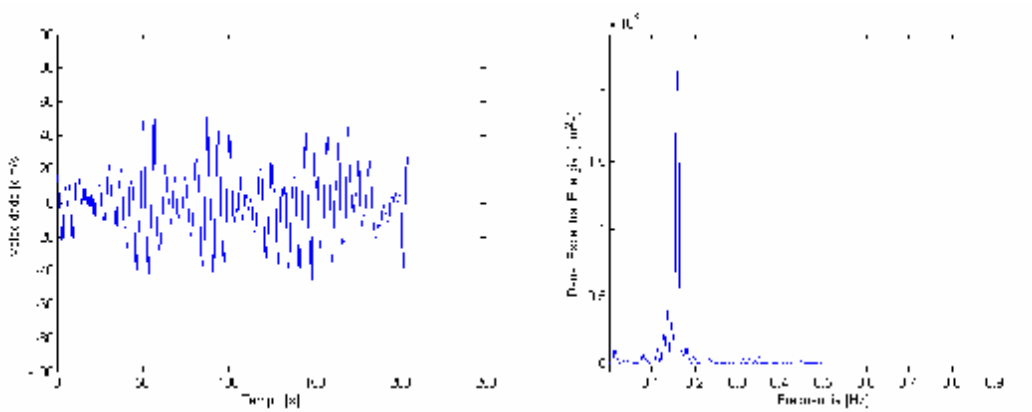
**Figura H.6 – Medição 3: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

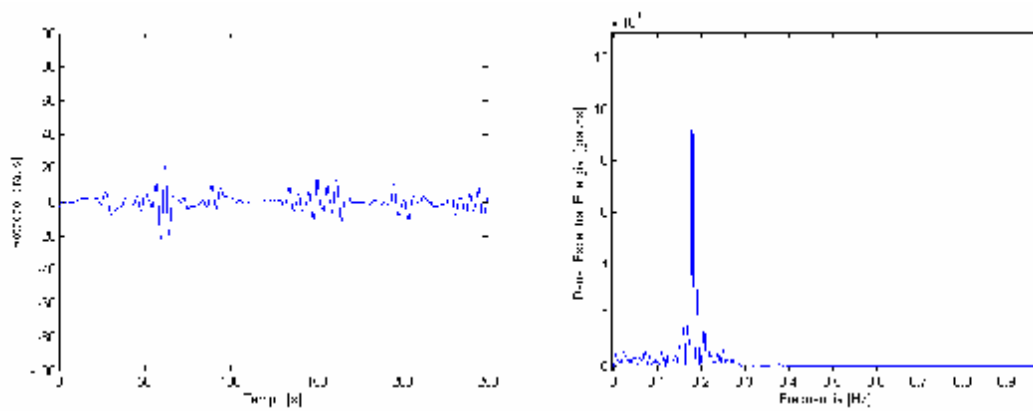
**Figura H.7 – Medição 4: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

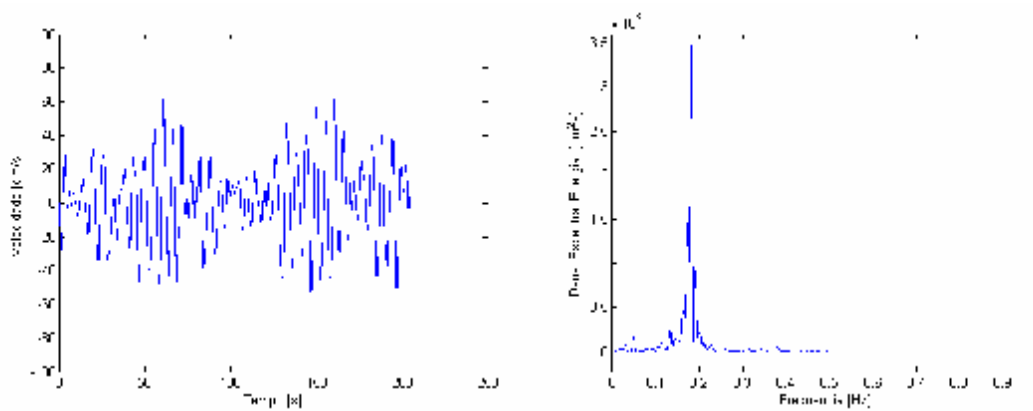
**Figura H.8 – Medição 4: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

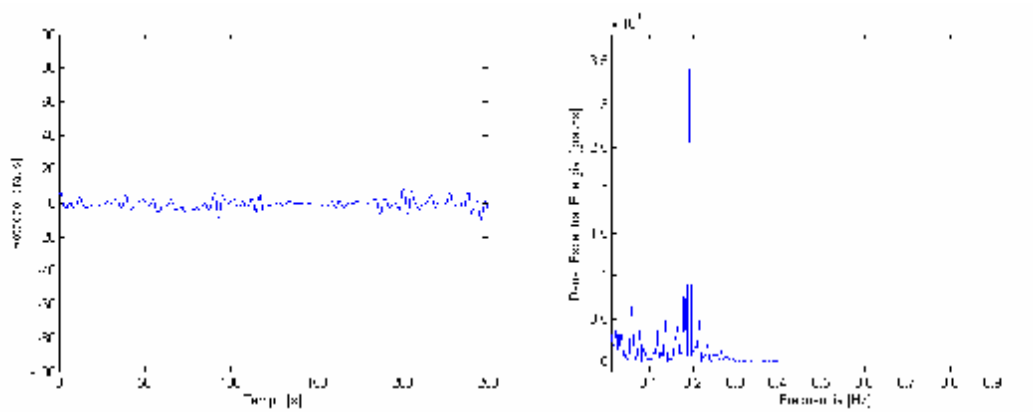
**Figura H.9 – Medição 5: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

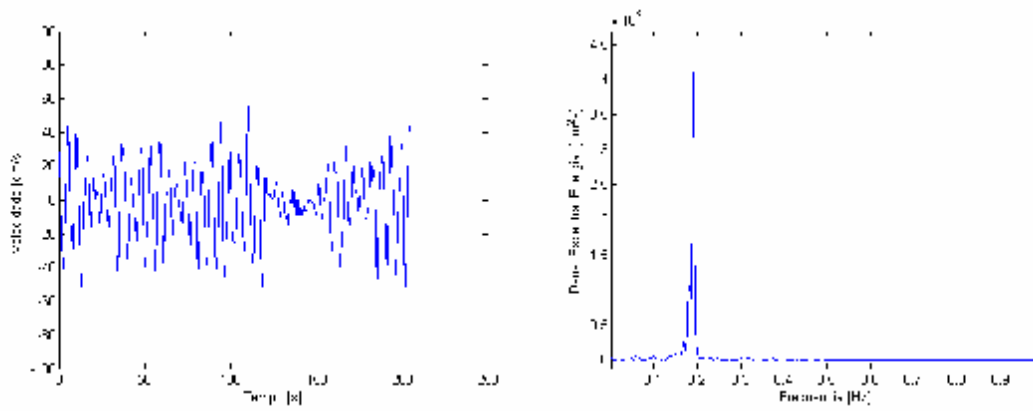
**Figura H.10 – Medição 5: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

