

PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DE CORPOS DE GEOMETRIA
COMPLEXA COMO MANIFOLDS PARA OPERAÇÃO EM ÁGUAS PROFUNDAS

Fábio Pompeo da Silva Mineiro

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Antonio Carlos Fernandes, PhD.

Prof. Carlos Antonio Levi da Conceição, PhD.

Dr. Ricardo Franciss, D.Sc.

Dr. Enrique Casaprima Gonzalez, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2006

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

MINEIRO, FÁBIO POMPEO DA SILVA

Propriedades Hidrodinâmicas de Corpos de Geometria Complexa como *Manifolds* para operação em Águas Profundas, [Rio de Janeiro] 2006

XVI, 131 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica, 2006)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Propriedades Hidrodinâmicas de *Manifolds*
2. Coeficientes de Massa Adicional
3. Coeficientes de Arrasto

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Carlos Fernandes, pela orientação ao longo do trabalho, transmitindo o conhecimento necessário e trazendo inspiração para a realização deste.

À ANP, à COPPE e ao LabOceano, que possibilitaram a realização deste trabalho.

Aos amigos Cassiano Rodrigues Neves e Melquisedec Francisco dos Santos, pelo incentivo e ajuda nos momentos em que precisei.

Aos meus pais, Alípio Dias da Silva Mineiro e Alina Pompeo da Silva Mineiro, por estarem sempre presentes em minha vida, permitindo a realização de mais um sonho.

Aos meus irmãos, Eduardo Pompeo da Silva Mineiro e Renato Pompeo da Silva Mineiro, pela amizade e companheirismo.

E à minha noiva e futura esposa, Vanessa Belchior, que traz luz à minha vida e sempre me motivou para a realização deste trabalho, estando sempre ao meu lado e me amando incondicionalmente.

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

PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DE CORPOS DE GEOMETRIA
COMPLEXA COMO MANIFOLDS PARA OPERAÇÃO EM ÁGUAS PROFUNDAS

Fábio Pompeo da Silva Mineiro

Agosto/2006

Orientador: Antonio Carlos Fernandes

Programa: Engenharia Oceânica

O método de instalação pendular (Pendulous Installation Method - PIM) é uma nova metodologia de instalação de *manifold* proposta pela PETROBRAS. Com o início das análises numéricas do PIM, há a necessidade de se obter estimativas corretas para as propriedades hidrodinâmicas, tais como os coeficientes de arrasto e massa adicional. Porém, a literatura é incompleta e então existe a necessidade de realizar novos cálculos e testes experimentais para obtenção desses coeficientes, principalmente tendo em vista a forma muito particular do corpo em questão.

Este trabalho tem como objetivo a obtenção dos coeficientes de massa adicional e arrasto para corpos de geometria complexa como manifolds através de métodos numéricos e experimentais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

HIDRODYNAMIC PROPERTIES OF COMPLEX GEOMETRY BODIES LIKE
MANIFOLDS FOR DEEP WATER OPERATION

Fábio Pompeo da Silva Mineiro

August/2006

Advisor: Antonio Carlos Fernandes

Department: Ocean Engineering

The pendulous installation method (PIM) is a new technology for the deployment of large deepwater manifolds, proposed by PETROBRAS. With the beginning of the numerical analyses of the PIM, there is a necessity of having correct estimatives for the hydrodynamic properties, such as drag and added mass coefficients. However, the fact is that the literature is incomplete and so the needing of new calculations methods and experimental tests to obtain these coefficients, specially having in mind the particular shape of the body.

This work has as its main objective the determination of the added mass and drag coefficients for bodies of complex geometry like manifolds through numerical and experimental methods.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
Motivação	1
Coeficientes de Massa Adicional e Arrasto	3
Descrição dos Capítulos	4
2 OBTENÇÃO DA MASSA ADICIONAL	5
Definição	5
Coeficientes de Massa Adicional na Literatura	8
Coeficientes de Massa Adicional segundo Blevins (1979)	9
Obtenção da Massa Adicional pelo Método dos Limites de Frequência de um Programa de Comportamento do Navio no Mar	12
Cálculo do Ca de uma Caixa pelo programa WAMIT V.6.211	15
Cálculo do Ca de um Elipsóide pelo programa WAMIT V.6.211	29
Adimensionalização	29
Resultados	31
Cálculo do Ca de uma Caixa (<i>Manifold</i>) pelo programa WAMIT V.6.211	32
Efeito da Porosidade	33
Obtenção da Massa Adicional Através de Ensaios de Reboque com Aceleração Uniforme	36
Ensaios com Aceleração Uniforme para Estimativa da Massa Adicional da Esfera	36
Ensaios com Aceleração Uniforme para Estimativa da Massa Adicional do <i>Manifold</i>	58
Descrição dos Ensaios de Reboque	58
Obtenção dos Coeficientes de Massa Adicional	64

Conclusão	81
3 OBTENÇÃO DO ARRASTO	83
Coeficientes de Arrasto na Literatura (Norma DNV)	83
Obtenção do Arrasto Através de Ensaios de Reboque com Velocidade Constante	85
4 OBTENÇÃO SIMULTÂNEA DA MASSA ADICIONAL E DO ARRASTO	94
Lançamento Vertical	94
Ensaios de Oscilação Forçada	102
Descrição dos Ensaios de Oscilação Forçada	102
Números de Reynolds e Keulegan-Carpenter	107
Obtenção dos Coeficientes de Massa Adicional	107
MARINTEK (2002)	113
Conclusões sobre Ca	115
Obtenção dos Coeficientes de Arrasto	116
Conclusões sobre Cd	122
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
Conclusões	123
Recomendações para Trabalhos Futuros	124
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXO A – TABELAS DE OSCILAÇÃO FORÇADA	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1:	<i>Manifold</i> típico	1
Figura 1.1.2:	Esquema do PIM, Método de Instalação Pendular, (RIBEIRO, 2005)	2
Figura 2.3.1:	Limite de baixa frequência $\omega \rightarrow 0$ para <i>surge</i> e <i>sway</i> , à esquerda, e para <i>yaw</i> , à direita, formação de corpo duplo.	13
Figura 2.3.2:	Limite de baixa frequência $\omega \rightarrow 0$ para <i>heave</i> , à esquerda, e para <i>roll</i> ou <i>pitch</i> , à direita, corpo pulsando (sanfona).	13
Figura 2.3.3:	Limite de alta frequência $\omega \rightarrow \infty$ para <i>surge</i> e <i>sway</i> , à esquerda, e para <i>yaw</i> , à direita, corpo cisalhante.	13
Figura 2.3.4:	Limite de alta frequência $\omega \rightarrow \infty$ para <i>heave</i> , à esquerda, e para <i>roll</i> ou <i>pitch</i> , à direita, corpo duplo.	13
Figura 2.3.1.1:	Ilustração de caixa com dimensões 40x40x20, $p \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \infty$.	15
Figura 2.3.1.2:	Ilustração de caixa com dimensões 20x40x40, $p \rightarrow \infty$, $\omega \rightarrow 0$.	15
Figura 2.3.1.3:	Quadrante da malha gerada para a caixa no MG, razão $b/a = 1$.	16
Figura 2.3.1.4:	Variação do C_a com o nº de painéis.	17
Figura 2.3.1.5:	Variação do C_a com a ordem.	19
Figura 2.3.1.6:	Variação do C_a com o nº de painéis, <i>high order panel</i> .	19
Figura 2.3.1.7:	Quadrante da malha gerada para a caixa no MG (2005), razão $b/a = 0,5$.	21
Figura 2.3.1.8:	Variação do C_a com o nº de painéis.	22
Figura 2.3.1.9:	Variação do C_a com a ordem.	23
Figura 2.3.1.10:	Variação do C_a com o nº de painéis.	24
Figura 2.3.1.11:	Ilustração de uma caixa com dimensões 40x40x32, $p \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \infty$.	24

Figura 2.3.1.12:	Ilustração de uma caixa com dimensões 40x40x32, $p \rightarrow \infty, \omega \rightarrow 0$.	25
Figura 2.3.1.13:	Quadrante da malha gerada para a caixa no MG (2005), razão $b/a = 0,8$.	25
Figura 2.3.1.14:	Variação do Ca com o nº de painéis.	26
Figura 2.3.1.15:	Variação do Ca com a ordem.	28
Figura 2.3.1.16:	Variação do Ca com o nº de painéis.	28
Figura 2.3.2.2.1:	Variação do Ca com a razão b/a , obtida do WAMIT V6.211.	31
Figura 2.3.2.2.2:	Ca para um elipsóide dado por Newman (1978).	32
Figura 2.3.4.1:	Ilustração da <i>moonpool</i> circular.	34
Figura 2.3.4.2:	Variação do Ca com a porosidade.	34
Figura 2.3.4.3:	Zoom no início do acréscimo de porosidade, até 1%.	35
Figura 2.4.1.1:	Exemplo da história temporal da velocidade da esfera, com patamar de 1 m/s, medida ao logo do reboque no tanque de provas.	37
Figura 2.4.1.2:	Registro típico de aceleração, (0,01g), dos ensaios com a esfera.	37
Figura 2.4.1.3:	Registro temporal de ensaio típico da força medida na haste; regiões com descontinuidade nas acelerações consideradas nos ensaios para obtenção da massa adicional.	39
Figura 2.4.1.4:	Sobreposição do grupo de ensaios A com variação da aceleração de 0,1g a 0,5g para $V_{\text{final}} = 1\text{m/s}$.	40
Figura 2.4.1.5:	Sobreposição dos ensaios mostrando apenas a força na haste.	42
Figura 2.4.1.6:	Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 0,5\text{m/s}$.	43
Figura 2.4.1.7:	Sobreposição dos ensaios, considerando apenas a variação da força na haste para $V_{\text{final}} = 0,5\text{m/s}$.	44
Figura 2.4.1.8:	Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 2\text{m/s}$.	46

Figura 2.4.1.9:	Sobreposição dos ensaios mostrando a força da haste para $V_{\text{final}}=2\text{m/s}$.	47
Figura 2.4.1.10:	Resultados das massas adicionais calculadas pelos ensaios e o valor teórico ($Ca = 0,5$).	49
Figura 2.4.1.11:	Sobreposição do grupo de ensaios A com variação da aceleração de 0,1g a 0,5g para $V_{\text{final}} = 1\text{m/s}$.	50
Figura 2.4.1.12:	Sobreposição dos ensaios mostrando apenas a força na haste.	51
Figura 2.4.1.13:	Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 0,5\text{m/s}$, região 4.	52
Figura 2.4.1.14:	Sobreposição dos ensaios, considerando apenas a variação da força na haste para $V_{\text{final}} = 0,5\text{m/s}$, região 4.	53
Figura 2.4.1.15:	Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 2\text{m/s}$.	55
Figura 2.4.1.16:	Sobreposição dos ensaios mostrando a força da haste para $V_{\text{final}}=2\text{m/s}$.	56
Figura 2.4.1.17:	Resultados das massas adicionais calculadas pelos ensaios e valor teórico.	57
Figura 2.4.2.1.1:	Aspecto dos modelos de <i>manifold</i> 1:35 e 1:70.	60
Figura 2.4.2.1.2:	Aspecto dos modelos de <i>manifold</i> 1:35 e 1:70.	60
Figura 2.4.2.1.3:	Esquema do ensaio de arrasto.	61
Figura 2.4.2.1.4:	Aspecto do modelo de <i>manifold</i> com placa.	62
Figura 2.4.2.1.5:	Modelo 1:35 durante ensaio de arrasto no eixo X.	63
Figura 2.4.2.1.6:	Modelo 1:35 durante ensaio de arrasto no eixo Y.	63
Figura 2.4.2.1.7:	Modelo 1:35 durante ensaio de arrasto no eixo Z.	63
Figura 2.4.2.1.8:	Aspecto do modelo 1:70 durante ensaio de arrasto no eixo Y.	64
Figura 2.4.2.1.9:	do modelo 1:70 durante ensaio de arrasto no eixo Z.	64
Figura 2.4.2.2.1:	Registros temporais típicos e definição das regiões consideradas nos ensaios do <i>manifold</i> para a obtenção da massa adicional.	65
Figura 2.4.2.2.2:	Sobreposição dos ensaios em X com acelerações de	

	0,01g a 0,04g.	67
Figura 2.4.2.2.3:	Sobreposição dos ensaios na direção Y.	68
Figura 2.4.2.2.4:	Sobreposição dos ensaios em Y com placa acoplada.	69
Figura 2.4.2.2.5:	Superposição dos ensaios na direção Z.	71
Figura 2.4.2.2.6:	Coefficientes de massa adicional calculados através do ensaio.	73
Figura 2.4.2.2.7:	Sobreposição dos ensaios em X com acelerações de 0,01g a 0,04g.	74
Figura 2.4.2.2.8:	Sobreposição dos ensaios na direção Y.	75
Figura 2.4.2.2.9:	Sobreposição dos ensaios em Y com placa acoplada.	76
Figura 2.4.2.2.10:	Superposição dos ensaios na direção Z.	77
Figura 2.4.2.2.11:	Coefficientes de massa adicional obtidos para a região 4.	78
Figura 2.4.2.2.12:	Variação do Ca para X, Y e Z.	80
Figura 2.4.2.2.13:	Comparação do Ca obtido pelas escalas na região 2.	81
Figura 2.4.2.2.14:	Comparação do Ca obtido pelas escalas na região 4.	81
Figura 3.2.1:	Variação do Cd com o Número de Reynolds.	87
Figura 3.2.2:	Variação do Cd com Reynolds.	89
Figura 3.2.3:	Variação do Cd com o Reynolds.	91
Figura 3.2.4:	Variação do Cd com o Número de Reynolds.	93
Figura 4.1.1:	Deslocamento do ensaio vertical no eixo X.	98
Figura 4.1.2:	Velocidade do ensaio vertical no eixo X.	98
Figura 4.1.3:	Deslocamento do ensaio vertical no eixo Y.	99
Figura 4.1.4:	Velocidade do ensaio vertical no eixo Y.	100
Figura 4.1.5:	Deslocamento do ensaio vertical no eixo Z.	100
Figura 4.1.6:	Velocidade do ensaio vertical no eixo Z.	101
Figura 4.2.1.1:	Esquema do ensaio de oscilação forçada.	103
Figura 4.2.1.2.:	Aspecto do dispositivo de ensaio de oscilação forçada.	104
Figura 4.2.1.3:	Aspecto do dispositivo de ensaio de oscilação forçada.	104
Figura 4.2.1.4:	Modelo na escala 1:35 no ensaio de oscilação forçada, eixo X.	105
Figura 4.2.1.5:	Modelo na escala 1:35 no ensaio de oscilação forçada,	

	eixo Y.	105
Figura 4.2.1.6:	Modelo na escala 1:35 no ensaio de oscilação forçada, eixo Z.	105
Figura 4.2.1.7:	Modelo na escala 1:70 no ensaio de oscilação forçada, eixo Y.	106
Figura 4.2.1.8:	Modelo na escala 1:70 no ensaio de oscilação forçada, eixo Z.	106
Figura 4.2.3.1:	Ca_{11} variando com Rey_m .	108
Figura 4.2.3.2:	Ca_{11} variando com o KC.	108
Figura 4.2.3.3:	Ca em Y variando com o Rey_m .	109
Figura 4.2.3.4:	Ca em Y variando com o KC.	110
Figura 4.2.3.5:	Ca_{22} variando com Reynolds para a escala de 1:70.	110
Figura 4.2.3.6:	Ca_{22} variando com KC na escala 1:70.	111
Figura 4.2.3.7:	Ca_{33} em função do número de Reynolds, escala 1:35.	111
Figura 4.2.3.8:	Ca_{33} variando com o KC.	112
Figura 4.2.3.9:	Ca variando com Reynolds no eixo Z para escala de 1:70.	112
Figura 4.2.3.10:	Ca_{33} variando com o número de Keulegan-Carpenter.	113
Figura 4.2.3.1.1:	Comparação com valores de Ca da MARINTEK (2002).	114
Figura 4.2.4.1:	Cd_{11} variando com Rey_m .	117
Figura 4.2.4.2:	Cd_{11} variando com o KC.	117
Figura 4.2.4.3:	Coefficiente de arrasto em Y variando com o Rey_m .	118
Figura 4.2.4.4:	Coefficiente de arrasto em Y, Cd_{22} , variando com o KC.	118
Figura 4.2.4.5:	Cd variando com Reynolds no eixo Y para escala de 1:70.	119
Figura 4.2.4.6:	Cd_{22} variando com KC na escala 1:70.	119
Figura 4.2.4.7:	Cd no eixo Z em função do número de Reynolds, escala 1:35.	120
Figura 4.2.4.8:	Cd em Z variando com o número de Keulegan-Carpenter.	120
Figura 4.2.4.9:	Cd_{33} variando com Reynolds para a escala de 1:70.	121
Figura 4.2.4.10:	Cd_{33} variando com o número de Keulegan-Carpenter.	121

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.2.1:	Características principais do <i>manifold</i> a ser analisado.	9
Tabela 2.2.1.1:	Massas adicionais segundo Blevins (1979).	9
Tabela 2.3.1.1:	Ca para caixa $b/a = 1$, <i>low order panel</i> , nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$).	17
Tabela 2.3.1.2:	Resultados de Ca_{33} e Ca_{11} obtidos pelo WAMIT V6.211, nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$), razão $b/a = 1$.	19
Tabela 2.3.1.3:	Ca para caixa $b/a = 0,5$, <i>low order panel</i> , nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$).	21
Tabela 2.3.1.4:	Ca para caixa $b/a = 0,5$, <i>high order panel</i> , nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$).	23
Tabela 2.3.1.5:	Ca para caixa, <i>low order panel</i> .	26
Tabela 2.3.1.6:	Resultados do WAMIT V6.211 para Ca_{33} e Ca_{11} .	27
Tabela 2.3.2.2.1:	Resultados do WAMIT V6.211 para Ca_{11} , Ca_{22} e Ca_{55} .	31
Tabela 2.3.3.1:	Resultados do Ca para a caixa (<i>Manifold</i>).	33
Tabela 2.4.1.1:	Matriz de ensaios de reboque com aceleração uniforme da esfera.	38
Tabela 2.4.1.2:	Massa adicional da esfera a partir da análise da Região 1.	48
Tabela 2.4.1.3:	Massa adicional da esfera a partir da análise da Região 4.	57
Tabela 2.4.2.1.1:	Características do protótipo.	59
Tabela 2.4.2.1.2:	Características dos modelos nas condições de ensaio.	59
Tabela 2.4.2.1.3:	Matriz de ensaios para estimativa da massa adicional.	62
Tabela 2.4.2.2.1:	Massa adicional do <i>manifold</i> – Região 2.	72
Tabela 2.4.2.2.2:	Massa adicional do <i>manifold</i> – Região 4.	78
Tabela 2.4.2.2.3:	Resultados do cálculo da massa adicional para a região 1.	79

Tabela 2.4.2.3.1:	Valores finais obtidos dos ensaios de reboque com aceleração uniforme.	82
Tabela 3.1.1:	Coeficiente de forma (mesmo que coeficiente de arrasto) para um prisma, norma 30.5 DNV	84
Tabela 3.2.1:	Dimensões do modelo e áreas utilizadas para cálculo do Cd.	85
Tabela 3.2.2:	Cd para a direção X, <i>surge</i> .	86
Tabela 3.2.3:	Comparação do Rey com o Cd.	87
Tabela 3.2.4:	Cd para a direção Y, <i>sway</i> .	88
Tabela 3.2.5:	Comparação do Rey com o Cd.	89
Tabela 3.2.6:	Cd para a direção Y com placa, <i>sway</i> .	90
Tabela 3.2.7:	Relação entre Rey e Cd.	91
Tabela 3.2.8:	Cd para a direção Z, <i>heave</i> .	92
Tabela 3.2.9:	Resultados do Reynolds e comparação com o Cd.	93
Tabela 3.2.10:	Valores finais de Cd para as direções X, Y e Z.	94
Tabela 4.2.3.1.1:	Características da caixa nos ensaios da MARINTEK (2002).	114
Tabela 4.2.3.2.1:	Tabela comparativa dos valores de Ca obtidos considerando valores grandes de KC.	115
Tabela 4.2.4.1.1:	Tabela comparativa dos valores assintóticos de Cd nos ensaios de oscilação forçada.	122
Tabela A.1:	Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo X, escala 1:35.	127
Tabela A.2	Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo Y escala 1:35.	128
Tabela A.3	Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo Y escala 1:70.	129
Tabela A.4	Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo Z escala 1:35.	130
Tabela A.5	Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo X, escala 1:70.	131

LISTA DE SÍMBOLOS

A	–	amplitude;
A_F	–	área frontal em relação à direção do escoamento;
a	–	dimensão de comprimento no WAMIT;
a	–	aceleração do modelo no ensaio de reboque;
a_H	–	aceleração da haste no ensaio de reboque;
A_T	–	área transversal;
b	–	dimensão de altura no WAMIT;
B	–	dimensão de largura;
Ca	–	coeficiente de massa adicional;
Ca_{11}	–	coeficiente de massa adicional em X (<i>surge</i>);
Ca_{22}	–	coeficiente de massa adicional em Y (<i>sway</i>);
Ca_{22+pl}	–	coeficiente de massa adicional em Y com placa acoplada;
Ca_{33}	–	coeficiente de massa adicional em Z (<i>heave</i>);
Ca_{44}	–	coeficiente de massa adicional de rotação em X (<i>roll</i>);
Ca_{55}	–	coeficiente de massa adicional de rotação em Y (<i>pitch</i>);
Ca_{66}	–	coeficiente de massa adicional de rotação em Z (<i>yaw</i>);
Cd_{11}	–	coeficiente de arrasto em X;
Cd_{22}	–	coeficiente de arrasto em Y;
Cd_{22+pl}	–	coeficiente de arrasto em Y com placa acoplada;
Cd_{33}	–	coeficiente de arrasto em Z;
D	–	diâmetro;
D	–	comprimento característico, MARINTEK (2002);
EMM	–	modelo de extrapolação matemática;
Fd	–	força de arrasto;
F_{haste}	–	força da haste;
F_M	–	força do <i>manifold</i> ;
F_{man}	–	força do <i>manifold</i> ;
$F_{man+haste}$	–	força do <i>manifold</i> + haste;
g	–	constante gravitacional;
H	–	dimensão de altura;

KC	–	número de Keulegan-Carpenter;
L	–	dimensão de comprimento;
L	–	comprimento característico nos ensaios de oscilação forçada;
$LVDT$	–	<i>linear variable differencial transformer</i> ;
M	–	dimensão de massa;
Ma	–	massa adicional;
Ma_E	–	massa adicional da esfera;
Ma_M	–	massa adicional do <i>manifold</i> ;
m_E	–	massa da esfera;
MPC	–	moonpool circular;
Rey	–	número de <i>Reynolds</i> ;
Rey_m	–	número de <i>Reynolds</i> máximo;
T	–	dimensão de tempo;
V	–	velocidade;
V	–	volume;
V_{final}	–	velocidade final;
V_m	–	velocidade máxima;
W	–	comprimento característico, Oceanic (2003);
X_A	–	amplitude de força do <i>modelo</i> ;
X_{AH}	–	força da haste;
λ	–	fator de escala;
ν	–	viscosidade cinemática do fluido;
ρ	–	massa específica;

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Cada vez mais há a necessidade de se aumentar a profundidade d'água para a exploração de petróleo. Em virtude disso, as companhias petrolíferas têm enfrentado grandes desafios técnico-científicos, requerendo uma intensa pesquisa tecnológica. A instalação do *manifold*, Figura 1.1.1, requer portanto ainda mais cuidado e pesquisas que venham a determinar com maior precisão as suas propriedades.



Figura 1.1.1: *Manifold* típico.

O *Manifold* é constituído de vários tubos, válvulas e instrumentos de monitoração de pressão, temperatura e vazão, conforme mostra a Figura 1.1.1. Sua função é interligar o escoamento de vários poços à unidade de separação do sistema de produção que geralmente é instalada sobre uma unidade estacionária de produção (UEP). Esta é responsável pelo recebimento do fluido produzido, tratamento e exportação até o meio responsável pelo transporte do fluido.

O tamanho dos *manifolds* tem crescido rapidamente principalmente devido à necessidade de se utilizar um único sistema para interligação de diversos poços produtores. A combinação de maior tamanho com o comprimento dos cabos de instalação, tem levado a ressonâncias durante a instalação vertical pois o manifold atinge a sua freqüência natural a uma profundidade de cerca de 700m. Assim, a instalação pendular torna-se ao mesmo tempo simplificadora e mais econômica (mais rápida, menos mobilização, etc.). Este método consiste na utilização de duas embarcações, uma ferramenta de instalação (*triplate*) e cabos conforme mostrado na Figura 1.1.2.

O *manifold* é preso a uma extremidade de um cabo quase horizontal. No primeiro instante após o lançamento há uma quase queda livre; num segundo instante o movimento quase circular (pendular). O nome pendular pode enganar na medida em que estudos recentes (FERNANDES, A.C., SANTOS, M.F., MINEIRO, F.P.S. e NEVES, C.R., 2005) que incluem ensaios em tanques de prova mostram que ao chegar no ponto mínimo, o *manifold* praticamente para. Ou seja, não há uma oscilação típica de um pêndulo.

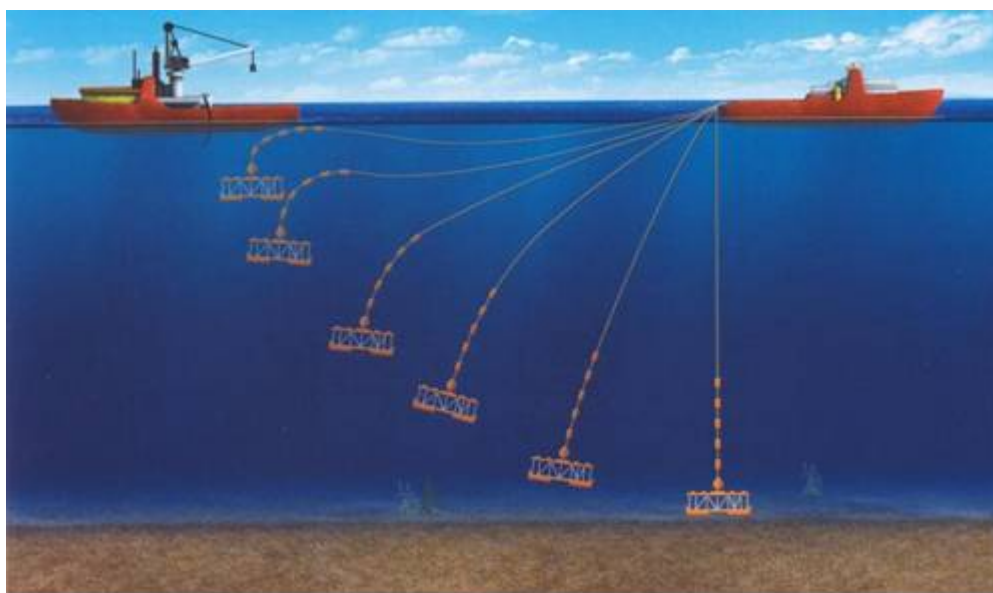


Figura 1.1.2: Esquema do PIM, Método de Instalação Pendular, (RIBEIRO, 2005).

Com o início das análises numéricas do PIM (Método de Instalação Pendular), há a necessidade de se obter estimativas corretas para as propriedades hidrodinâmicas, tais como os coeficientes de arrasto e massa adicional. Porém, a literatura é incompleta

e então existe a necessidade de realizar novos cálculos e testes experimentais para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos, principalmente tendo em vista a forma muito particular do corpo em questão.

1.2 Coeficientes de Massa Adicional e Arrasto

Durante a instalação, o *manifold* é posto em movimento e o escoamento ao redor do seu corpo dá origem a um campo de pressões hidrodinâmicas na superfície do mesmo. Além do empuxo estático, aparecem forças de arrasto e de massa adicional.

A abordagem do presente trabalho, considera o caso do *manifold* à grande distância da superfície livre, e portanto não são considerados os efeitos de ondas superficiais ou do impacto ao atravessar a superfície livre da água, durante a imersão ou emersão, com a passagem da onda em membros estruturais próximos à linha d' água. Nessas condições as forças hidrodinâmicas relevantes são apenas duas, a saber: a parcela devido à inércia da porção do fluido junto à superfície do corpo em movimento acelerado (massa adicional), e a outra parcela que é proporcional ao movimento relativo do corpo em relação ao meio fluido. Esta última é usualmente decomposta em duas componentes: uma na direção da velocidade do fluido no campo livre (longe do contorno do corpo imerso), chamada de arrasto (*drag*) e outra componente na direção perpendicular, chamada de sustentação (*lift*). A última componente não será aqui considerada.

O objetivo deste trabalho é obter e analisar os valores dos coeficientes C_a e C_d , respectivamente os coeficientes de massa adicional e de arrasto, para o caso do *manifold*.

1.3 Descrição dos Capítulos

O Capítulo 1 apresenta a importância da massa adicional e do arrasto para geometrias complexas como o manifold e as influências dos respectivos coeficientes hidrodinâmicos no PIM (Método de Instalação Pendular). A motivação e objetivos são apontados. As estimativas dos coeficientes hidrodinâmicos serão apresentados em métodos numéricos e experimentais.

No Capítulo 2, a respeito da obtenção da massa adicional, apresenta-se os seguintes métodos: uso da teoria potencial linear através dos limites de frequência de um programa de comportamento do navio no mar (*sea keeping*); ensaio de reboque com aceleração uniforme. Os resultados dos métodos são posteriormente comparados com os resultados já conhecidos presentes na literatura.

O Capítulo 3 descreve um método para obtenção do arrasto: ensaio de reboque com velocidade constante. Posteriormente, também é feita a comparação dos resultados dos métodos com as referências literárias conhecidas.

O Capítulo 4 apresenta a obtenção da massa adicional e do arrasto, simultaneamente, através de dois métodos experimentais: lançamento vertical e oscilação forçada. Para o método de lançamento vertical, a trajetória do *manifold* é registrada por câmera de vídeo para posterior análise. Com os resultados das análises das trajetórias nos vídeos, é possível utilizar um Modelo de Extrapolação Matemática (EMM) e então obter os coeficientes de massa adicional e arrasto. Os resultados do método de oscilação forçada incluem efeitos do número de Keulegan-Carpenter (KC).

O Capítulo 5 contém as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

2 OBTENÇÃO DA MASSA ADICIONAL

2.1 Definição

Quando um corpo acelera em meio fluido parado, longe de obstáculos, aparece uma força contrária à direção de aceleração que pode ser calculada proporcionalmente a própria aceleração, ou seja:

$$F_x = -m_{11}\ddot{x} \quad (2.1.1)$$

Onde \ddot{x} denota a aceleração na direção X. O coeficiente m_{11} , é análogo à massa na equação fundamental da dinâmica (segunda lei de Newton) e pode ser interpretado como uma massa de líquido que se move junto com o corpo, como se tivesse entranhada dentro do mesmo. Daí o nome de massa adicional para designar esta propriedade, ligada fundamentalmente à forma geométrica do corpo. O coeficiente de massa adicional é em geral obtido por:

$$Ca_{11} \equiv \frac{m_{11}}{\rho \nabla} \quad (2.1.2)$$

Onde $\rho \nabla$ denota a parcela de volume deslocado.

Dentro da teoria do potencial, ou seja, considerando o fluido ideal ou melhor não viscoso e não desenvolvendo um escoamento irrotacional, a equação (2.1.1) vale com $m_{11} = \text{cte}$, tanto para movimento de translação quanto para movimento oscilatório. Entretanto, se os efeitos viscosos forem significativos a massa adicional pode não ser constante, principalmente quando houver correlação com efeitos oscilatórios. Isto será mostrado nos resultados dos ensaios de oscilação forçada em seguida.

Até esse ponto, o trabalho vai prosseguir sob a hipótese de $m_{11} = \text{cte}$ e portanto usando (2.1.2).

Estritamente falando a equação (2.1.1) está aqui representada apenas para efeito de translação. Para efeito de rotação pura, apenas um momento adicional que leva à:

$$M_x = -m_{44}\ddot{\theta} \quad (2.1.3)$$

Onde $\ddot{\theta}$ identifica a aceleração angular em termos do eixo X e m_{44} é o momento de inércia em relação ao mesmo eixo.

Em geral, esse efeito inercial devido ao fluido pode ser escrito:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} & m_{26} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} & m_{36} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{X}_4 \\ \ddot{X}_5 \\ \ddot{X}_6 \end{bmatrix} \quad (2.1.4)$$

Pode-se provar, pelo Teorema de Green (Newman, 1978), que a matriz de massa adicional é simétrica, isto é:

$$m_{ij} = m_{ji} \quad (2.1.5)$$

A relação (2.1.5) decorre da fórmula para cálculo da massa adicional referente à i -ésima componente de força e j -ésima componente de aceleração, dada pela Equação (2.1.6).

$$m_{ij} = \rho \iiint_{\forall} (\nabla \phi_i \nabla \phi_j) d\forall \quad (2.1.6)$$

Onde \forall é o volume da massa fluida externa à região delimitada pelo contorno do corpo imerso e ϕ_i e ϕ_j são funções potenciais dos campos de velocidades referentes à velocidades unitárias, respectivamente nas componentes i e j . A Equação (2.1.6) é demonstrada em Newman (1978).

Se a forma geométrica do corpo imerso possuir um plano de simetria, vários elementos da matriz de massa adicional serão nulos. Por exemplo, se o plano XY for um plano de simetria, acelerações nas direções X ou Y não produzem força na direção Z, portanto os coeficientes m_{31} e m_{32} são nulos. Movimentos de translação no plano de simetria não

produzem momento em eixo algum contido no plano de simetria; portanto são nulos os coeficientes m_{41} , m_{42} , m_{51} , m_{52} . Movimentos de rotação em torno do eixo z não produzem força na direção z , devido ao plano de simetria ortogonal a este eixo; portanto o coeficiente m_{63} é nulo. Também não produzem momentos em torno de qualquer eixo contido no plano de simetria; portanto os coeficientes m_{64} e m_{65} também são nulos. Considerando a simetria da matriz, outros coeficientes também se anularão, de modo que a Equação (2.1.4), no caso em que o plano XY é de simetria, fica reduzida à Equação (2.1.7). Analogamente, se o plano YZ for de simetria a Equação (2.1.4) fica reduzida à Equação (2.1.8). E, finalmente, se a forma geométrica tiver como plano de simetria o plano ZX , a Equação pertinente é a Equação (2.1.9). No caso do *manifold*, há dupla simetria, Equação (2.1.10).

➤ Plano de simetria XY

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{26} \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} & m_{35} & 0 \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} & m_{45} & 0 \\ 0 & 0 & m_{53} & m_{54} & m_{55} & 0 \\ m_{61} & m_{62} & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{X}_4 \\ \ddot{X}_5 \\ \ddot{X}_6 \end{bmatrix} \quad (2.1.7)$$

➤ Plano de simetria YZ

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{15} & m_{16} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{24} & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & m_{34} & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & m_{43} & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & 0 & 0 & 0 & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{X}_4 \\ \ddot{X}_5 \\ \ddot{X}_6 \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

➤ Plano de simetria ZX

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & 0 & m_{15} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{24} & 0 & m_{26} \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & m_{35} & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & m_{46} \\ m_{51} & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & m_{64} & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{X}_4 \\ \ddot{X}_5 \\ \ddot{X}_6 \end{bmatrix} \quad (2.1.9)$$

➤ Planos de simetria YZ e ZX (caso do *manifold*)

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{15} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{X}_4 \\ \ddot{X}_5 \\ \ddot{X}_6 \end{bmatrix} \quad (2.1.10)$$

2.2 Coeficientes de Massa Adicional na Literatura

Antes da aplicação dos métodos numéricos e experimentais, o presente trabalho realizou uma pesquisa através da literatura específica com o intuito de evidenciar os coeficientes de massa adicional já conhecidos para diversas geometrias. As características principais do *manifold* considerado para cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos e posterior análise são apresentadas na Tabela 2.2.1.

Tabela 2.2.1: Características principais do *manifold* a ser analisado.

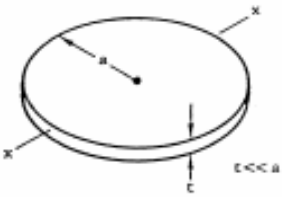
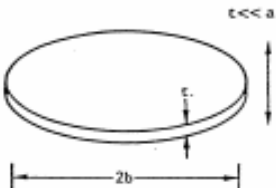
Comprimento, L (m)	16,635
Largura, B (m)	8,500
Altura, H (m)	5,149

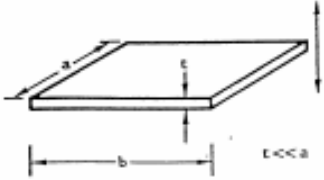
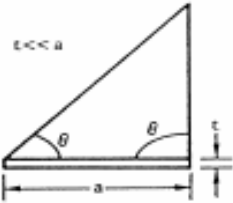

2.2.1 Coeficiente de Massa Adicional segundo Blevins (1979)

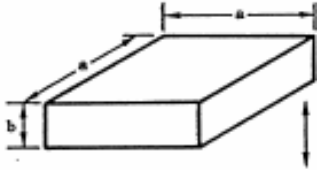
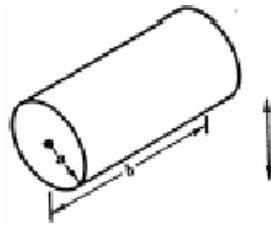
As massas adicionais para diversos corpos tridimensionais e de placas em movimento na direção ortogonal ao seu plano, segundo Blevins (1979), são dadas pela Tabela 2.2.1.1, usando resultados teóricos e experimentais.

Tabela 2.2.1.1: Massas adicionais segundo Blevins (1979).

Notação: ρ = densidade do fluido; t = resultado teórico, e = resultado experimental.