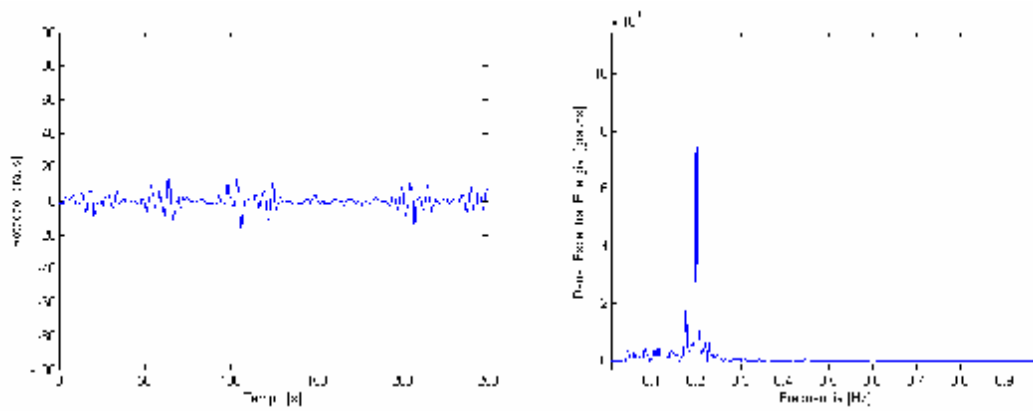
**Figura H.11 – Medição 6: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



(a)

(b)

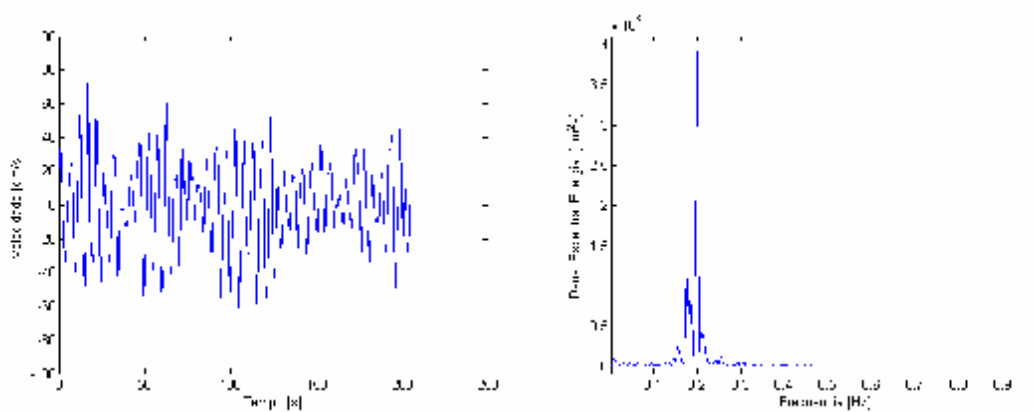
**Figura H.12 – Medição 6: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**



(a)

(b)

**Figura H.13 – Medição 7: (a) Série Temporal de Rotação . (b) Densidade Espectral de Energia da Rotação.**



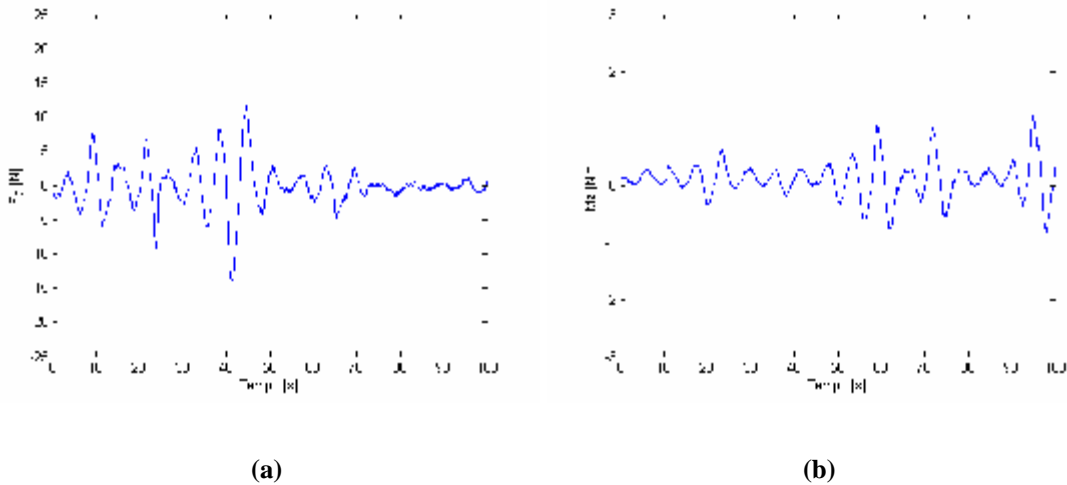
(a)

(b)

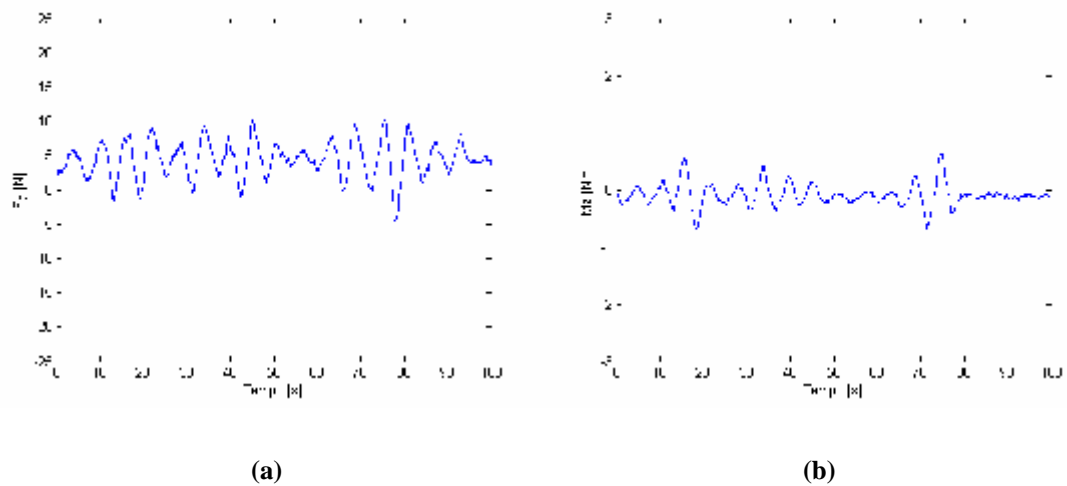
**Figura H.14 – Medição 7: (a) Série Temporal de Velocidade de Fluxo na Esteira . (b) Densidade Espectral de Energia da Velocidade do Fluxo.**