Descrição do Corpo	Massa Adicional	Momento de Inércia Adicional																								
<p>1. Disco Circular</p> 	$\updownarrow \frac{8}{3} \rho a^3$ $\leftrightarrow 0,0$	<p>Rotação em torno do eixo X:</p> $0,37 \rho a^5$																								
<p>2. Disco Elíptico</p>  <p>a = eixo menor b = eixo maior</p>	$\alpha \frac{4}{3} \pi \rho a^2 b$ <table border="1" data-bbox="587 1518 981 1971"> <thead> <tr> <th>b/a</th> <th>α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>∞</td> <td>1,0000</td> </tr> <tr> <td>14,3000</td> <td>0,9910</td> </tr> <tr> <td>10,0000</td> <td>0,9840</td> </tr> <tr> <td>7,0000</td> <td>0,9720</td> </tr> <tr> <td>6,0000</td> <td>0,9640</td> </tr> <tr> <td>5,0000</td> <td>0,9520</td> </tr> <tr> <td>4,0000</td> <td>0,9330</td> </tr> <tr> <td>3,0000</td> <td>0,9000</td> </tr> <tr> <td>2,0000</td> <td>0,8260</td> </tr> <tr> <td>1,5000</td> <td>0,7580</td> </tr> <tr> <td>1,0000</td> <td>0,6370</td> </tr> </tbody> </table>	b/a	α	∞	1,0000	14,3000	0,9910	10,0000	0,9840	7,0000	0,9720	6,0000	0,9640	5,0000	0,9520	4,0000	0,9330	3,0000	0,9000	2,0000	0,8260	1,5000	0,7580	1,0000	0,6370	<p>Ref. Munk (1934)</p>
b/a	α																									
∞	1,0000																									
14,3000	0,9910																									
10,0000	0,9840																									
7,0000	0,9720																									
6,0000	0,9640																									
5,0000	0,9520																									
4,0000	0,9330																									
3,0000	0,9000																									
2,0000	0,8260																									
1,5000	0,7580																									
1,0000	0,6370																									

		t																											
<p>3. Placa Retangular</p> 	$\alpha \frac{\pi}{4} \rho a^2 b$ <table border="1" data-bbox="587 477 983 969"> <thead> <tr> <th>b/a</th> <th>α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,0000</td><td>0,5790</td></tr> <tr><td>1,2500</td><td>0,6419</td></tr> <tr><td>1,5900</td><td>0,7038</td></tr> <tr><td>2,0000</td><td>0,7568</td></tr> <tr><td>2,5000</td><td>0,8008</td></tr> <tr><td>3,1700</td><td>0,8404</td></tr> <tr><td>4,0000</td><td>0,8718</td></tr> <tr><td>5,0000</td><td>0,8965</td></tr> <tr><td>6,2500</td><td>0,9167</td></tr> <tr><td>8,0000</td><td>0,9344</td></tr> <tr><td>10,0000</td><td>0,9469</td></tr> <tr><td>∞</td><td>1,0000</td></tr> </tbody> </table>	b/a	α	1,0000	0,5790	1,2500	0,6419	1,5900	0,7038	2,0000	0,7568	2,5000	0,8008	3,1700	0,8404	4,0000	0,8718	5,0000	0,8965	6,2500	0,9167	8,0000	0,9344	10,0000	0,9469	∞	1,0000		Ref. Meyerhoff (1970)
b/a	α																												
1,0000	0,5790																												
1,2500	0,6419																												
1,5900	0,7038																												
2,0000	0,7568																												
2,5000	0,8008																												
3,1700	0,8404																												
4,0000	0,8718																												
5,0000	0,8965																												
6,2500	0,9167																												
8,0000	0,9344																												
10,0000	0,9469																												
∞	1,0000																												
		t																											
<p>4. Placa Triangular Isósceles</p> 	$\frac{\rho a^3}{3\pi} (\tan \theta)^{3/2}$ <p>(movimento perpendicular ao plano do triângulo)</p>	e	Ref. Nielsen (1960)																										
<p>5. Cubo</p> 	$\alpha \rho a^3$ <p>$\alpha = 0,67$ Ref. Stelson (1955) ou $\alpha = 0,70$ Refs. Yu (1945), Sarpkaya (1960)</p>	e	-																										
<p>6. Sólido Retangular</p>	$\alpha \rho a^2 b$ <table border="1" data-bbox="587 1921 983 1998"> <thead> <tr> <th>b/a</th> <th>α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,50</td><td>1,32</td></tr> </tbody> </table>	b/a	α	0,50	1,32																								
b/a	α																												
0,50	1,32																												

	0,60	1,15	Ref. Sarpkaya (1960)												
	0,80	0,86													
	1,00	0,70													
	1,20	0,57													
	1,60	0,45													
	2,00	0,35													
	2,40	0,30													
	2,80	0,26													
	3,60	0,22													
e															
7. Cilindro Circular	$\alpha \rho \pi a^2 b$		Ref. Wendel (1950)												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>b/(2a)</th> <th>α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,20</td> <td>0,62</td> </tr> <tr> <td>2,50</td> <td>0,78</td> </tr> <tr> <td>5,00</td> <td>0,90</td> </tr> <tr> <td>9,00</td> <td>0,96</td> </tr> <tr> <td>∞</td> <td>1,00</td> </tr> </tbody> </table>	b/(2a)		α	1,20	0,62	2,50	0,78	5,00	0,90	9,00	0,96	∞	1,00	
	b/(2a)	α													
	1,20	0,62													
	2,50	0,78													
	5,00	0,90													
	9,00	0,96													
∞	1,00														
e															

Referências:

Munk (1934): Apud Blevins (1979).

Meyerhoff (1970): Apud Blevins (1979).

Nielsen (1960): Apud Blevins (1979).

Stelson (1955): Apud Blevins (1979).

Yu (1945): Apud Blevins (1979).

Sarpkaya (1960): Apud Blevins (1979).

Wendel (1950): Apud Blevins (1979).

Para o cálculo do coeficiente de massa adicional para o *manifold* da Tabela 2.2.1, utiliza-se a linha 6 da Tabela 2.2.1.1. Porém, esta só admite base quadrada e não retangular como desejado. Divide-se então o *manifold*, longitudinalmente, em duas partes com dimensões de 8,500X8,500X5,149 cada. Sendo assim, obtém-se a razão $b/a = 5,149/8,500 = 0,605$. Para esta razão, a linha 6 da Tabela 2.2.1.1 fornece um valor de 1,15 para Ca_{33} . Como tem-se duas partes: $Ca_{33} = 2*1,15 = 2,30$.

2.3 Obtenção da Massa Adicional pelo Método dos Limites de Frequência de um Programa de Comportamento do Navio no Mar

A dependência da massa adicional de um corpo rígido com a frequência pode ser verificada considerando os limites $\omega \rightarrow 0$ e $\omega \rightarrow \infty$. Nesses casos, a condição de superfície livre, é expressa por:

$$-\frac{\omega^2}{g} \phi_k + \frac{\partial \phi_k}{\partial z} = 0 \quad (2.3.1)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} = 0 \quad \text{em } Z = 0, \omega \rightarrow 0 \quad (2.3.2)$$

$$\phi_k = 0 \quad \text{em } Z = 0, \omega \rightarrow \infty \quad (2.3.3)$$

A Equação (2.3.2) representa a condição de superfície livre onde as forças gravitacionais predominam sobre as forças inerciais enquanto que na condição de contorno da Equação (2.3.3), as forças inerciais predominam sobre as gravitacionais. Estritamente, desde que ω e g são quantidades dimensionais, deve-se assumir que as Equações (2.3.2) e (2.3.3) são válidas respectivamente para os dois valores limites da razão adimensional $\frac{\omega^2 L}{g}$, onde L é comprimento característico do corpo.

A Equação (2.3.2) é a condição de contorno de uma parede rígida, onde a superfície livre é substituída por um plano horizontal fixo. O problema resultante para cada valor de ϕ_k pode ser resolvido considerando-se o plano horizontal como um espelho: o corpo é refletido assumindo um corpo duplo. A imagem acima do plano $Z = 0$, é um corpo com a mesma forma geométrica, refletida em $Z = 0$. A fase da imagem do corpo deve ser tal que o potencial seja função de Z , e a velocidade normal assumo o mesmo valor dos pontos correspondentes do corpo e sua imagem.

Segundo Newman (1978), para movimentos de baixa frequência no plano horizontal (*surge*, *sway* e *yaw*), a imagem do corpo deve mover-se com a mesma fase que o corpo real, como mostrado na Figura 2.3.1. Neste caso, o corpo soma-se à sua imagem formando um corpo duplo. Os valores limites da massa adicional correspondentes são:

$$ma_{ij} = \frac{1}{2}m_{ij} \quad (2.3.4)$$

Onde m_{ij} é a massa adicional do corpo duplo.

Para movimentos de baixa frequência no plano vertical (*heave*, *roll* ou *pitch*), a simetria requer que a fase da imagem do corpo seja oposta a fase do corpo real, Figura 2.3.2. Neste caso, o modo de movimento corresponde a uma dilatação oscilatória do corpo, o corpo pulsa, como uma sanfona.

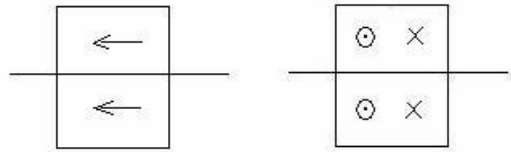


Figura 2.3.1: Limite de baixa frequência $\omega \rightarrow 0$ para *surge* e *sway*, à esquerda, e para *yaw*, à direita, formação de corpo duplo.

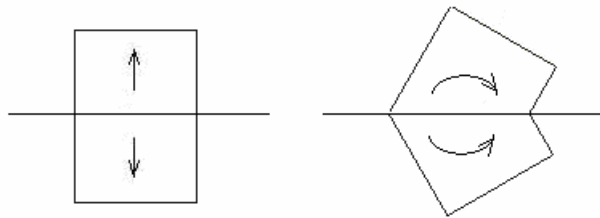


Figura 2.3.2: Limite de baixa frequência $\omega \rightarrow 0$ para *heave*, à esquerda, e para *roll* ou *pitch*, à direita, corpo pulsando (sanfona).

A situação oposta aplica-se ao limite de alta frequência, Equação (2.3.3), onde o potencial deve ser trocado em Z , e a assimetria resultante requer que a fase da imagem seja oposta a do corpo, conforme Figuras 2.3.3 e 2.3.4. Os modos verticais (*heave*, *roll* ou *pitch*) de movimento correspondem aos de um corpo duplo, Figura 2.3.4, logo a Equação (2.3.4) é aplicada. Por outro lado, os modos horizontais (*surge*, *sway* ou *yaw*), Figura (2.3.3), correspondem a deflexões cisalhantes formando então um corpo cisalhante.

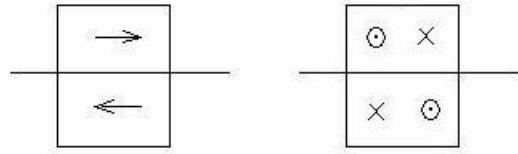


Figura 2.3.3: Limite de alta frequência $\omega \rightarrow \infty$ para *surge* e *sway*, à esquerda, e para *yaw*, à direita, corpo cisalhante.

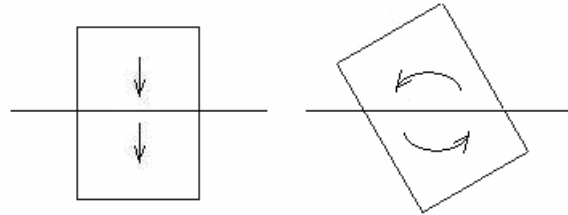


Figura 2.3.4: Limite de alta frequência $\omega \rightarrow \infty$ para *heave*, à esquerda, e para *roll* ou *pitch*, à direita, corpo duplo.

O método dos limites de frequência tem por objetivo obter os valores dos coeficientes de C_a através do programa WAMIT V6.211, fazendo uso da teoria potencial conforme proposto por (Fernandes 2005).

Antes de chegar-se aos valores de C_a do *manifold*, validou-se a metodologia através da obtenção dos coeficientes de massa adicional para diversas formas geométricas lembradas em Newman (1978) e Blevins (1979).

Os cálculos do $C_{a_{ij}}$ pelo WAMIT V6.211 podem ser feitos através de dois métodos: *Low Order Panel* e *High Order Panel*.

- *Low Order Panel*: Método geométrico de cálculo do WAMIT V6.211 que utiliza baixa ordem. A geometria do corpo é representada por painéis planos. Para atingir a convergência faz-se um aumento progressivo do número de painéis. Este método é apropriado para corpos com lados e superfície planos, como barras retangulares, navios e plataformas com formas simples.
- *High Order Panel*: Método geométrico do WAMIT V6.211 no qual são utilizadas sub-rotinas com ordem superior, acima de dois. Na maioria dos casos, este é mais eficiente e acurado. Mais precisamente, o método *high order panel* converge mais rápido que o método *low order panel*, quando o

número de painéis é aumentado em ambos. A representação geométrica permite formas mais complexas. A entrada de dados geométricos pode ser feita de diversas técnicas incluindo painéis planos, aproximações B-spline, modelos geométricos desenvolvidos no MultiSurf e ainda fórmulas analíticas explícitas.

2.3.1 Cálculo do Ca de uma Caixa pelo programa WAMIT V6.211

Para o caso de uma caixa (sólido retangular), Blevins (1979) fornece os valores de Ca para heave. Para avaliar tanto o limite de baixa frequência quanto o de alta frequência, calculou-se os coeficientes de massa adicional para *heave* e *surge*. Assim, o Ca para *heave* no período tendendo a zero (frequência infinita) de uma caixa de dimensões 40x40x20, Figura 2.3.1.1, por exemplo, coincidem com os valores de Ca em surge para período tendendo a infinito, ou seja, frequência zero de uma caixa onde as dimensões são 20x40x40, Figura 2.3.1.2.

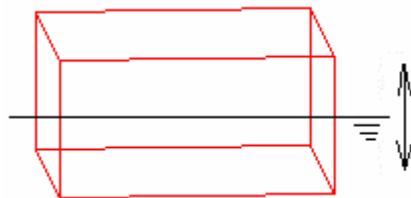


Figura: 2.3.1.1: Ilustração de caixa com dimensões 40x40x20, $p \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \infty$.

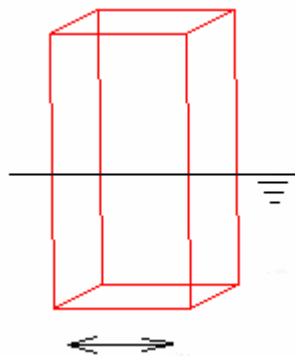


Figura 2.3.1.2: Ilustração de caixa com dimensões 20x40x40, $p \rightarrow \infty$, $\omega \rightarrow 0$.

As malhas de entrada no WAMIT V6.211, para o caso de *Low Order Panel*, são geradas no programa Mesh Generator (MG 2005).

As razões de b/a , onde b representa a altura e a , o comprimento da caixa, foram variadas e para cada uma, obtido o C_a respectivo.

A seguir são apresentados os dois métodos de cálculo, *Low Order Panel* e *High Order Panel*, respectivamente, para cada razão de b/a da caixa.

➤ Caixa $b/a = 1$

As dimensões da primeira caixa modelada são:

$$a = 40 \text{ m}$$

$$b = 40 \text{ m}$$

Onde:

a: Comprimento / largura

b: Altura

De modo que a caixa representada é um cubo, e a razão $b/a = 1$.

➤ *Low Order Panel*

Para o primeiro caso da caixa, processado no WAMIT V6.211, foi admitida uma razão $b/a = 1$ com variação progressiva no número de painéis. A Figura 2.3.1.3 mostra um exemplo de quadrante da malha gerada para a caixa. Foram processados 9 casos, com variação no número de painéis de 12 a 4800. Os resultados são apresentados na Tabela 2.3.1.1.

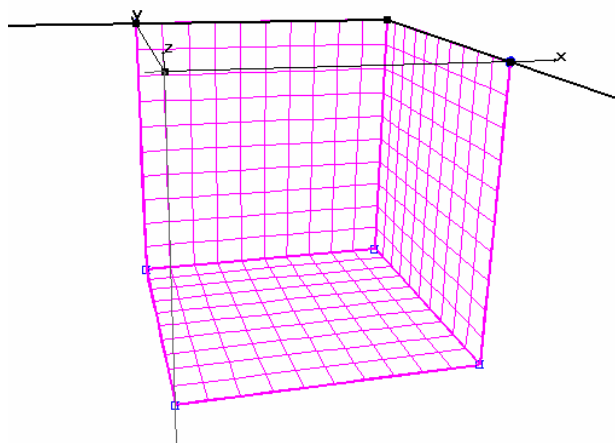


Figura 2.3.1.3: Quadrante da malha gerada para a caixa no MG, razão $b/a = 1$.

Tabela 2.3.1.1: Ca para caixa $b/a = 1$, *low order panel*, nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$).

Nº Painéis	$Ca_{33} (p = 0)$	$Ca_{11} (p = \infty)$
12	0,78	0,78
32	0,72	0,72
48	0,70	0,70
108	0,68	0,68
192	0,67	0,67
300	0,66	0,66
432	0,66	0,66
1200	0,65	0,65
4800	0,64	0,64

Analisando a Tabela 2.3.1.1, observa-se que os coeficientes de massa adicional em X, Ca_{11} , para período infinito, e em Z, Ca_{33} , para período nulo, são equivalentes. A convergência é atingida em 300 painéis com Ca igual a 0,66, valor próximo de Blevins (1979), $Ca = 0,67$, conforme Tabela 2.2.1.1, para o caso do cubo. Nota-se ainda que

com um número excessivo de painéis, acima de 1000, há um pequeno decréscimo na convergência.

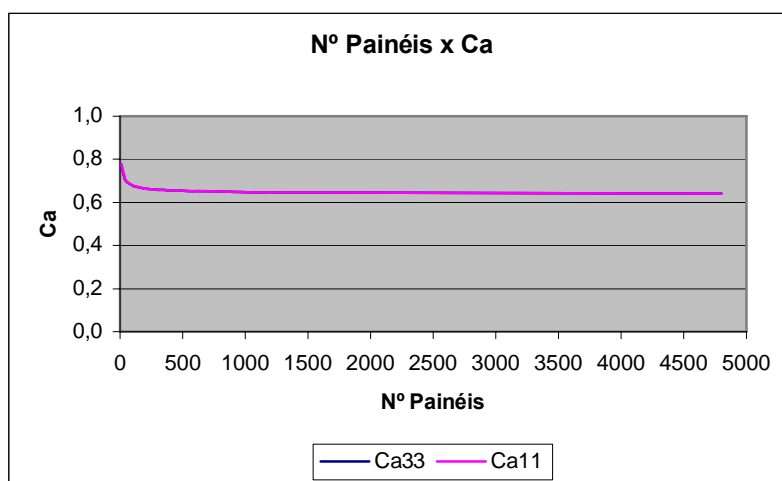


Figura 2.3.1.4: Variação do Ca com o nº de painéis.

A Figura 2.3.1.4 mostra a convergência com o aumento do número de painéis, a partir de 300, e ainda, que a curva em rosa, representando os valores de Ca_{11} , e a curva em azul, que representa os valores para Ca_{33} , sobrepõem-se. O número de painéis recomendado é aproximadamente 300.

➤ *High Order Panel*

Para o método com *High Order Panel*, não há necessidade de gerar uma malha de entrada para o WAMIT V6.211 pois o método utiliza sub-rotinas analíticas internas do programa, devendo-se apenas entrar com as dimensões principais da caixa.

Com o uso do *High Order Panel*, a convergência é atingida de forma mais rápida e os parâmetros a serem variados são: a ordem do polinômio (nota-se que nas tabelas a seguir a ordem do polinômio é acrescida de 1 pois a entrada no WAMIT V6.211 é feita desta forma) e o número de painéis. O número de painéis é proporcional a ordem do polinômio, ou seja, quanto maior a ordem, maior o número de painéis.

Utilizando as mesmas dimensões utilizadas anteriormente com o método *Low Order Panel* para a razão $b/a = 1$, obtêm-se os valores de Ca presentes na Tabela

2.3.1.2, e nas Figuras 2.3.1.5 e 2.3.1.6, que mostram a variação do Ca com a ordem e com o número de painéis respectivamente.

Tabela 2.3.1.2: Resultados de Ca_{33} e Ca_{11} obtidos pelo WAMIT V6.211, nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$), razão $b/a = 1$.