**APENDICE IX – SÉRIES TEMPORAIS DE FORÇA  $F_x$  NA DIREÇÃO DA CORRENTEZA E MOMENTO  $M_z$ .**

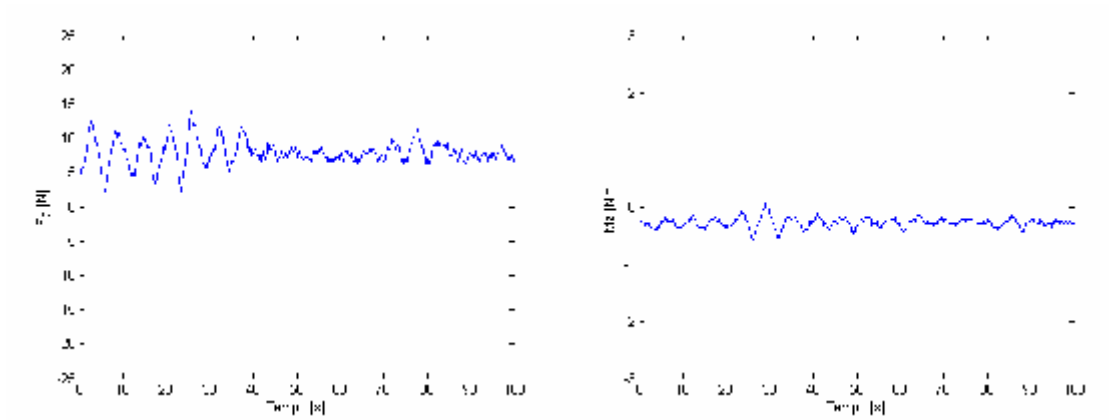
Medição	Velocidade de Correnteza [m/s]
1	0,29
2	0,39



**Figura I.1 – Medição 1 (ângulo de ataque 0 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza . (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



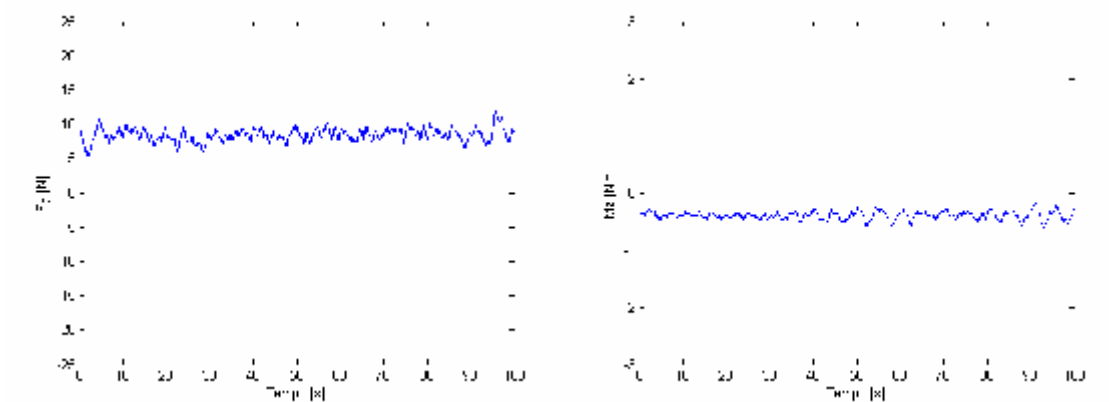
**Figura I.2 – Medição 1 (ângulo de ataque 15 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

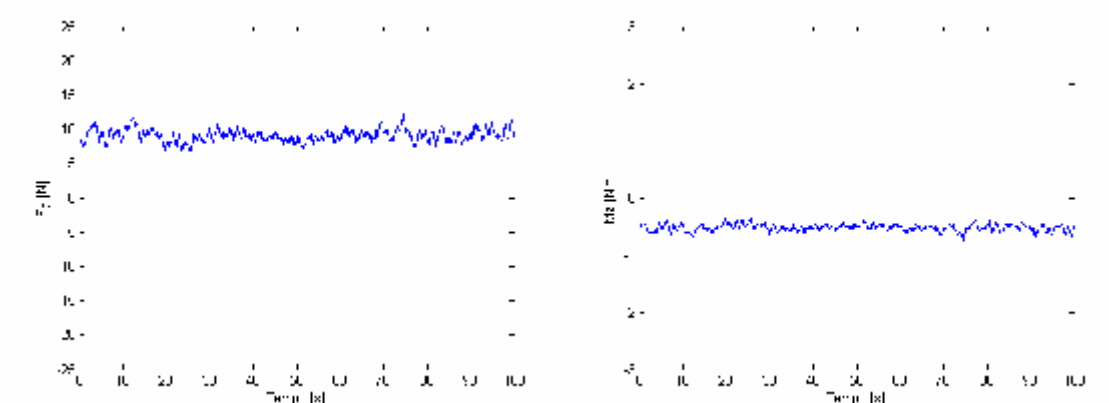
**Figura I.3 – Medição 1 (ângulo de ataque 30 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

**Figura I.4 – Medição 1 (ângulo de ataque 45 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**

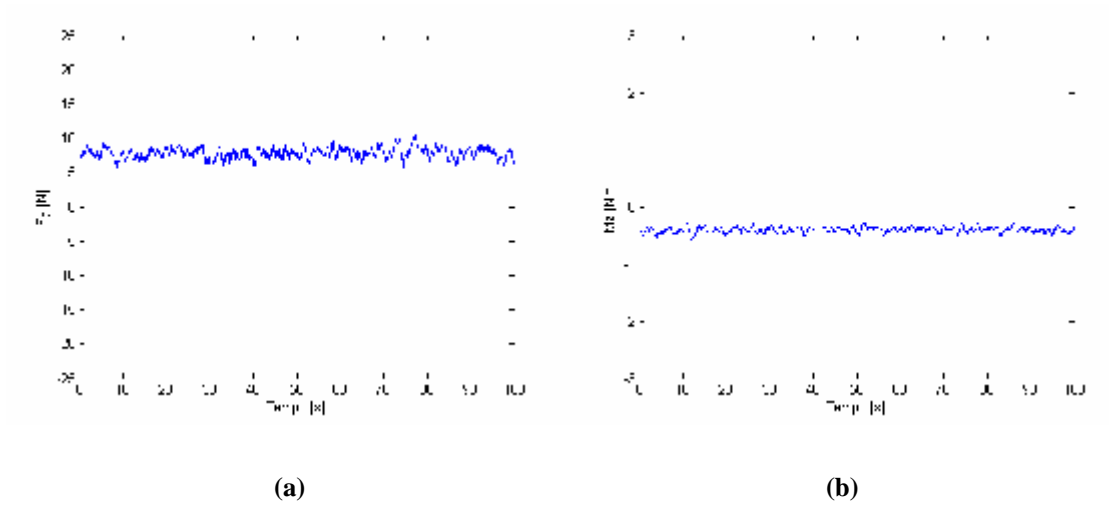


(a)

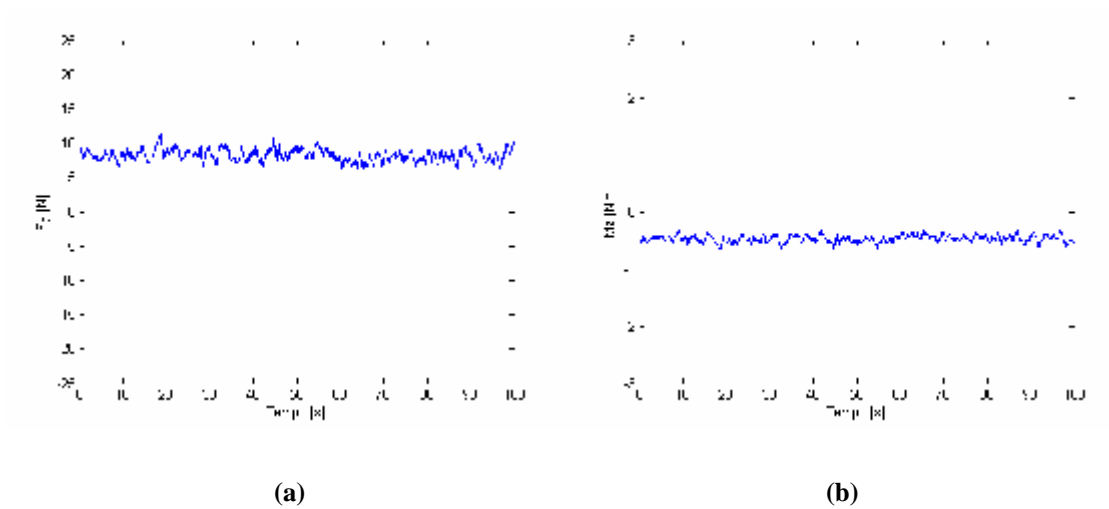
(b)

**Figura I.5 – Medição 1 (ângulo de ataque 55 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza . (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**

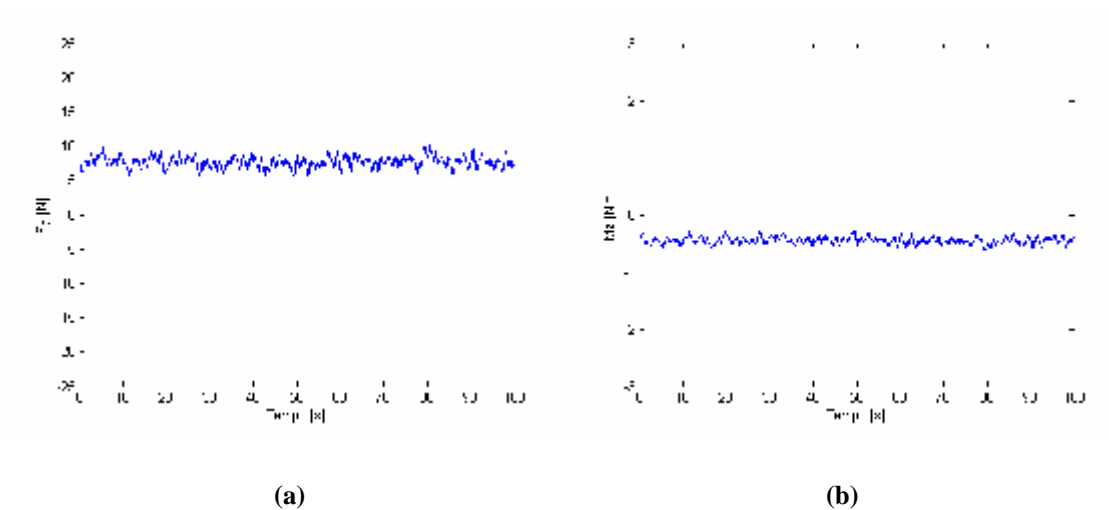




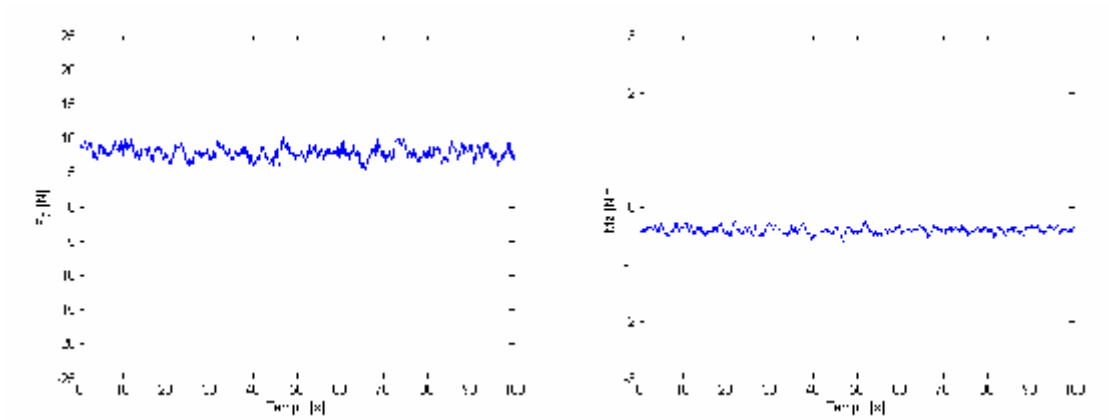
**Figura I.6 – Medição 1 (ângulo de ataque 60 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza . (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