Ordem +1	Nº Painéis	$Ca_{33} (p = 0)$	$Ca_{11} (p = \infty)$
3	324	0,66	0,66
4	464	0,66	0,66
5	628	0,66	0,66
6	816	0,66	0,66
7	1028	0,66	0,66
8	1264	0,66	0,66
9	1524	0,66	0,66
10	1808	0,67	0,67

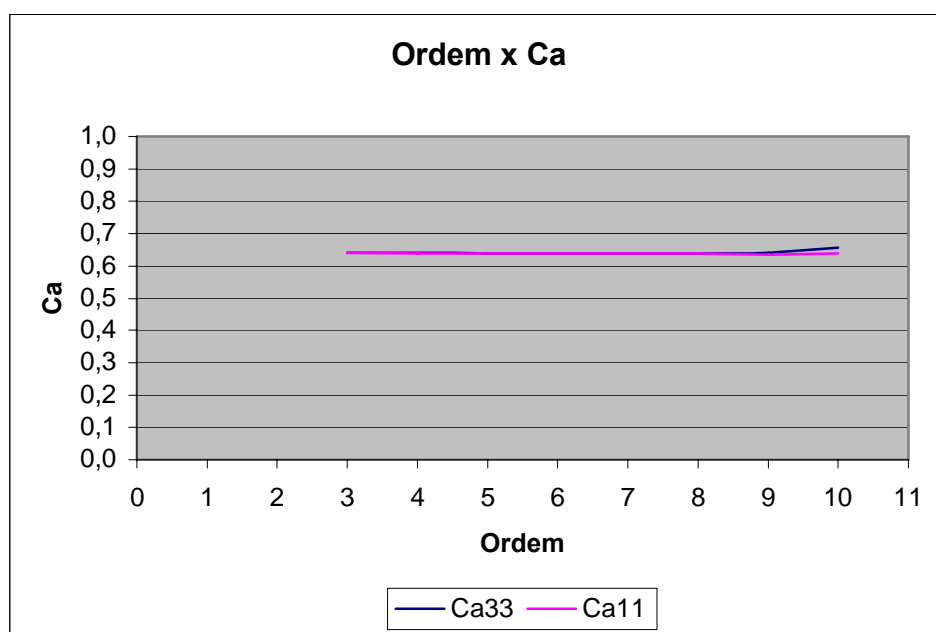


Figura 2.3.1.5: Variação do Ca com a ordem.

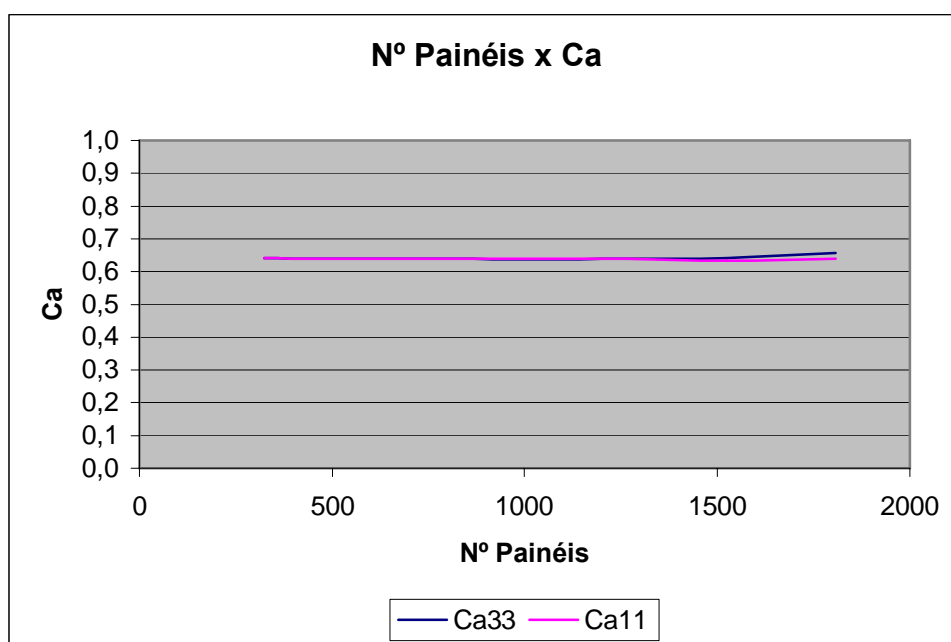


Figura 2.3.1.6: Variação do Ca com o nº de painéis, *high order panel*.

Pela análise da Tabela 2.3.1.2 e das Figuras 2.3.1.5 e 2.3.1.6, verifica-se a equivalência entre os coeficientes Ca_{11} e Ca_{33} . Nas Figuras 2.3.1.5 e 2.3.1.6 é possível ainda verificar que as curvas dos coeficientes de massa adicional em X e em Z coincidem quase em sua totalidade, até cerca de 1500 painéis, ou ordem 9. A convergência com o método *high order panel* se dá logo no primeiro processamento, com ordem 2, ou 3 no WAMIT V6.211, e aproximadamente 300 painéis, como no método *low order panel*, porém com muito mais rapidez, aproximadamente 1h a menos. O valor de Ca obtido na convergência é de 0,66, conforme a Tabela 2.3.1.2. Nota-se que a partir da ordem 8, ou 9 no WAMIT V6.211, há um pequeno desvio da convergência.

➤ Caixa $b/a = 0,5$

Posteriormente foi considerada uma razão $b/a = 0,5$. Para este caso, faz-se necessário a modelação de duas caixas, uma para calcular o Ca em heave no período zero e outra para obter o Ca de surge no período infinito. Para tal, as dimensões das caixas são:

- Caixa para heave: 40 x 40 x 20 (Ver Figura 2.3.1.1)

- Caixa para surge: 20 x 40 x 40 (Ver Figura 2.3.1.2)

Na verdade, trata-se da mesma caixa, só que rotacionada de 90°.

➤ *Low Order Panel*

Novamente é gerada inicialmente uma malha com 12 painéis e em seguida vão sendo geradas outras malhas com maior número de painéis. A Figura 2.3.1.7 mostra uma das malhas geradas no MG (2005), com 3200 painéis. A Tabela 2.3.1.3 apresenta os valores de Ca para cada variação do número de painéis.

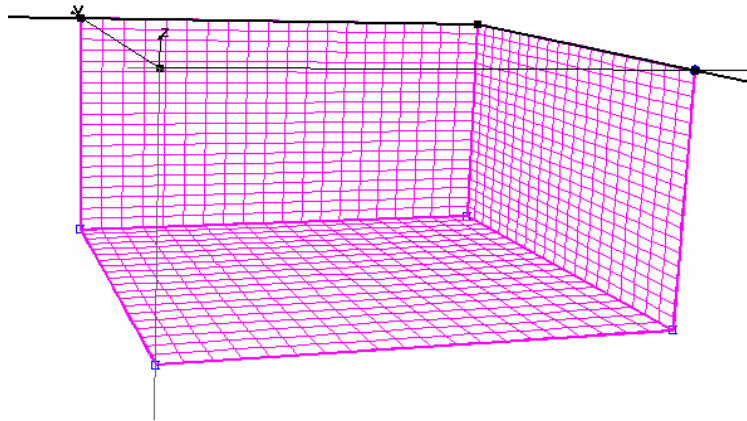


Figura 2.3.1.7: Quadrante da malha gerada para a caixa no MG (2005), razão $b/a = 0,5$.

Tabela 2.3.1.3: Ca para caixa $b/a = 0,5$, *low order panel*, nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$).

Nº Painéis	$Ca_{33} (p = 0)$	$Ca_{11} (p = \infty)$
12	1,47	1,47
108	1,28	1,28
800	1,22	1,22
1200	1,22	1,22

3200	1,21	1,21
6000	1,21	1,21

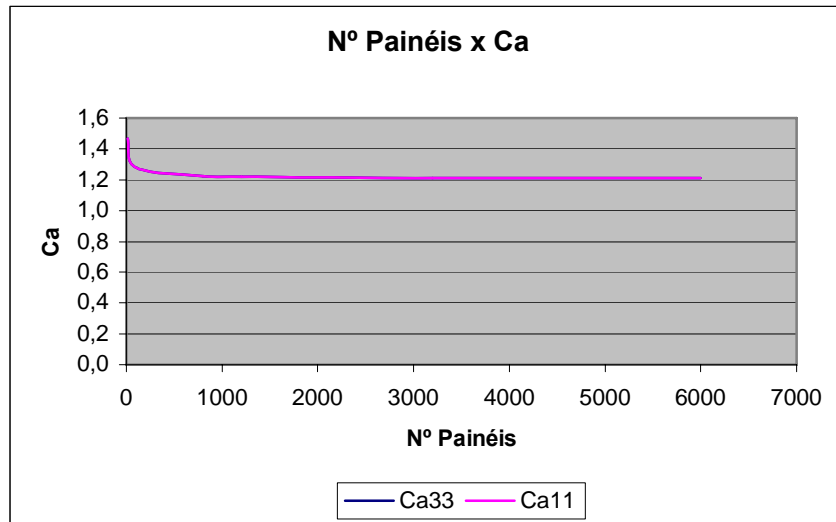


Figura 2.3.1.8: Variação do Ca com o nº de painéis.

Pela Tabela 2.3.1.3, verifica-se que os coeficientes de massa adicional Ca_{11} , no período infinito, e Ca_{33} , no período zero, são equivalentes.

A Figura 2.3.1.8 mostra que a convergência com o aumento do número de painéis ocorre em aproximadamente 500 painéis, com um Ca igual a 1,22. Blevins (1979) fornece um coeficiente de massa adicional igual a 1,32 para a razão $b/a = 0,5$, Tabela 2.2.1.1.

➤ *High Order Panel*

Para o uso do método *High Order Panel* para a razão $b/a = 0,5$, também foram processadas no WAMIT V6.211 as mesmas dimensões das duas caixas utilizadas no método anterior.

Os resultados de Ca para heave e surge estão na Tabela 2.3.1.4. As Figuras 2.3.1.9 e 2.3.1.10 mostram a variação do Ca com a ordem e com o número de painéis.

Tabela 2.3.1.4: Ca para caixa $b/a = 0,5$, *high order panel*, nos limites de período nulo ($p = 0$) e período infinito ($p = \infty$).

Ordem	Nº Painéis	Ca ₃₃ (p = 0)	Ca ₁₁ (p = ∞)
3	324	1,22	1,22
4	464	1,22	1,22
5	628	1,22	1,22
6	816	1,22	1,22
7	1028	1,22	1,22
8	1264	1,21	1,21
9	1524	1,21	1,21
10	1808	1,21	1,21

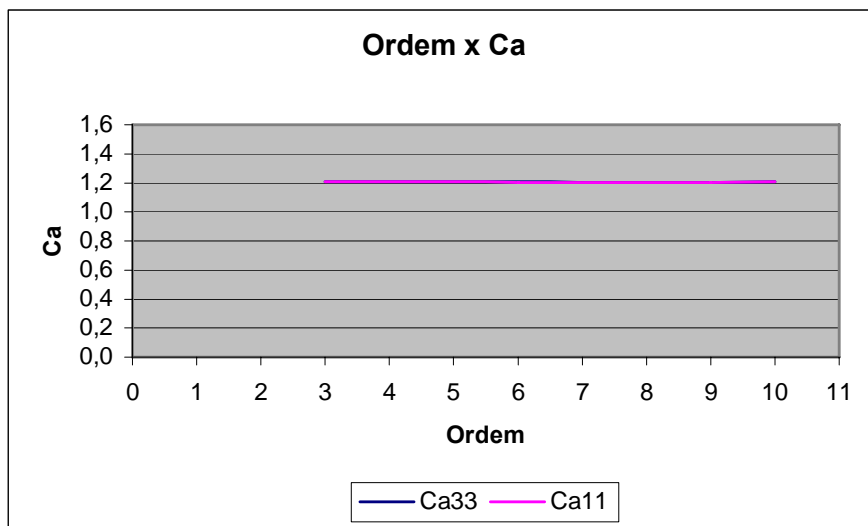


Figura 2.3.1.9: Variação do Ca com a ordem.

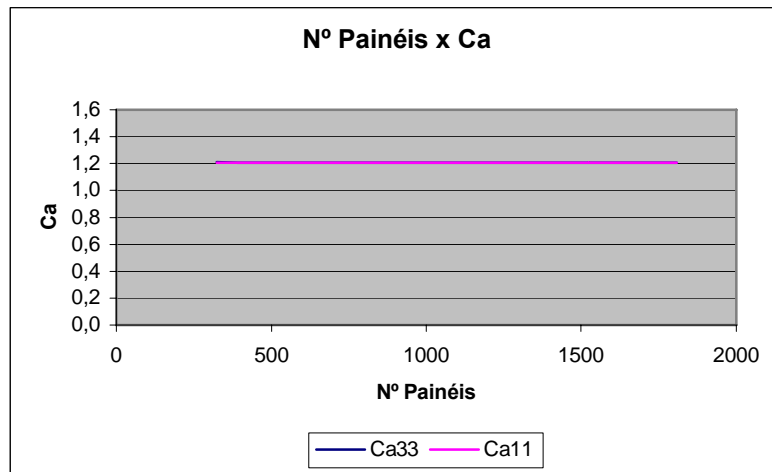


Figura 2.3.1.10: Variação do Ca com o nº de painéis.

Pela Tabela 2.3.1.4 percebe-se novamente a similaridade existente entre os coeficientes de massa adicional Ca_{11} e Ca_{33} .

As Figuras 2.3.1.9 e 2.3.1.10 mostram que as curvas do Ca_{33} e do Ca_{11} coincidem e a convergência é atingida com ordem 2, aproximadamente 300 painéis. O valor do coeficiente de massa adicional obtido é de 1,22, mesmo resultado obtido através do método low order panel, porém com maior rapidez.

➤ Caixa $b/a = 0,8$

Uma terceira e última razão, $b/a = 0,8$, foi considerada para a caixa. Neste caso, também são modeladas duas caixas com dimensões $40 \times 40 \times 32$, Figura 2.3.1.11, e $32 \times 40 \times 40$, Figura 2.3.1.12, ou como explicado anteriormente, a mesma rotacionada de 90° .

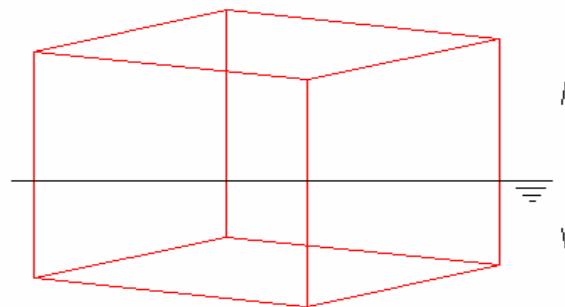


Figura 2.3.1.11: Ilustração de caixa com dimensões $40 \times 40 \times 32$, $p \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \infty$.

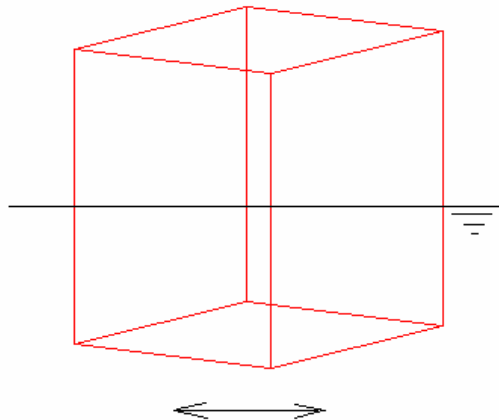


Figura 2.3.1.12: Ilustração de caixa com dimensões 32x40x40, $p \rightarrow \infty$, $\omega \rightarrow 0$.

➤ *Low Order Panel*

A primeira malha gerada contém 12 painéis. O número de painéis aumenta até atingir 4500. A malha com 4000 painéis é mostrada na Figura 2.3.1.13.

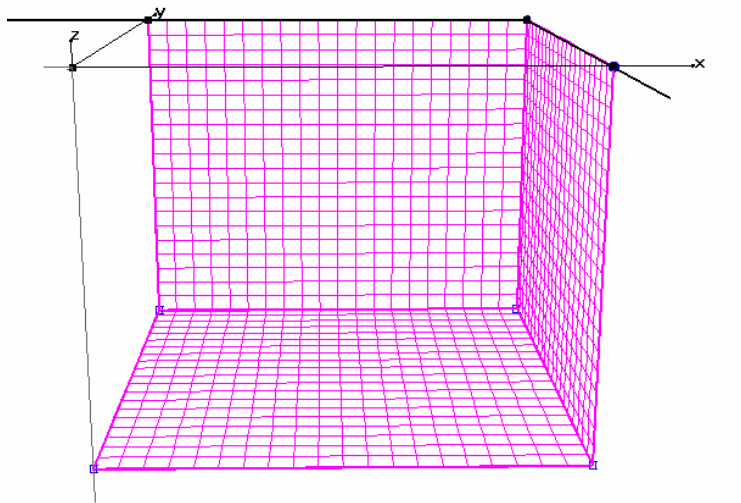


Figura 2.3.1.13: Quadrante da malha gerada para a caixa no MG (2005), razão $b/a = 0,8$.

A Tabela 2.3.1.5 apresenta os resultados dos coeficientes de massa adicional obtidos para heave e surge variando conforme o aumento do número de painéis. A Figura 2.3.1.14 mostra a variação do Ca com o número de painéis.

Tabela 2.3.1.5: Ca para caixa, *low order panel*.

Nº Painéis	Ca ₃₃ (p = 0)	Ca ₁₁ (p = ∞)
12	0,91	0,91
32	0,89	0,89
48	0,88	0,87
300	0,86	0,86
588	0,86	0,86
1200	0,86	0,86
4160	0,86	0,86
4500	0,85	0,85

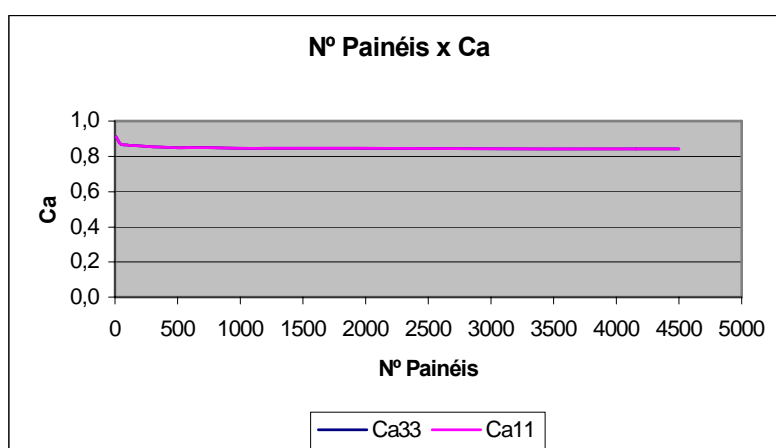


Figura 2.3.1.14: Variação do Ca com o nº de painéis.

Pela Tabela 2.3.1.5 observa-se a similaridade entre os coeficientes calculados. A Figura 2.3.1.14 mostra a variação do Ca com o número de painéis, convergindo acima de 300 painéis num coeficiente de massa adicional igual a 0,86. O valor de Ca para a razão $b/a = 0,8$, segundo Blevins (1979), Tabela 2.2.1.1, é equivalente ao obtido: 0,86.

➤ *High Order Panel*

O método de *High Order Panel* para a razão $b/a = 0,8$ foi processado no WAMIT de forma análoga aos demais casos anteriores.

Os resultados dos coeficientes de massa adicional em heave e em surge estão na Tabela 2.3.1.6.

Tabela 2.3.1.6: Resultados do WAMIT V6.211 para Ca_{33} e Ca_{11} .