**Figura I.7 – Medição 1 (ângulo de ataque 65 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



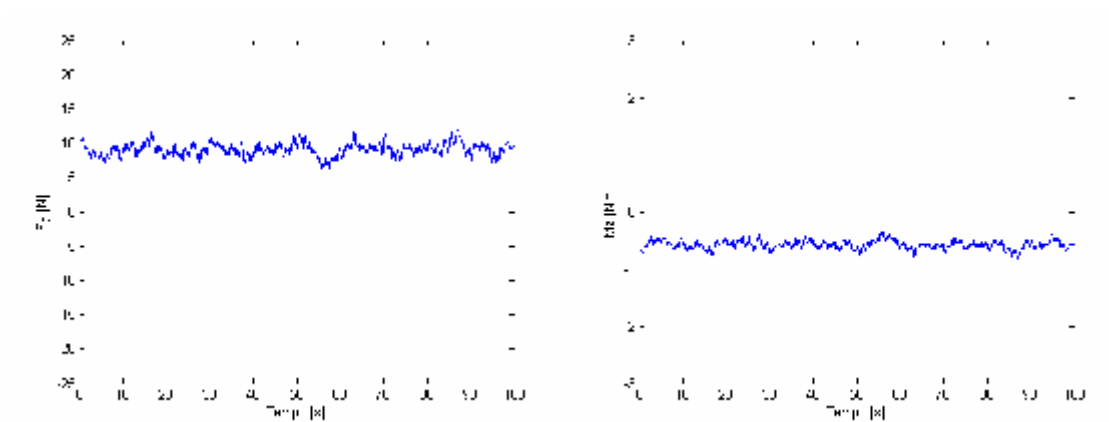
**Figura I.8 – Medição 1 (ângulo de ataque 70 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

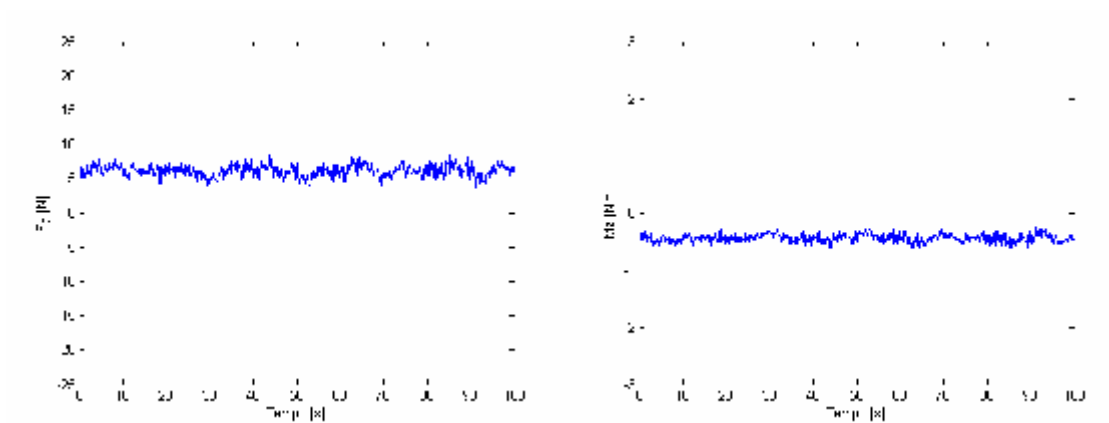
**Figura I.9 – Medição 1 (ângulo de ataque 75 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

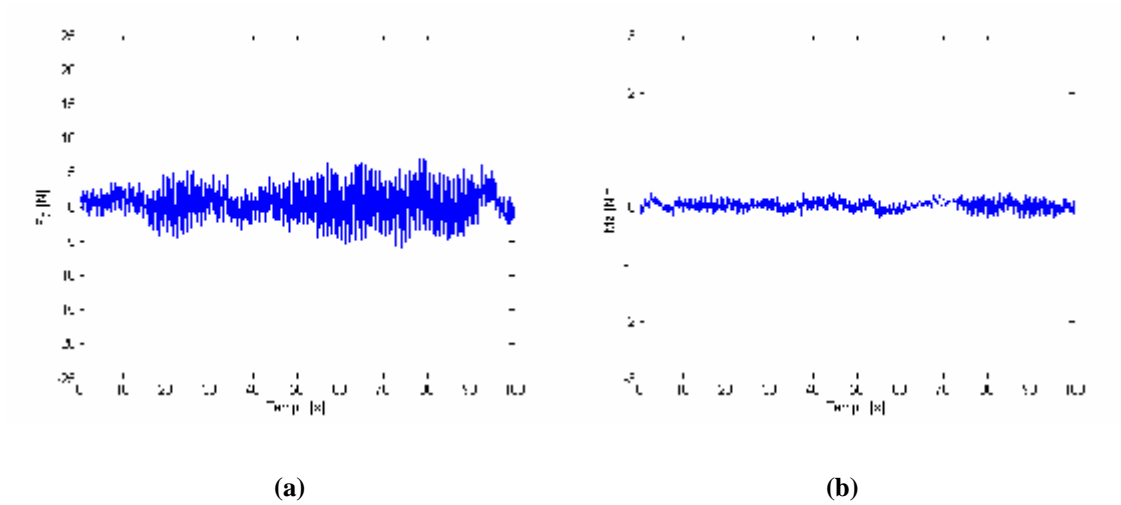
**Figura I.10 – Medição 1 (ângulo de ataque 80 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza.. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



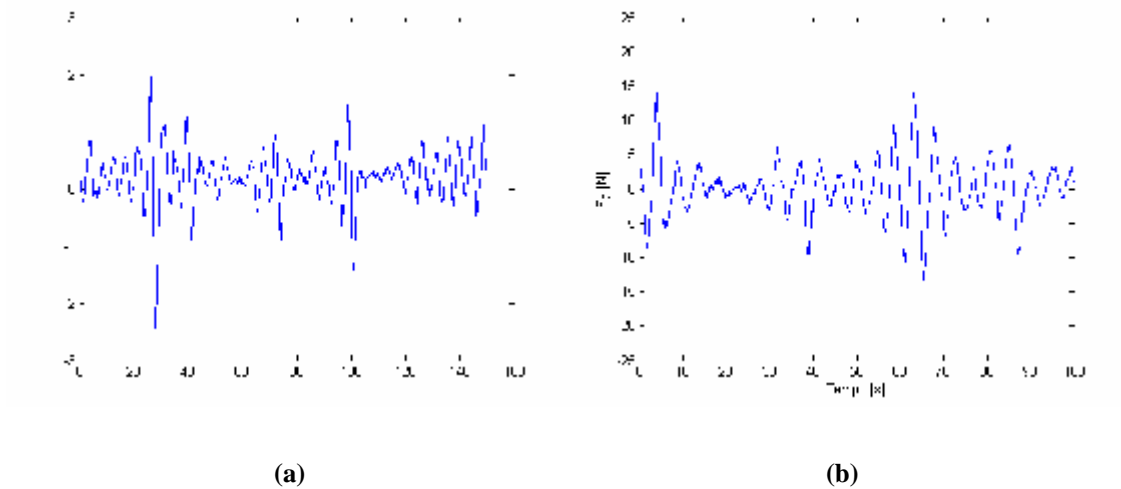
(a)