Ordem	Nº Painéis	Ca_{33} ($p = 0$)	Ca_{11} ($p = \infty$)
3	324	0,87	0,87
4	464	0,86	0,86
5	628	0,86	0,86
6	816	0,86	0,86
7	1028	0,86	0,86
8	1264	0,86	0,86
9	1524	0,86	0,86
10	1808	0,86	0,86

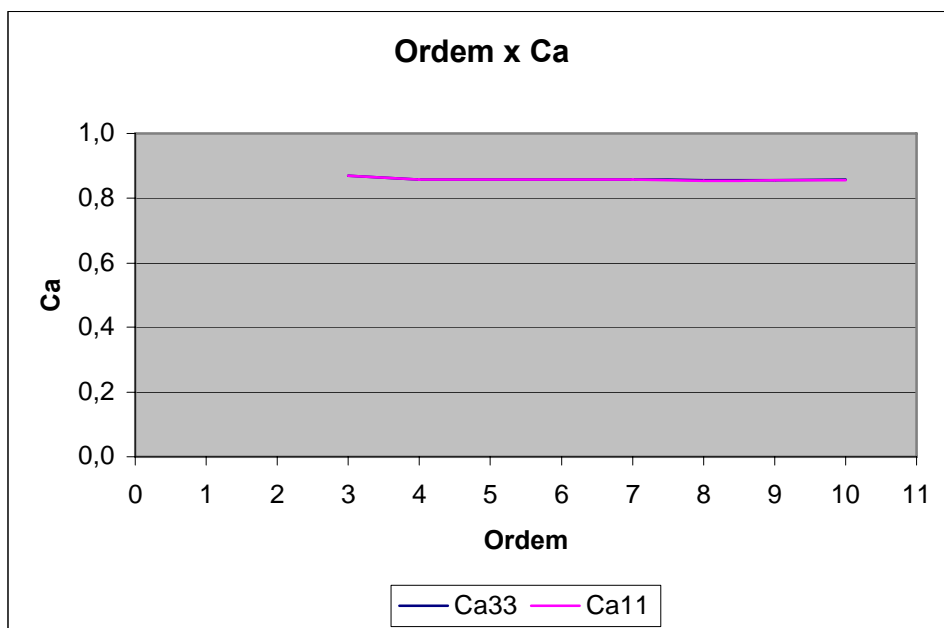


Figura 2.3.1.15: Variação do Ca com a ordem.

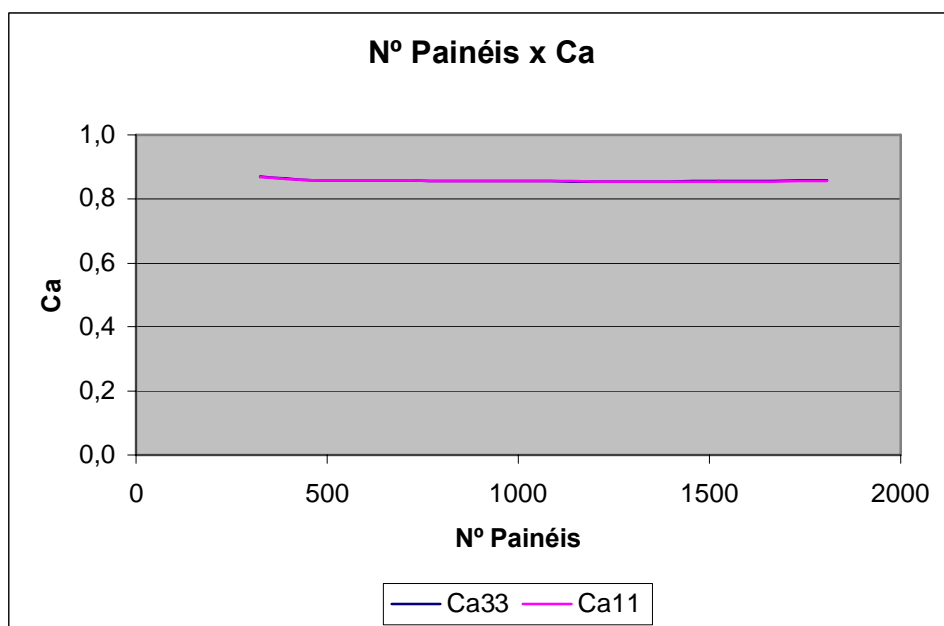


Figura 2.3.1.16: Variação do Ca com o nº de painéis.

Pela Tabela 2.3.1.6 é verificada a similaridade existente entre Ca_{33} , no período tendendo a zero, e Ca_{11} , no período tendendo a infinito. As Figuras 2.3.1.15 e 2.3.1.16 explicitam a equivalência entre os valores de Ca, ambos tendendo a uma constante. O valor de Ca aproximado é 0,86.

2.3.2 Cálculo do Ca de um Elipsóide pelo programa WAMIT V.6.211

Para o elipsóide, foram calculados através do WAMIT V6.211 os coeficientes de massa adicional de *surge*, *sway* e *pitch*, para comparação com Newman (1978).

O elipsóide foi modelado no WAMIT V6.211 com um comprimento $2a$ e diâmetro máximo $2b$. A razão b/a foi variada para a construção posterior de uma figura, na qual ficará explícito o comportamento dos coeficientes de massa adicional.

O método geométrico utilizado foi o *High Order Panel*, tendo em vista que a convergência deste é obtida de forma mais rápida e com maior exatidão.

2.3.2.1 Adimensionalização

A adimensionalização da massa adicional feita pelo programa WAMIT V6.211 é diferente da contida em Newman (1978). Então, para efeito de comparação entre ambos, é necessário utilizar no WAMIT V6.211 a mesma adimensionalização proposta por Newman (1978).

➤ Adimensionalização utilizada por Newman (1978)

$$Ca_{11} = \frac{m_{11}}{(4/3)\pi\rho ab^2} \quad (2.3.2.1.1)$$

$$Ca_{22} = \frac{m_{22}}{(4/3)\pi\rho ab^2} \quad (2.3.2.1.2)$$

$$Ca_{55} = \frac{m_{55}}{(4/15)\pi\rho ab^2(a^2 + b^2)} \quad (2.3.2.1.3)$$

➤ Adimensionalização do WAMIT V6.211

$$Ca_{ij} = \frac{m_{ij}}{\rho L^3} \quad (\text{Para } i = j = 1 \text{ ou } 2 \text{ ou } 3, \text{ ou seja, } surge, sway \text{ e } heave) \quad (2.3.2.1.4)$$

$$Ca_{ij} = \frac{m_{ij}}{\rho L^5} \quad (\text{Para } i = j = 4 \text{ ou } 5 \text{ ou } 6, \text{ ou seja, } roll, pitch \text{ e } yaw) \quad (2.3.2.1.5)$$

Onde m_{ij} é a massa adicional e L , o comprimento característico.

Para que a adimensionalização do WAMIT V6.211 seja igual a proposta por Newman (1978), iguala-se ambas de modo a definir a expressão a ser substituída no comprimento característico, L , da adimensionalização do WAMIT V6.211.

Igualando as adimensionalizações de Newman (1978) com WAMIT V6.211 para *surge* e *sway* tem-se:

$$\rho L^3 = (4/3)\pi\rho ab^2 \quad (2.3.2.1.6)$$

Logo:

$$L = \sqrt[3]{(4/3)\pi ab^2} \quad (2.3.2.1.7)$$

Da mesma forma, iguala-se as adimensionalizações para *pitch*:

$$\rho L^5 = (4/15)\pi\rho ab^2(a^2 + b^2) \quad (2.3.2.1.8)$$

Logo:

$$L = \sqrt[5]{(4/15)\pi ab^2(a^2 + b^2)} \quad (2.3.2.1.9)$$

2.3.2.2 Resultados

A Tabela 2.3.2.2.1 mostra os resultados de Ca_{11} , Ca_{22} e Ca_{55} obtidos pelo WAMIT V6.211 para as diferentes razões de b/a . A Figura 2.3.2.2.1 exibe a variação do Ca com as diferentes razões de b/a processadas pelo WAMIT V6.211.

Tabela 2.3.2.2.1: Resultados do WAMIT V6.211 para Ca_{11} , Ca_{22} e Ca_{55} .

a =	5	5	5	5	5	5	5
b =	1	2	3	4	5	6	7
b/a =	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
L (r,p,y) =	2,555	3,446	4,183	4,873	5,543	6,204	6,859
L (s,s,h) =	2,756	4,375	5,733	6,945	8,059	9,100	10,085
Ca_{55} =	0,700	0,365	0,144	0,031	0,000	0,023	0,079
Ca_{11} =	0,059	0,156	0,266	0,381	0,500	0,621	0,744
Ca_{22} =	0,895	0,762	0,653	0,568	0,500	0,446	0,402

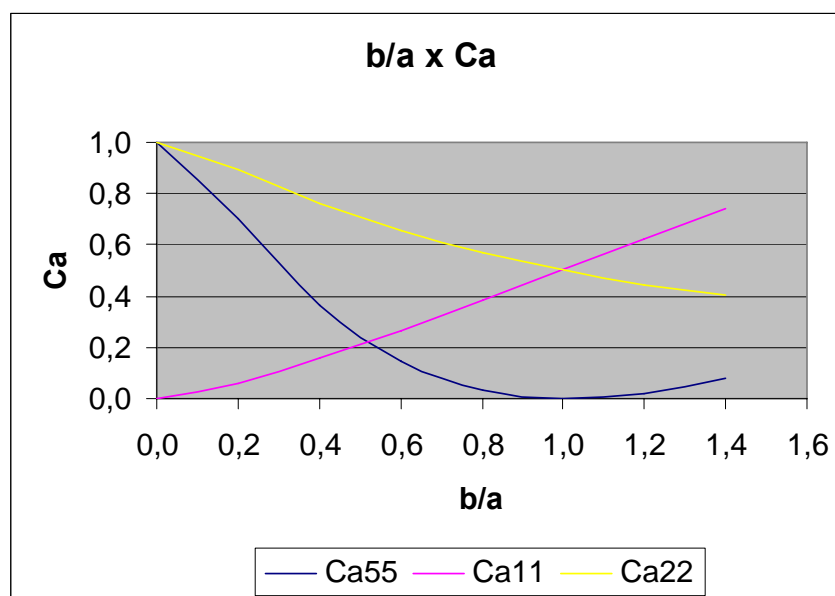


Figura 2.3.2.2.1: Variação do Ca com a razão b/a , obtida do WAMIT V6.211.

A Figura 2.3.2.2.2 a seguir apresenta as curvas de Ca_{11} , Ca_{22} e Ca_{55} para um elipsóide segundo Newman (1978).

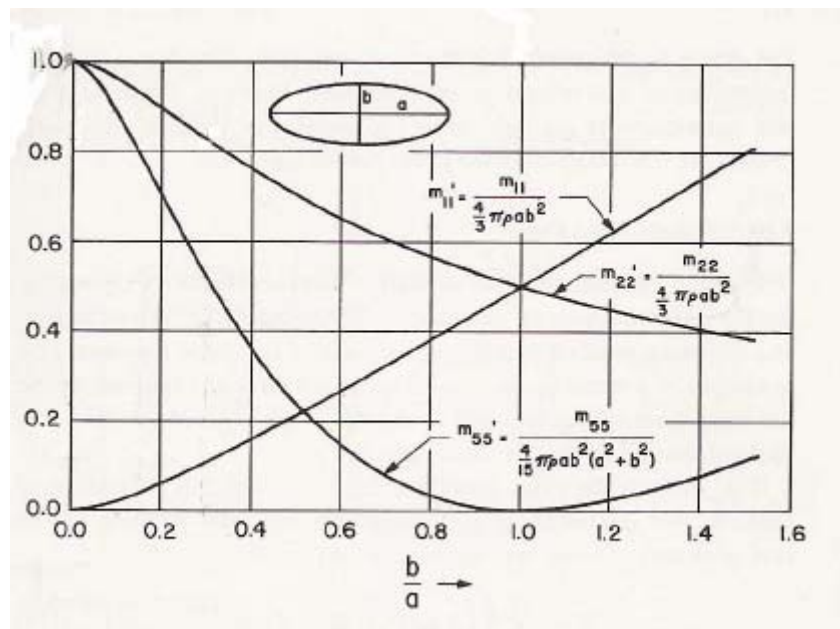


Figura 2.3.2.2.2: Ca para um elipsóide dado por Newman (1978).

Comparando-se as Figuras 2.3.2.2.1 e 2.3.2.2.2 verifica-se que as curvas de Ca_{11} , Ca_{22} e Ca_{55} do WAMIT V6.211 coincidem com as apresentadas por Newman (1978), confirmando-se assim a eficácia dos cálculos realizados pelo método aqui proposto.

2.3.3 Cálculo do Ca de uma Caixa (*Manifold*) pelo programa WAMIT V6.211

Após a validação do método, processou-se o caso de uma caixa com as dimensões da envoltória do *manifold*. O método de cálculo utilizado foi *High Order Panel*, com ordem igual a 4.

Dimensões da caixa:

$$L = 16,635 \text{ m}$$

$$B = 8,500 \text{ m}$$

$$H = 5,149 \text{ m}$$

A adimensionalização utilizada para *surge*, *sway* e *heave* é:

$$Ca_{ij} = \frac{m_{ij}}{\rho LBH} \quad (2.3.3.1)$$

Para *roll*, *pitch* e *yaw* é utilizada a inércia do volume deslocado:

$$Ca_{ij} = \frac{m_{ij}}{(V/12)(B^2 + H^2)} \quad (2.3.3.2)$$

Onde V é o volume da caixa envoltória.

Os resultados obtidos através do WAMIT V6.211 para os coeficientes de massa adicional são apresentados na Tabela 2.3.3.1.

Tabela 2.3.3.1: Resultados do Ca para a caixa (*Manifold*).

Ca₁₁	Ca₂₂	Ca₃₃	Ca₄₄	Ca₅₅	Ca₆₆
1,24	1,64	2,15	0,31	0,32	0,42

Nota-se a importância dos coeficientes de massa adicional de rotação: Ca₄₄, Ca₅₅ e Ca₆₆. É a primeira vez que isto é feito, tendo-se assim valores bem próximos da realidade para os coeficientes de rotação. Em softwares comerciais, costuma-se utilizar as propriedades do elipsóide para obtenção destes coeficientes, porém com o método aqui apresentado isso deixa de ser necessário.

2.3.4 Efeito da Porosidade

Para estudo da porosidade no *manifold*, que ocorre devido as aberturas laterais, foi desenvolvida uma sub-rotina interna ao programa WAMIT V6.211, considerando uma caixa com cilindro circular interno, chamada de *moonpool* circular, Figura 2.3.4.1, localizado no seu centro. Na sub-rotina de *moonpool* circular criada, entra-se com as

dimensões da caixa e o diâmetro do cilindro interno. A *moonpool* circular é modelada pelo WAMIT V6.211 no eixo horizontal Y.

Deseja-se obter uma caixa com o *moonpool* circular (MPC) na horizontal e com as dimensões do *manifold*:

$$L = 16,635 \text{ m} ; B = 8,500 \text{ m} ; H = 5,149 \text{ m}$$

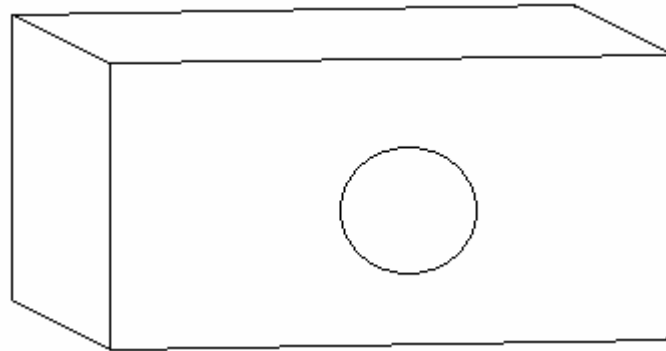


Figura 2.3.4.1: Ilustração da *moonpool* circular.

Foram processados 12 casos variando-se o diâmetro em relação à porcentagem de área total (de 1% a 40%). A Figura 2.3.4.2 mostra a variação dos coeficientes de massa adicional com a porcentagem de porosidade (área da *moonpool* circular em relação a área total).

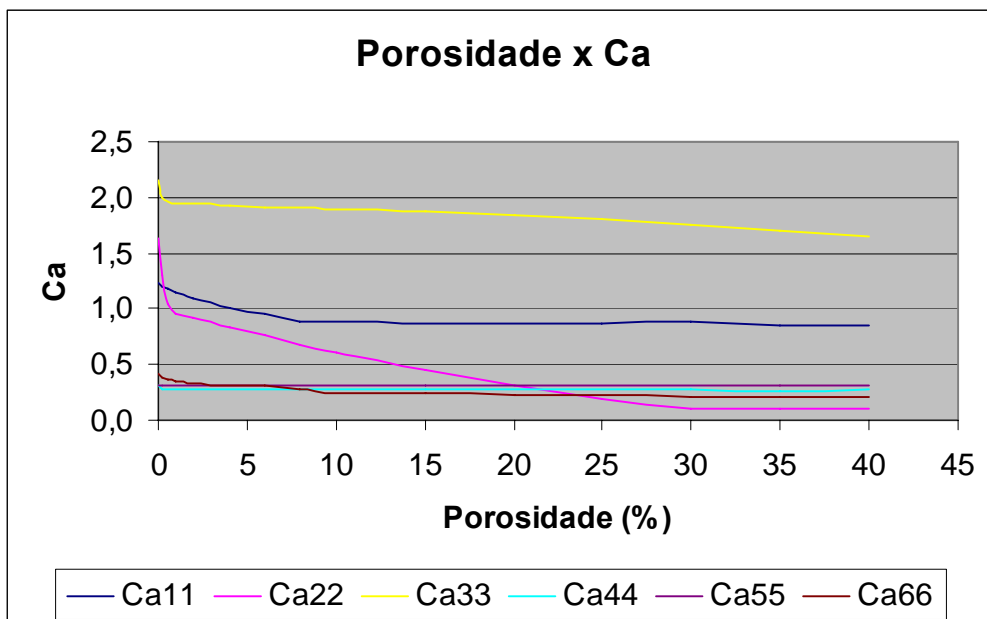


Figura 2.3.4.2: Variação do Ca com a porosidade.

Analisando a Figura 2.3.4.2, observa-se que os coeficientes de massa adicional decrescem com o aumento da porosidade, área da *moonpool* circular. Os coeficientes Ca_{11} (*surge*), Ca_{22} (*sway*) e Ca_{33} (*heave*) apresentam uma diminuição mais significativa enquanto que os coeficientes de massa adicional de rotação, Ca_{44} (*roll*), Ca_{55} (*pitch*) e Ca_{66} (*yaw*) não sofrem muita variação.

A Figura 2.3.4.3 apresenta um zoom na região de início de porosidade, de 0 a 1%.

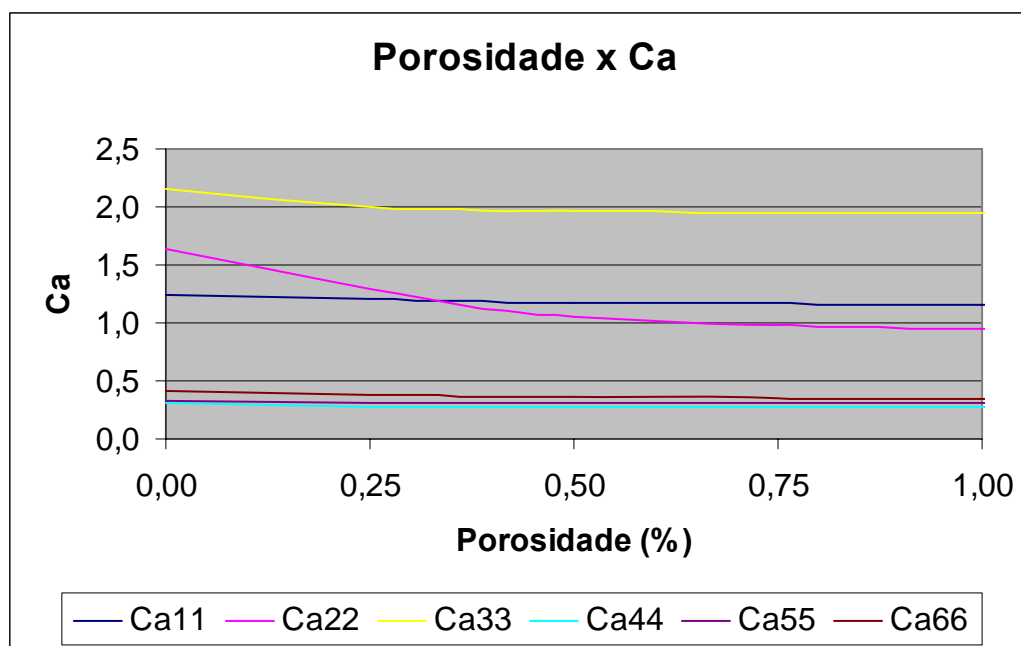


Figura 2.3.4.3: Zoom no início do acréscimo de porosidade, até 1%.

Comparando-se a Figura 2.3.4.3 com a Tabela 2.3.3.1, caso sem porosidade, nota-se que no início do acréscimo de porosidade a única queda acentuada é do Ca_{22} , de 1,64, sem porosidade, até 1,00, com 1% de porosidade. Esta queda já era esperada, já que o cilindro interno está posicionado horizontalmente ao longo do eixo Y, tendo este portanto maior efeito de porosidade.

2.4 Obtenção da Massa Adicional Através de Ensaio de Reboque com Aceleração Uniforme

Objetivando a determinação dos coeficientes de massa adicional do *manifold* foram realizados ensaios de reboque com aceleração uniforme no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT.

Este tipo de ensaio, proposto por Fernandes (2005), consiste em uma nova metodologia. Essa metodologia aproveita a capacidade do carro do IPT em impor uma velocidade uniformemente variada, permitindo a estimativa da massa adicional do objeto rebocado. Inicialmente foi feita uma calibração do aparato do ensaio de arrasto através de uma esfera pois o coeficiente de massa adicional desta é bem conhecido, $C_a = 0,5$, White (1999).

2.4.1 Ensaio com Aceleração Uniforme para Estimativa da Massa Adicional da Esfera

No ensaio de reboque com aceleração uniforme da esfera, esta é rebocada ao longo do tanque de provas enquanto uma célula de carga acoplada mede a força de resistência ao reboque, durante cada corrida, a uma determinada velocidade. Foram impostas três velocidades finais (após a imposição de aceleração): 0,5 m/s, 1 m/s e 2 m/s. A Figura 2.4.1.1 apresenta um exemplo da velocidade medida nos ensaios para uma velocidade final de 1 m/s.

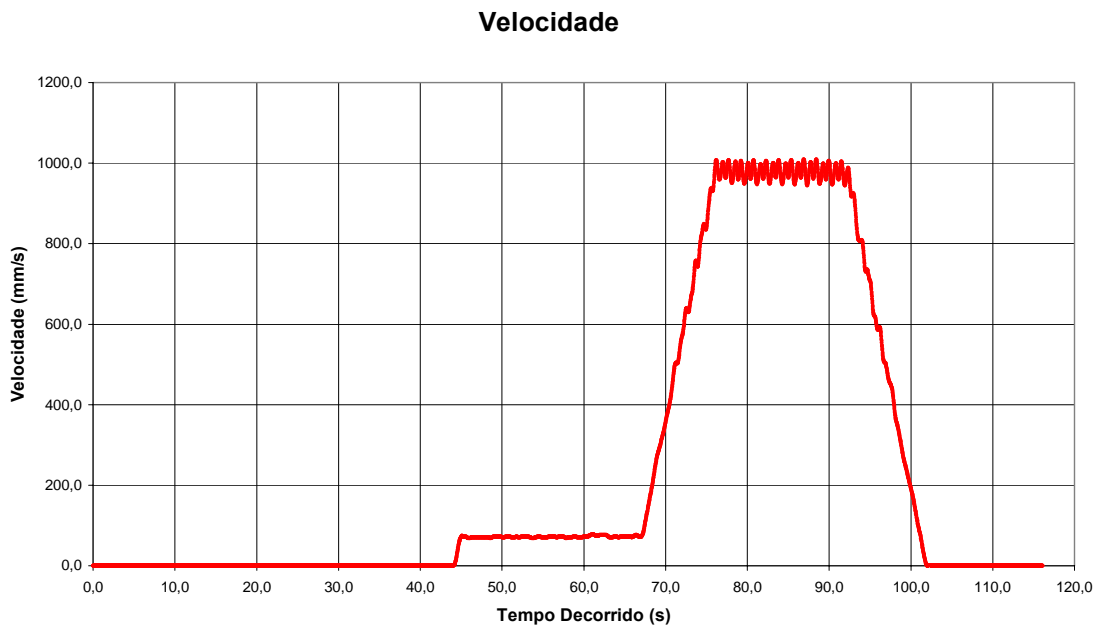


Figura 2.4.1.1: Exemplo da história temporal da velocidade da esfera, com patamar de 1 m/s, medida ao logo do reboque no tanque de provas.

Para cada uma das 3 velocidades finais, foram impostas 5 acelerações constantes de 0,01g, 0,02g, 0,03g, 0,04g e 0,05g.

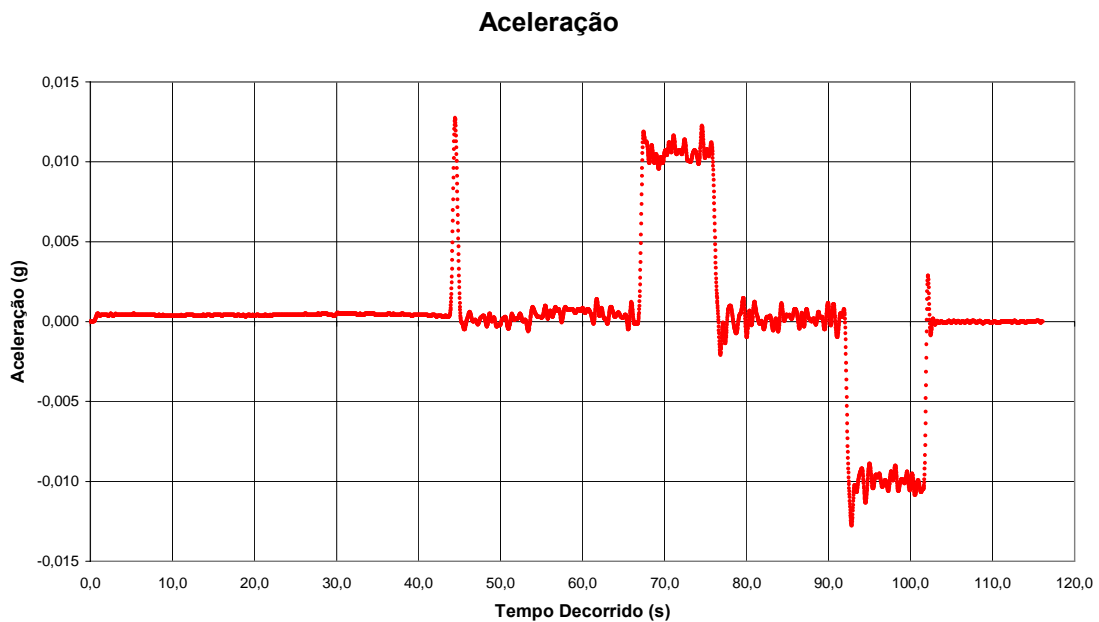


Figura 2.4.1.2: Registro típico de aceleração, (0,01g), dos ensaios com a esfera.

A matriz dos ensaios realizados com esfera pode ser vista na Tabela 2.4.1.1. Totalizaram-se 15 ensaios.

Tabela 2.4.1.1: Matriz de ensaios de reboque com aceleração uniforme da esfera.

Grupo	V inicial (m/s)	V final (m/s)	Patamar (s)	Aceleração do carro em g					Patamar (s)
				0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	
A	0,1	1	15	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	15
B	0,1	0,5	15	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	15
C	0,1	2	15	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	15

Os 3 grupos de ensaios referidos a seguir A, B e C, correspondem às velocidades finais 1m/s, 0,5m/s e 2m/s respectivamente.

Os coeficientes de massa adicional são obtidos através das amplitudes de força e aceleração retiradas dos ensaios. No cálculo da massa adicional da esfera, é levada em consideração a haste que foi acoplada à esfera.

Os resultados dos registros temporais da força foram divididos em 4 regiões, Figura 2.4.1.3, que são respectivamente:

Região 1: Aceleração inicial;

Região 2: Entrada no patamar de velocidade constante;

Região 3: Saída do patamar de velocidade constante;

Região 4: Desaceleração até parada total.

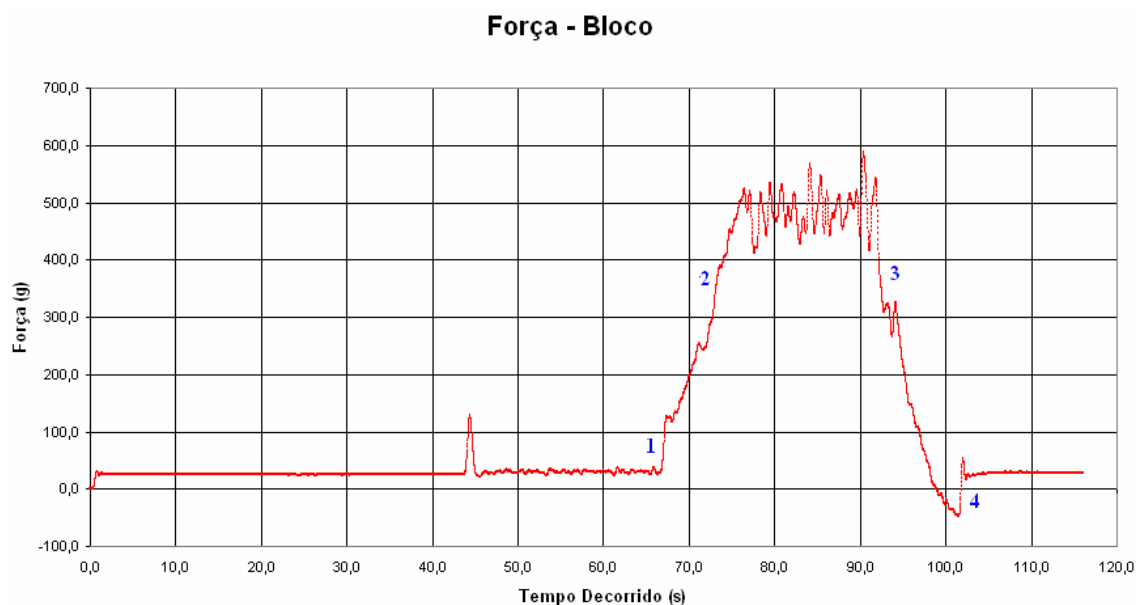


Figura 2.4.1.3: Registro temporal de ensaio típico da força; regiões com descontinuidade nas acelerações consideradas nos ensaios para obtenção da massa adicional.

Analisando a Figura 2.4.1.3, a região de maior interesse para a estimativa da massa adicional é a região 1, onde ocorre a aceleração inicial até atingir um primeiro pico, devido a maior clareza nas medições. A região 4 também é clara, porém esta sofre efeito de memória: devido a desaceleração do corpo até que ocorra a parada, há um aumento da incidência do fluido sobre o corpo, formando uma esteira viscosa, sendo esta maior na região 4.

Os coeficientes de massa adicional são calculados pelos valores de amplitude de força e aceleração. Os valores de amplitude de força no modelo, X_A , aceleração do modelo, a , amplitude da força na haste, X_{AH} , e aceleração da haste, a_H , foram retirados dos registros temporais de força e aceleração dos ensaios. No caso da força e da aceleração na haste, foram realizados ensaios de reboque apenas com a haste para posterior subtração na massa adicional da esfera.

A massa adicional e o coeficiente de massa adicional da esfera são obtidos pelas Equações (2.4.1.1) e (2.4.1.2).

$$M_{aE} = X_A/a - X_{AH}/a_H - m_{E+H} \quad (2.4.1.1)$$

$$Ca = M_{aE} / (\rho V) \quad (2.4.1.2)$$

Onde M_{aE} e V são a massa adicional e o volume da esfera respectivamente; m_{E+H} é a massa da esfera com a haste.

➤ Região 1

Para melhor visualização dos ensaios, fez-se uma sobreposição dos registros da força da esfera em função do tempo para cada variação de velocidade final. Deste modo, foram obtidas as Figuras 2.4.1.4, 2.4.1.6 e 2.4.1.8, com cinco ensaios cada, que correspondem as 5 variações da aceleração. Os registros contendo apenas a força na haste também foram sobrepostos, Figuras 2.4.1.5, 2.4.1.7 e 2.4.1.9.

➤ Grupo de Ensaios A: $V_{\text{final}} = 1 \text{ m/s}$

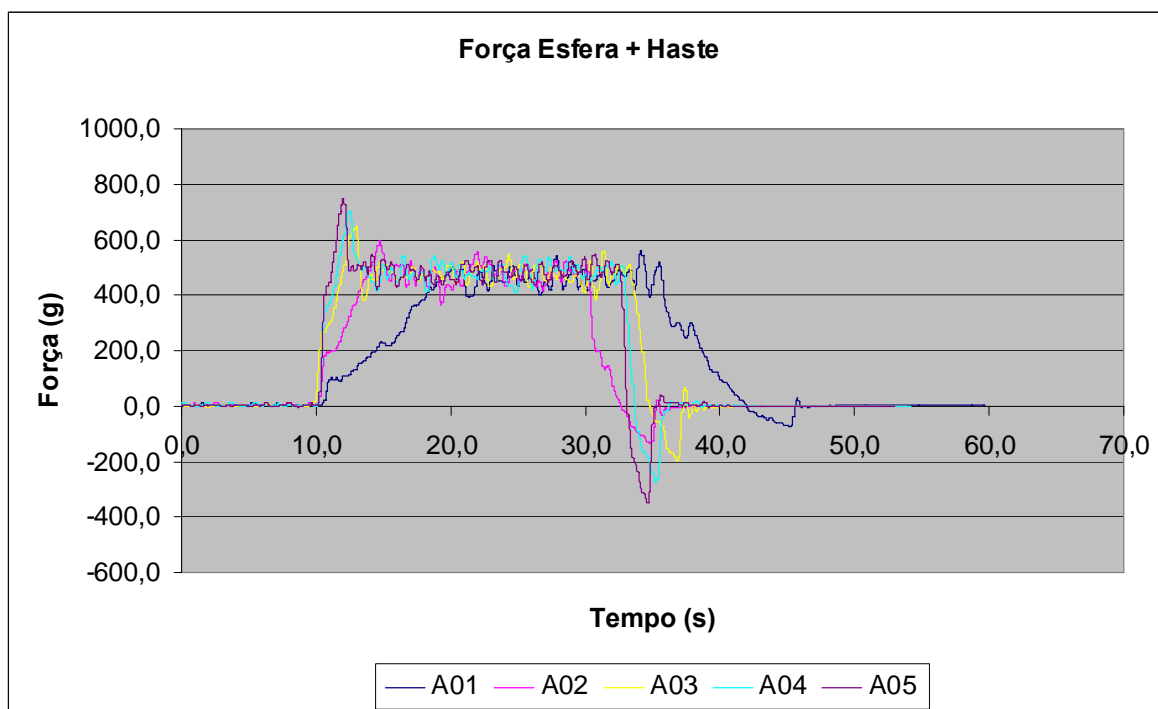


Figura 2.4.1.4a: Sobreposição do grupo de ensaios A com variação da aceleração de 0,1g a 0,5g para $V_{\text{final}} = 1 \text{ m/s}$.

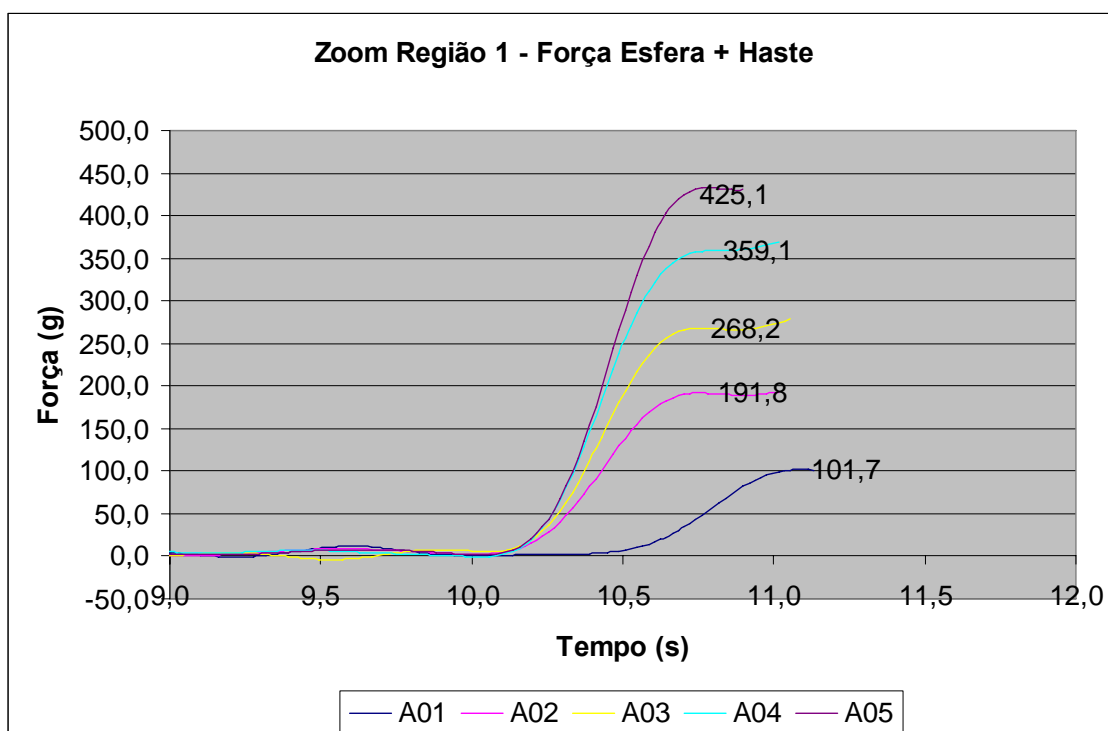


Figura 2.4.1.4b: Zoom da sobreposição da força da esfera com a haste do grupo de ensaios A.

Da superposição, a partir do início da Região 1, Figuras 2.4.1.4a e 2.4.1.4b, fica notável a variação da força conforme se aumenta o valor da aceleração. A superposição ocorre no início da região 1 e está é apresentada em zoom na Figura 2.4.1.4b.

Na Figura 2.4.1.5a, verifica-se a superposição dos ensaios com $V_{\text{final}} = 1\text{m/s}$ para a força na haste. Novamente, observa-se a “escada” que se forma no ponto de sobreposição. A Figura 2.4.1.5b apresenta um zoom na região 1, evidenciando as diferenças das curvas conforme o aumento da aceleração.