(b)

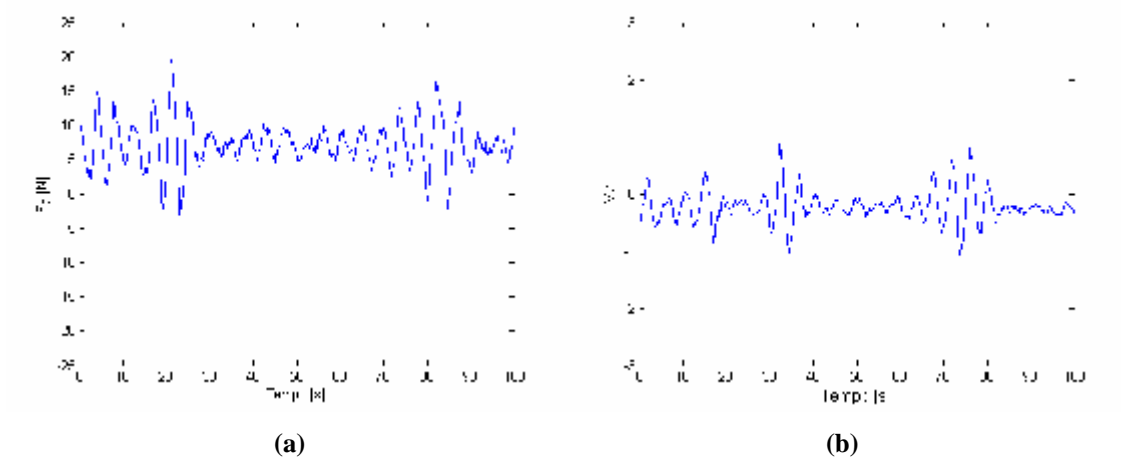
**Figura I.11 – Medição 1 (ângulo de ataque 85 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



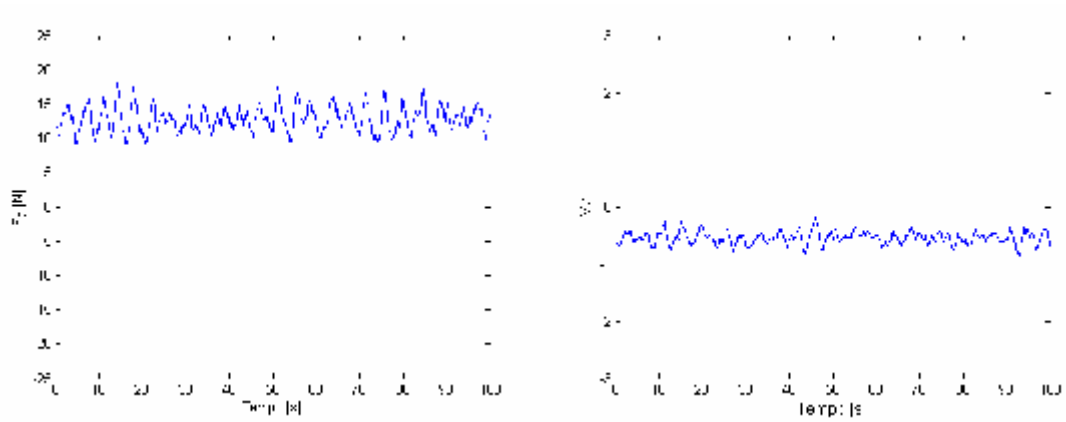
**Figura I.12 – Medição 1 (ângulo de ataque 90 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



**Figura I.13 – Medição 2 (ângulo de ataque 0 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza . (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



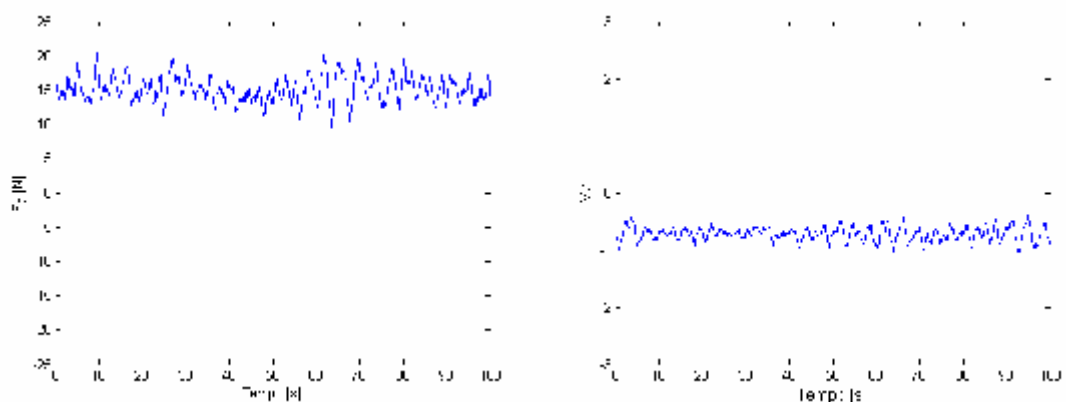
**Figura I.14 – Medição 2 (ângulo de ataque 15 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

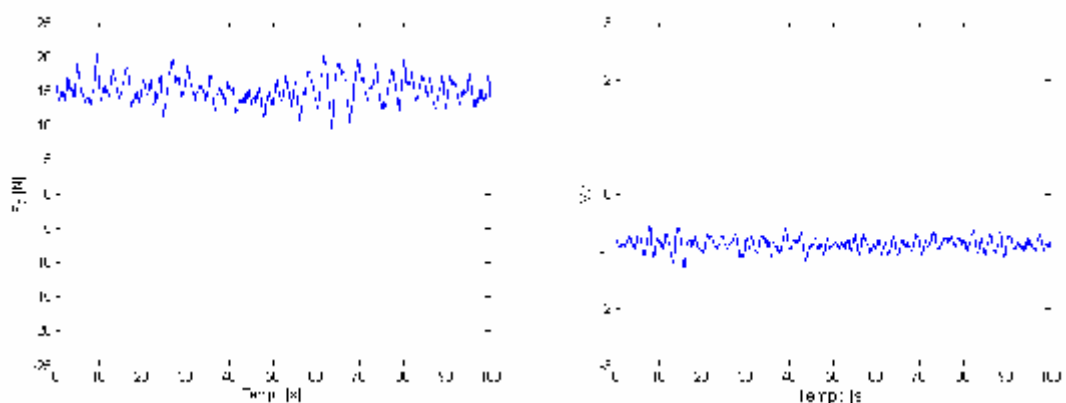
**Figura I.15 – Medição 2 (ângulo de ataque 30 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