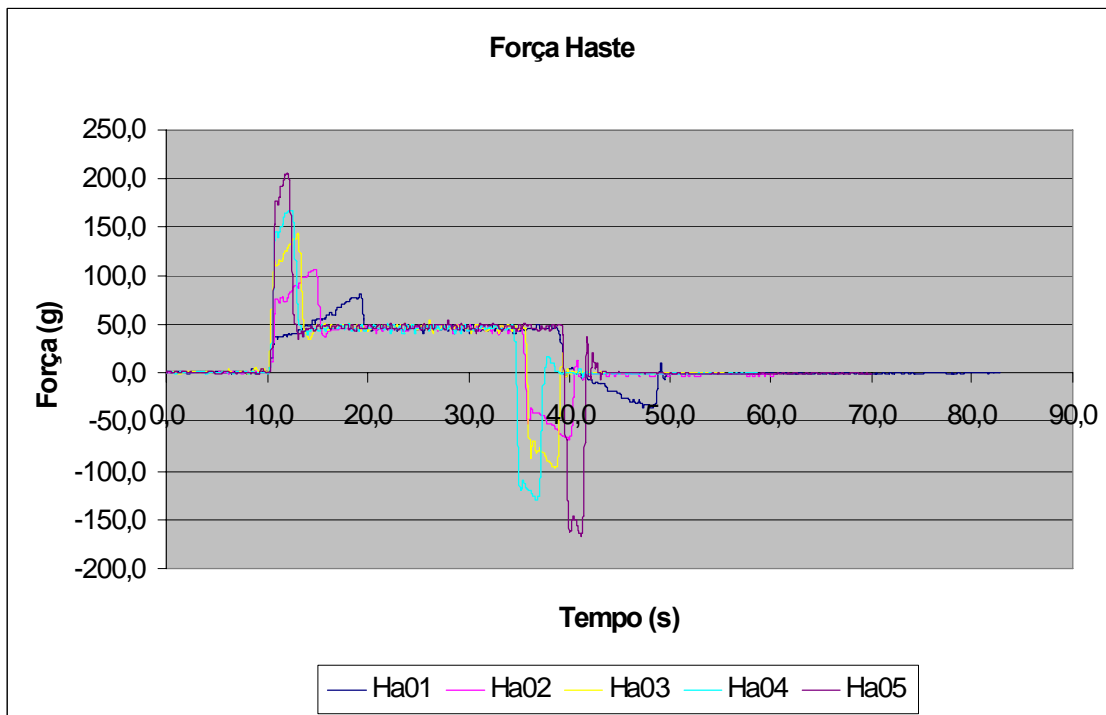


Figura 2.4.1.5a: Sobreposição dos ensaios mostrando apenas a força na haste.

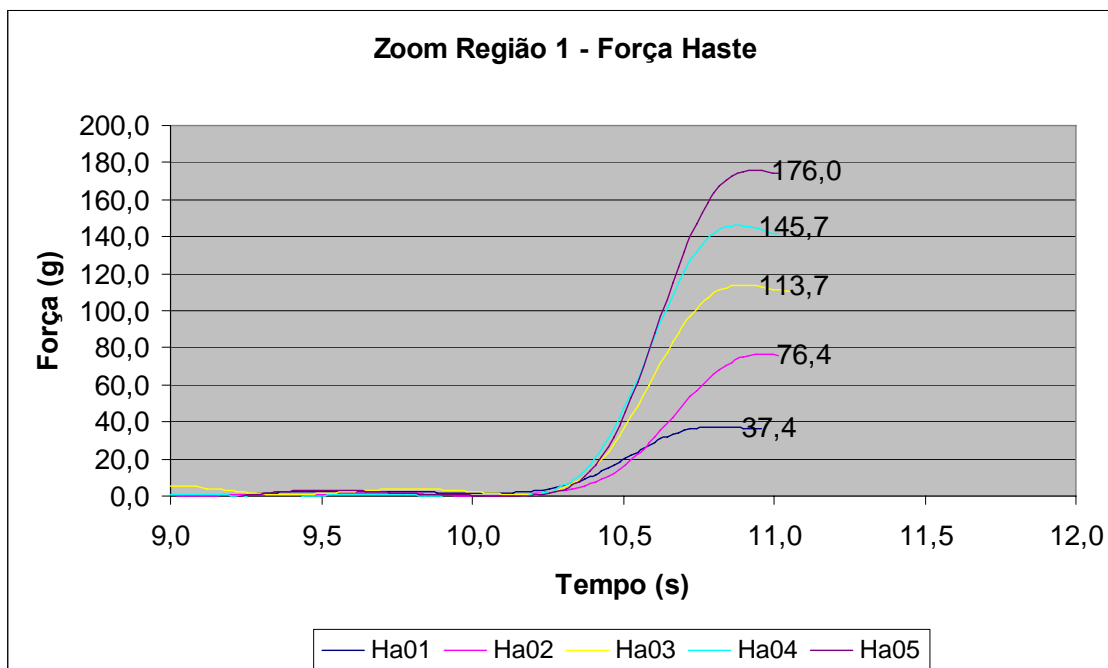


Figura 2.4.1.5b: Zoom da sobreposição da força na haste do grupo de ensaios A.

➤ Grupo de Ensaios B: $V_{\text{final}} = 0,5 \text{ m/s}$

Para o grupo de ensaios B, com $V_{\text{final}} = 0,5 \text{ m/s}$, a superposição na região 1 está mostrada na Figura 2.4.1.6a, também com diferenças significativas e consistentes conforme a aceleração imposta. A Figura 2.4.1.6b exibe um zoom na região 1 considerada na análise. Na Figura 2.4.1.7a tem-se a superposição para a haste e a Figura 2.4.1.7b mostra um zoom somente na região 1 analisada.

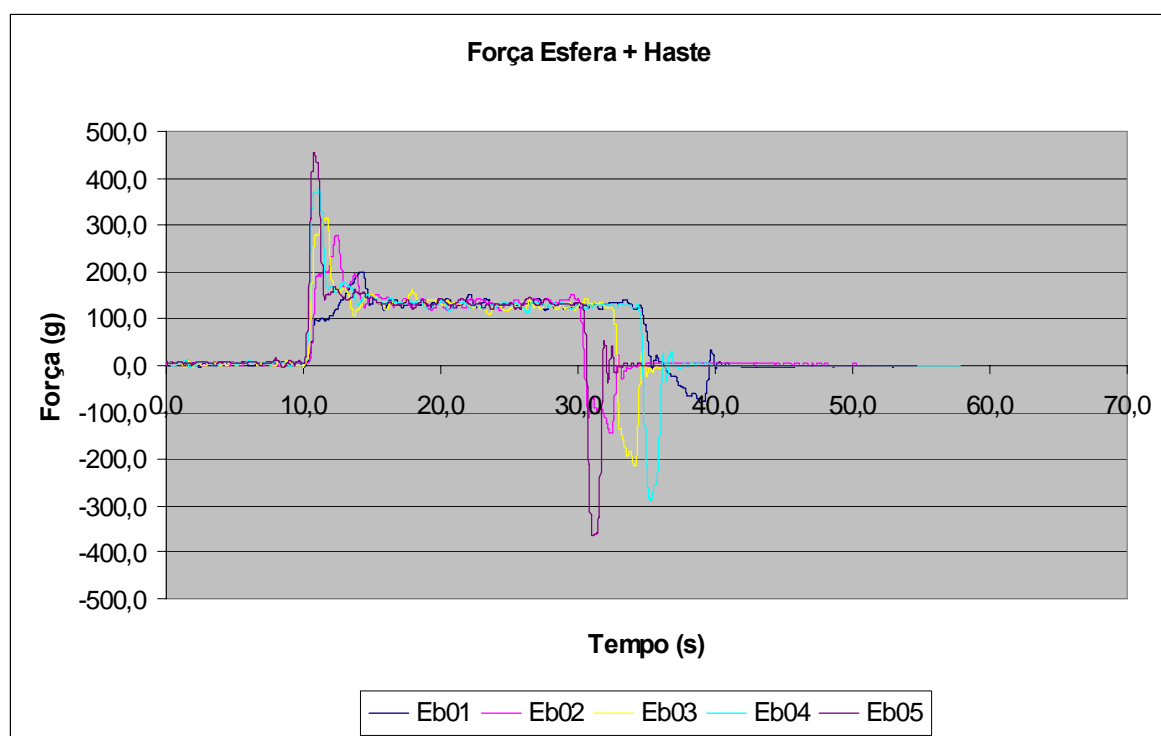


Figura 2.4.1.6a: Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 0,5 \text{ m/s}$.

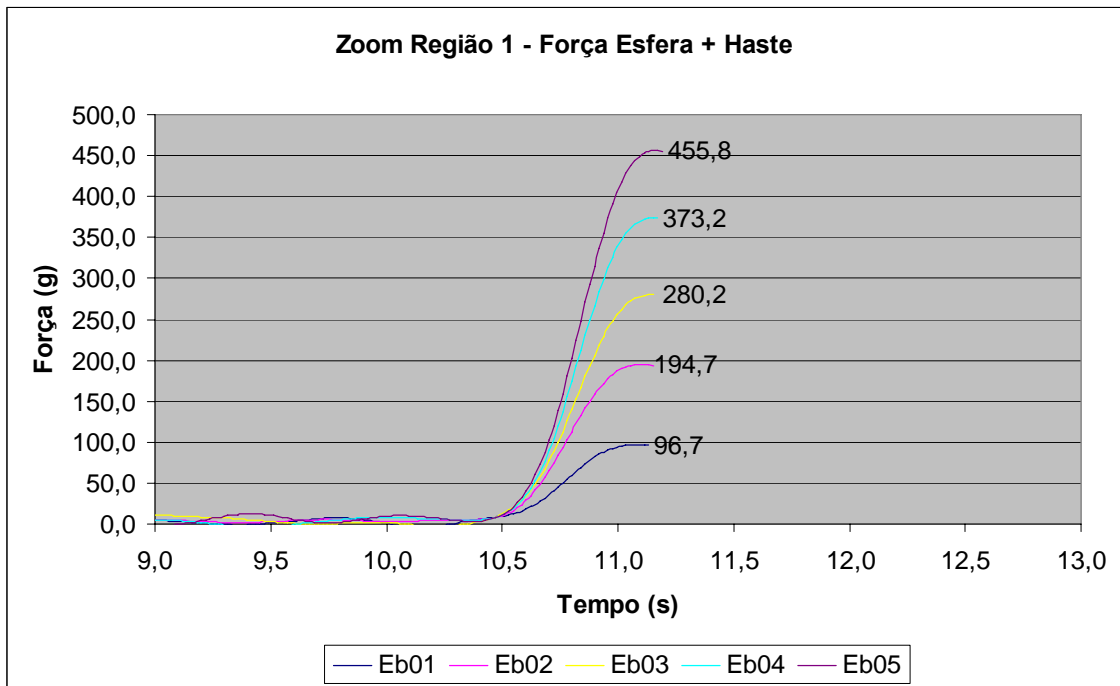


Figura 2.4.1.6b: Zoom da sobreposição da força dos ensaios do grupo B, região 1.

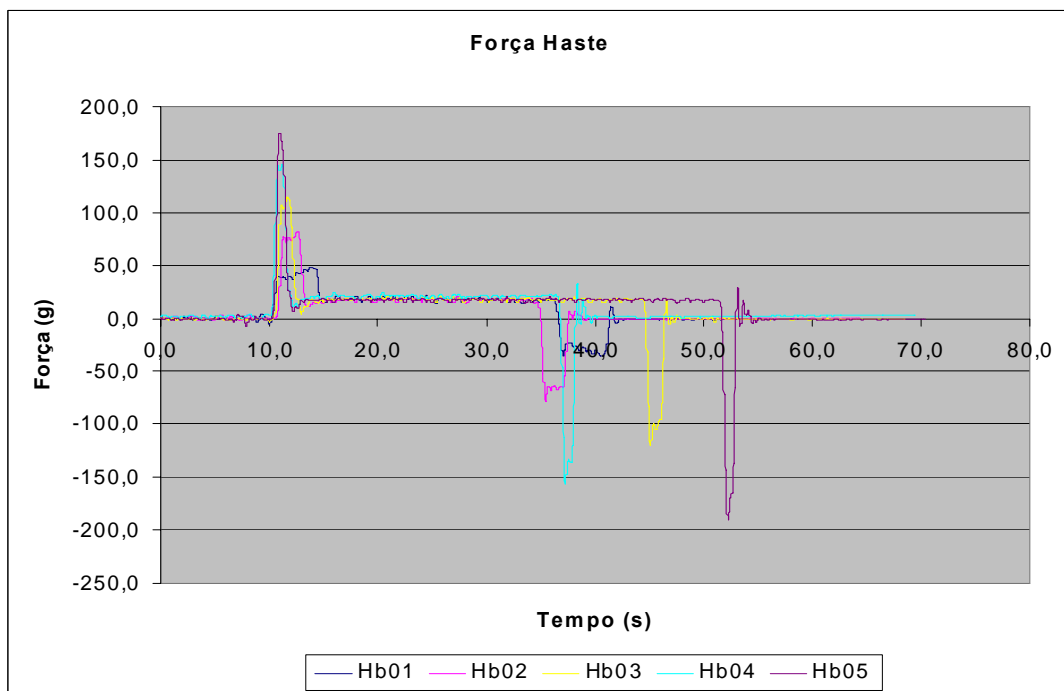


Figura 2.4.1.7a: Sobreposição dos ensaios, considerando apenas a variação da força na haste para $V_{\text{final}} = 0,5\text{m/s}$.

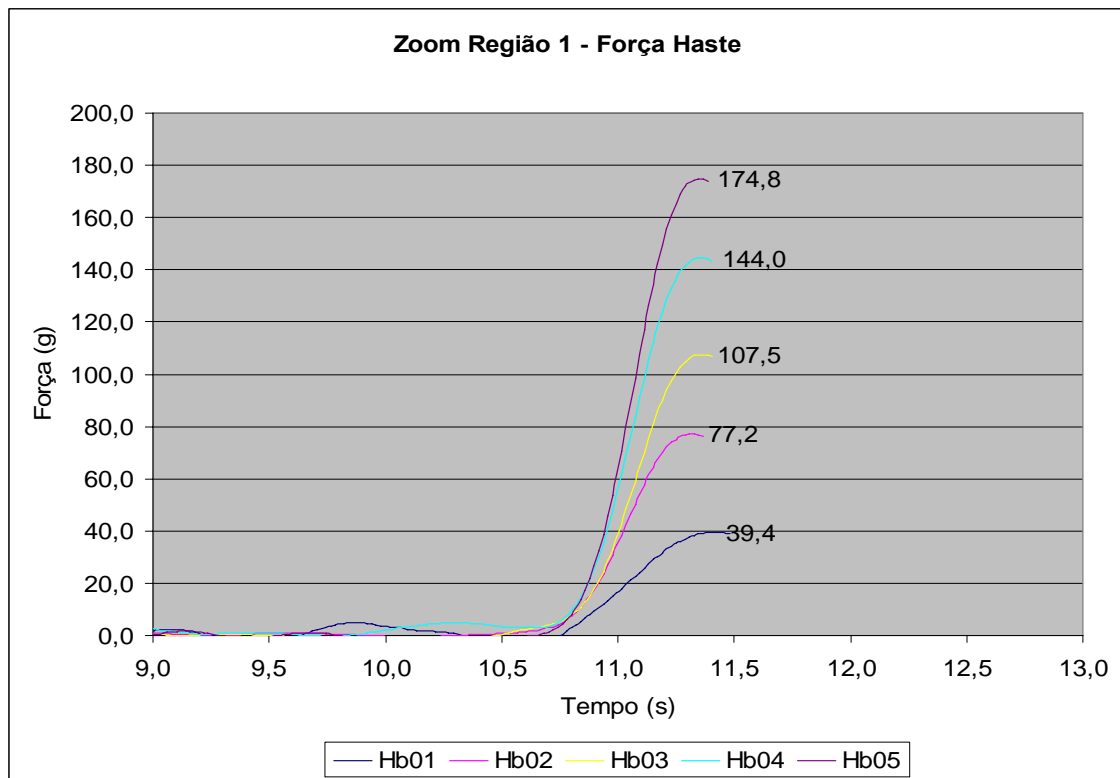


Figura 2.4.1.7b: Zoom da sobreposição da força na haste dos ensaios do grupo B, região 1.

➤ Grupo de Ensaio C: $V_{\text{final}} = 2 \text{ m/s}$

No grupo de ensaios C, com $V_{\text{final}} = 2 \text{ m/s}$, a superposição na região 1 é apresentada na Figura 2.4.1.8a. Novamente percebe-se a consistência, Figura 2.4.1.8b. A Figura 2.4.1.9a apresenta a superposição para a força na haste enquanto que a Figura 2.4.1.9b mostra um zoom na região 1.

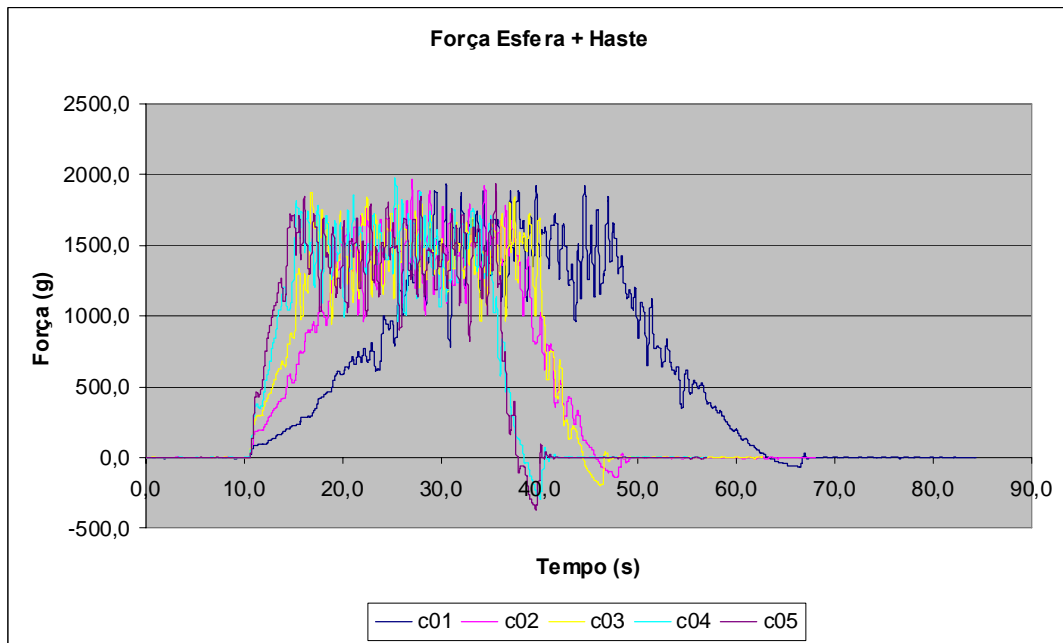


Figura 2.4.1.8a: Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 2\text{m/s}$.