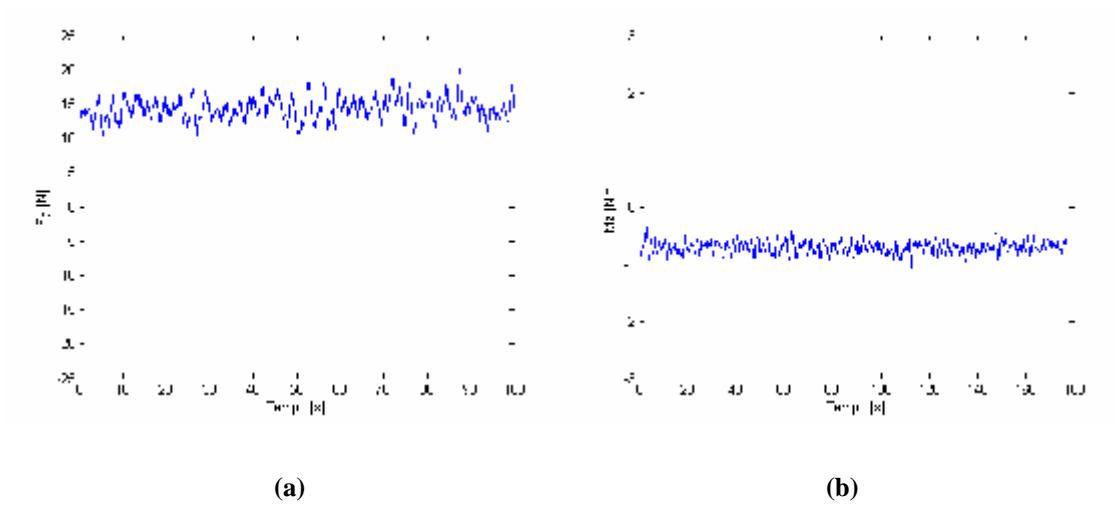
**Figura I.16 – Medição 2 (ângulo de ataque 45 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



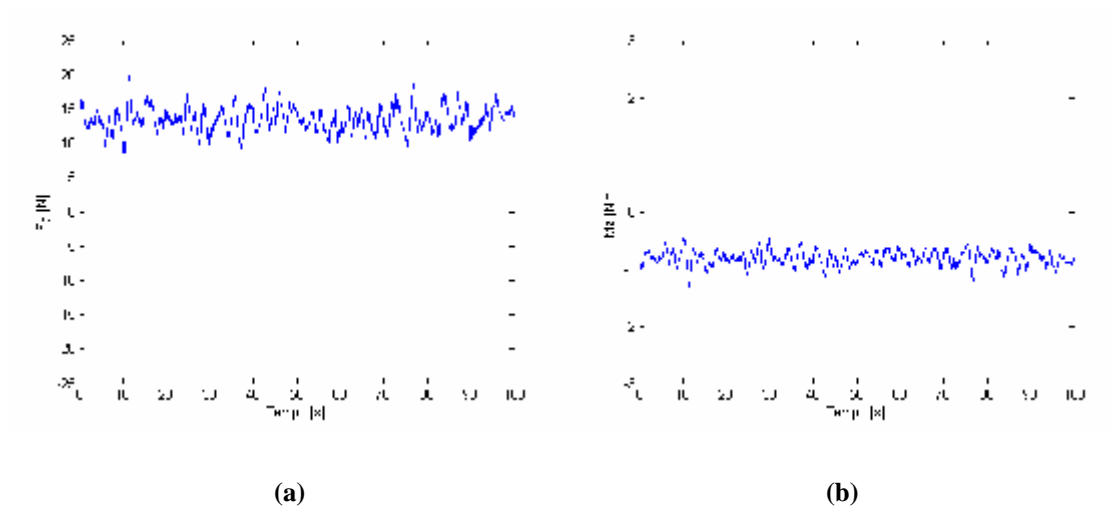
(a)

(b)

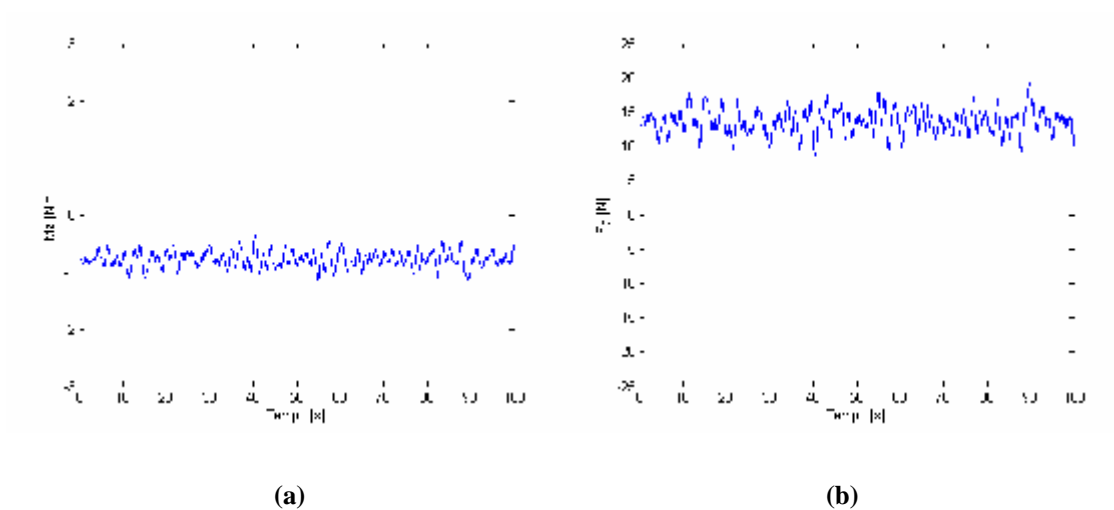
**Figura I.17 – Medição 2 (ângulo de ataque 55 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza . (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



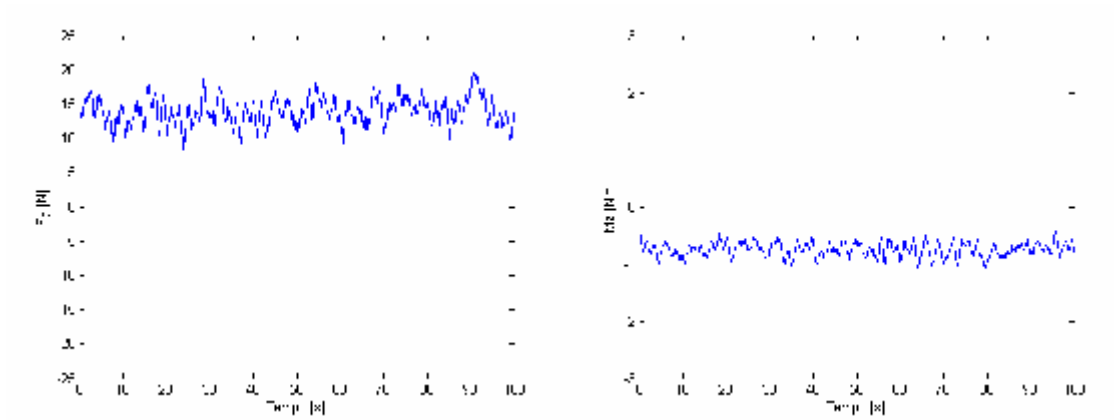
**Figura I.18 – Medição 2 (ângulo de ataque 60 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza . (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



**Figura I.19 – Medição 2 (ângulo de ataque 65 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



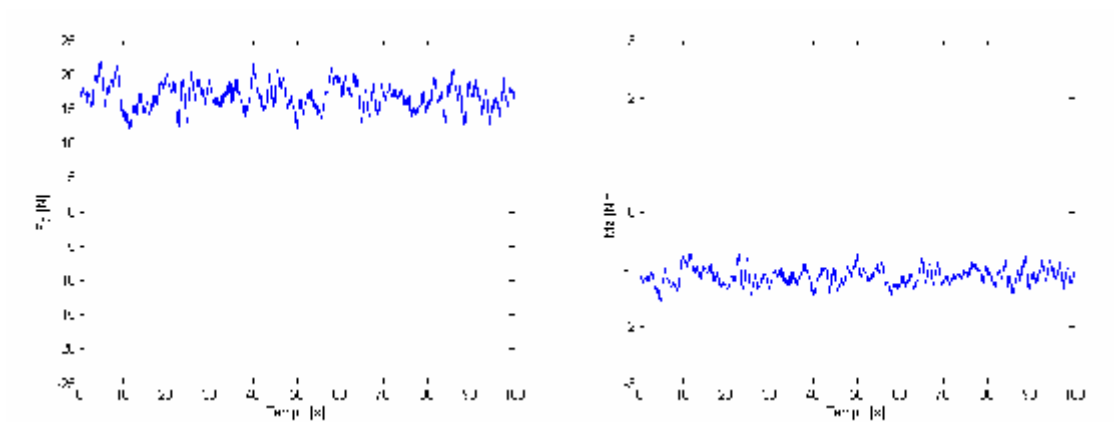
**Figura I.20 – Medição 2 (ângulo de ataque 70 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

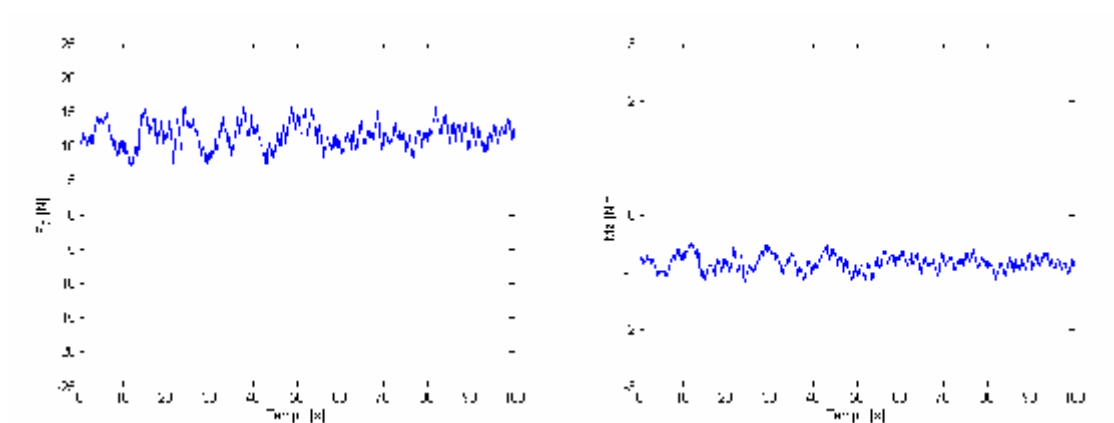
**Figura I.21 – Medição 2 (ângulo de ataque 75 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

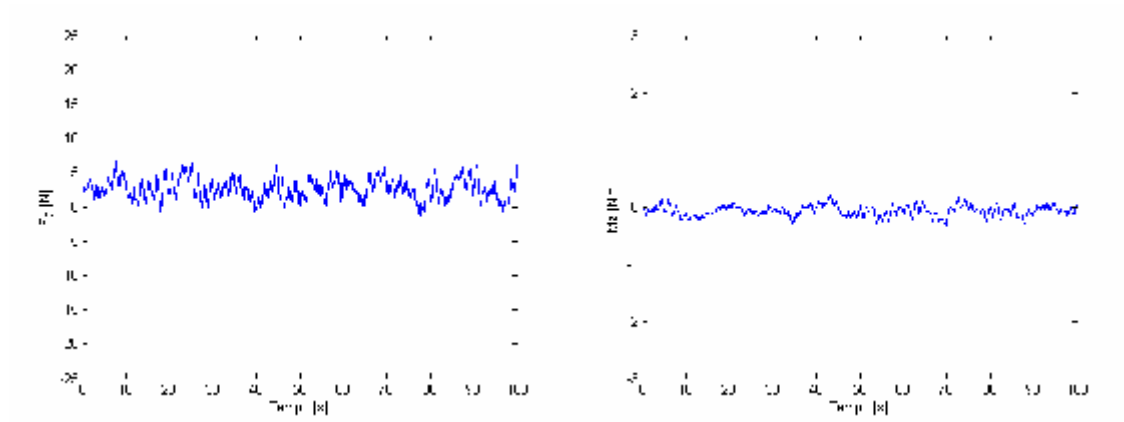
**Figura I.22 – Medição 2 (ângulo de ataque 80 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza.. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

**Figura I.23 – Medição 2 (ângulo de ataque 85 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**



(a)

(b)

**Figura I.24 – Medição 2 (ângulo de ataque 90 graus): (a) Série Temporal de Força  $F_y$  na Direção transversal à Correnteza. (b) Série Temporal de Momento  $M_z$ .**

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)