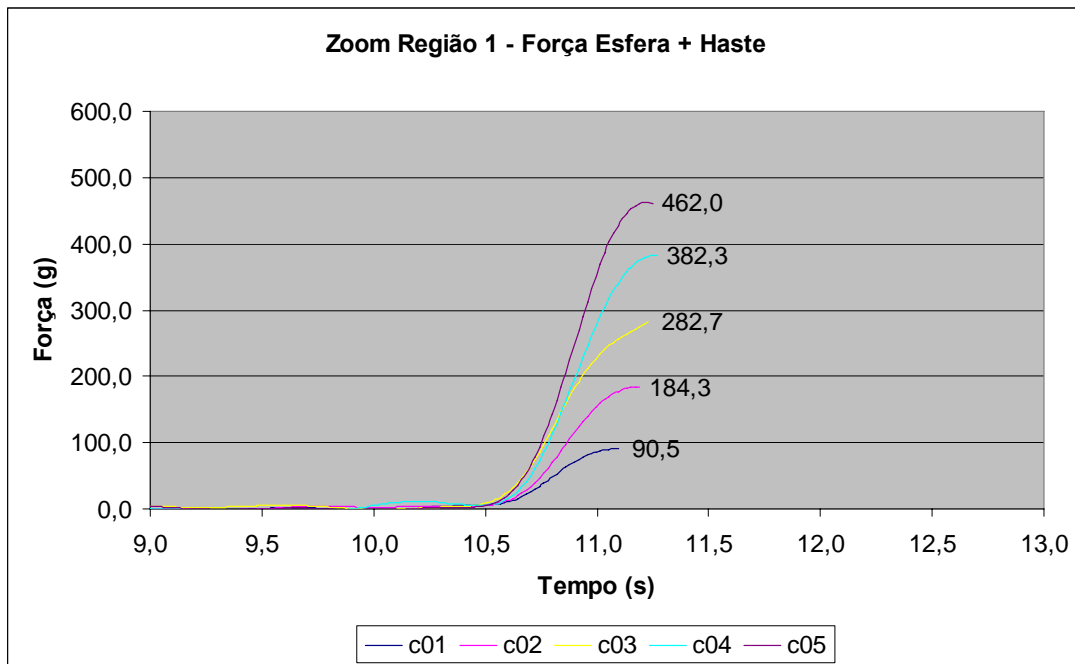


Figura 2.4.1.8b: Zoom da região 1, grupo de ensaios C.

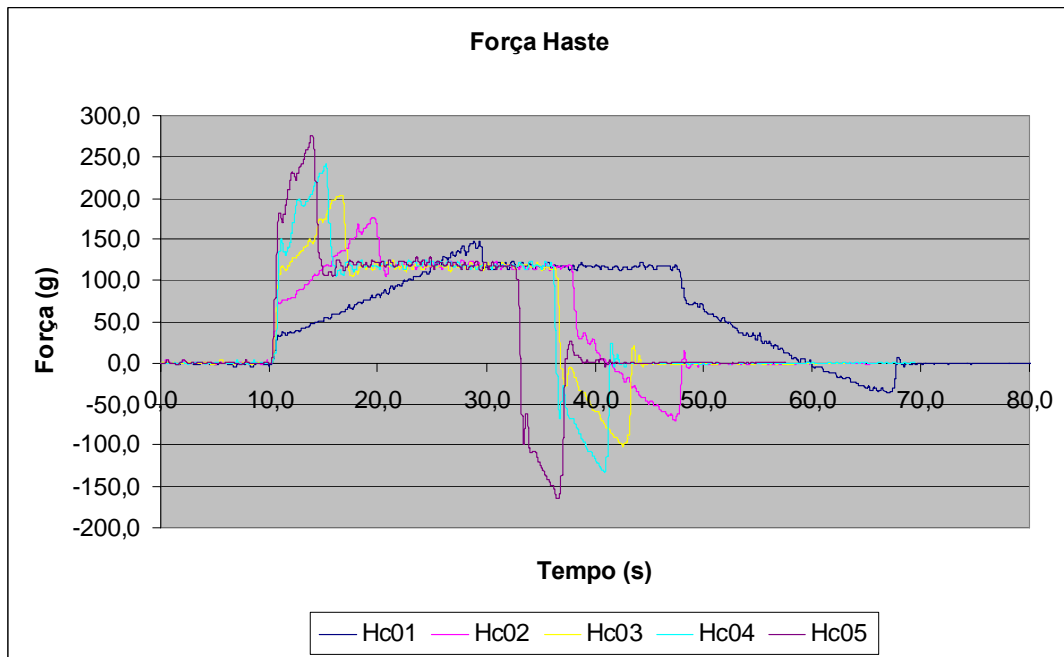


Figura 2.4.1.9a: Sobreposição dos ensaios mostrando a força da haste para $V_{\text{final}} = 2\text{m/s}$.

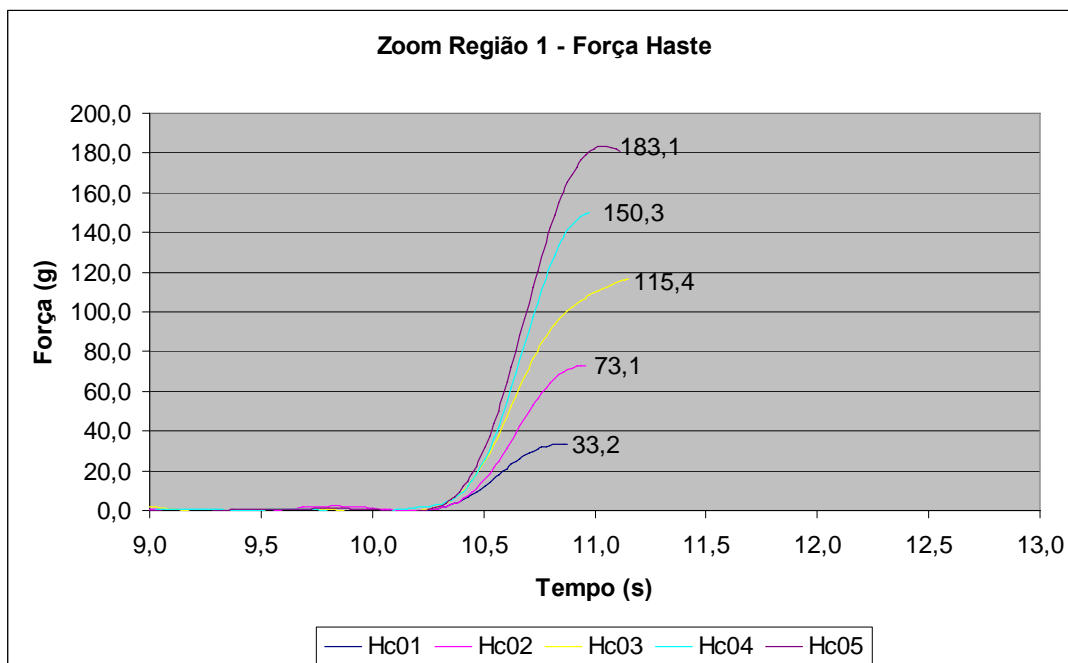


Figura 2.4.1.9b: Zoom na sobreposição da força na haste, grupo de ensaios C, região 1.

Os resultados da massa adicional da esfera, bem como as amplitudes de força e aceleração utilizadas para o cálculo estão presentes na Tabela 2.4.1.2.

Tabela 2.4.1.2: Massa adicional da esfera a partir da análise da Região 1.

Região 1					
Ensaio	X_a (g)	a (1/g)	X_{AH} (g)	a_H (1/g)	ma_E (kg)
a01	101,65633	0,01121	37,37490	0,01174	1,07326
a02	191,78601	0,02297	76,38002	0,02328	1,07513
a03	268,18601	0,02267	113,66998	0,03280	1,07087
a04	359,06913	0,04375	145,67295	0,04398	1,06113
a05	425,06780	0,05166	176,00318	0,05285	1,05645
b01	96,69010	0,01109	39,43534	0,01162	1,08756
b02	194,73714	0,02297	77,19620	0,02323	1,01649
b03	280,18326	0,03327	107,53760	0,03261	1,00684
b04	373,23167	0,04277	144,02187	0,04254	1,00396
b05	455,84767	0,05393	174,76218	0,05087	1,00631
c01	90,52035	0,01079	33,21424	0,01054	1,07117
c02	184,28020	0,02096	73,10002	0,02039	1,08089
c03	282,68189	0,03309	115,41534	0,03157	1,09079
c04	382,34106	0,04260	150,32403	0,04426	1,05692
c05	462,01609	0,05191	183,11766	0,04910	1,05641

O valor esperado para a massa adicional da esfera pode ser calculado para efeito de comparação e validação dos resultados encontrados:

$$Ma_E = \rho Ca(4/3)\pi R^3 \quad (2.4.1.3)$$

O raio da esfera é igual a 0,08m e fazendo o coeficiente de massa adicional igual a 0,5, White (1999), obtém-se para a massa adicional:

$$Ma_E = 1000 \times 0,5 \times (4/3) \times \pi \times 0,08^3 = 1,072 \quad (2.4.1.4)$$

A Figura 2.4.1.10 mostra a comparação dos resultados experimentais e o teórico (Ca = 0,5).

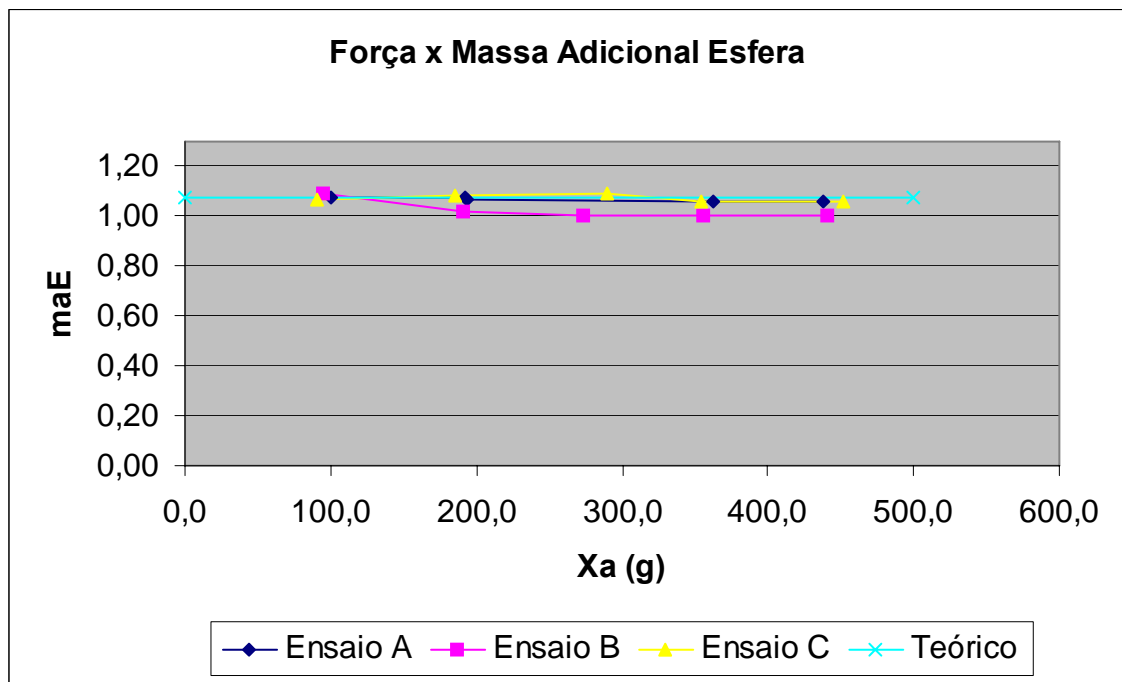


Figura 2.4.1.10: Resultados das massas adicionais calculadas pelos ensaios e o valor teórico ($C_a=0,5$).

Pelo Figura 2.4.1.10, nota-se que os ensaios A e C , com velocidades finais de 1,0m/s e 2,0m/s, se aproximam bem do resultado teórico desejado. Os resultados de massa adicional do ensaio B ficaram um pouco abaixo do teórico, o que pode se justificar pela velocidade, $V_{final} = 0,5$ m/s, ser ainda baixa para o desenvolvimento completo do escoamento, confundindo assim a caracterização do degrau devido à inércia do fluido (efeito de massa adicional).

➤ Região 4

Os resultados dos ensaios também foram sobrepostos para a região 4, da desaceleração até a parada. Caso o corpo não fosse simétrico, um valor diferente da massa adicional seria esperado. Nesta região ocorre efeito de memória pois o corpo desacelera e recebe toda a esteira viscosa do fluido.

As Figuras 2.4.1.11a e 2.4.1.12a exibem a superposição dos ensaios para a força da esfera com a haste e somente a força da haste, respectivamente. O zoom na região 4, para visualização dos valores máximos de força na esfera com a haste e

somente na haste são apresentados nas Figuras 2.4.1.11b e 2.4.1.12b. Nota-se porém, que para a obtenção da massa adicional deve-se coletar o valor da amplitude e não o valor máximo, ou seja, para a região 4, deve-se ainda somar a continuação deste pico acima do zero no eixo X.

➤ Grupo de Ensaios A: $V_{\text{final}} = 1 \text{ m/s}$

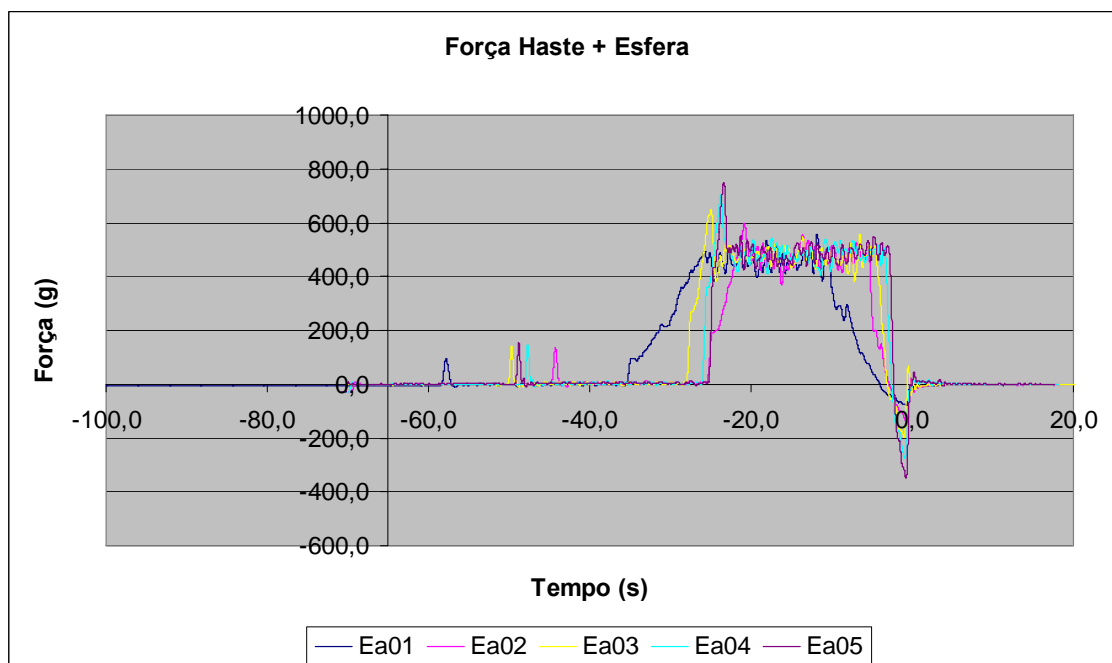


Figura 2.4.1.11a: Sobreposição do grupo de ensaios A com variação da aceleração de 0,1g a 0,5g para $V_{\text{final}} = 1 \text{ m/s}$, região 4.

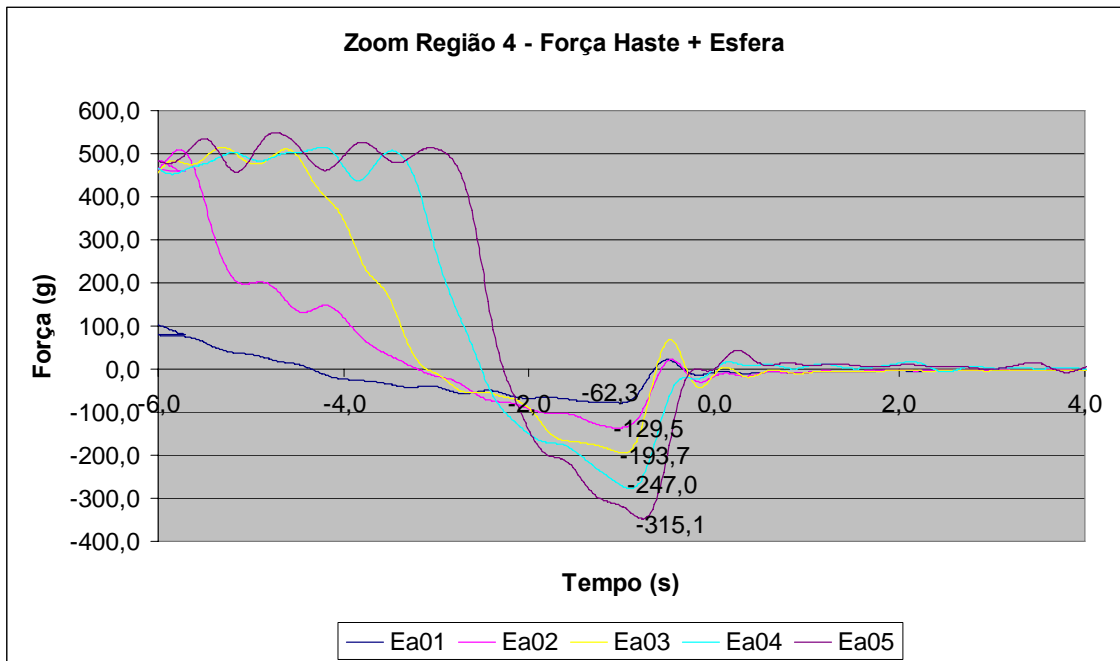


Figura 2.4.1.11b: Zoom na região 4 da sobreposição dos ensaios do grupo A.

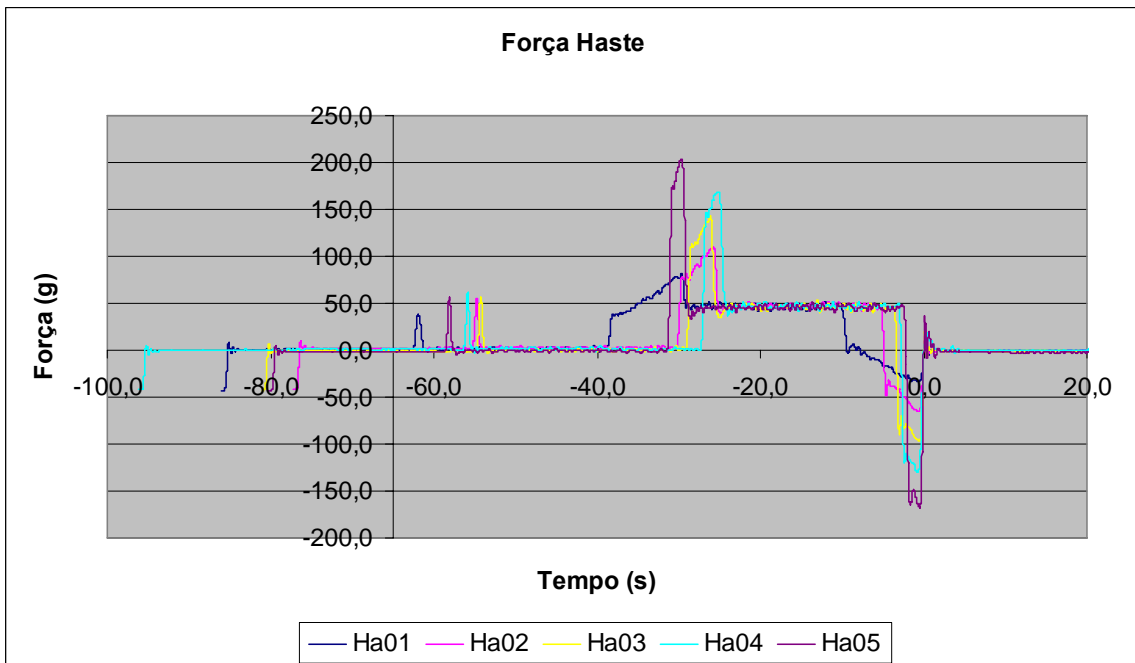


Figura 2.4.1.12a: Sobreposição dos ensaios mostrando apenas a força na haste, região 4.

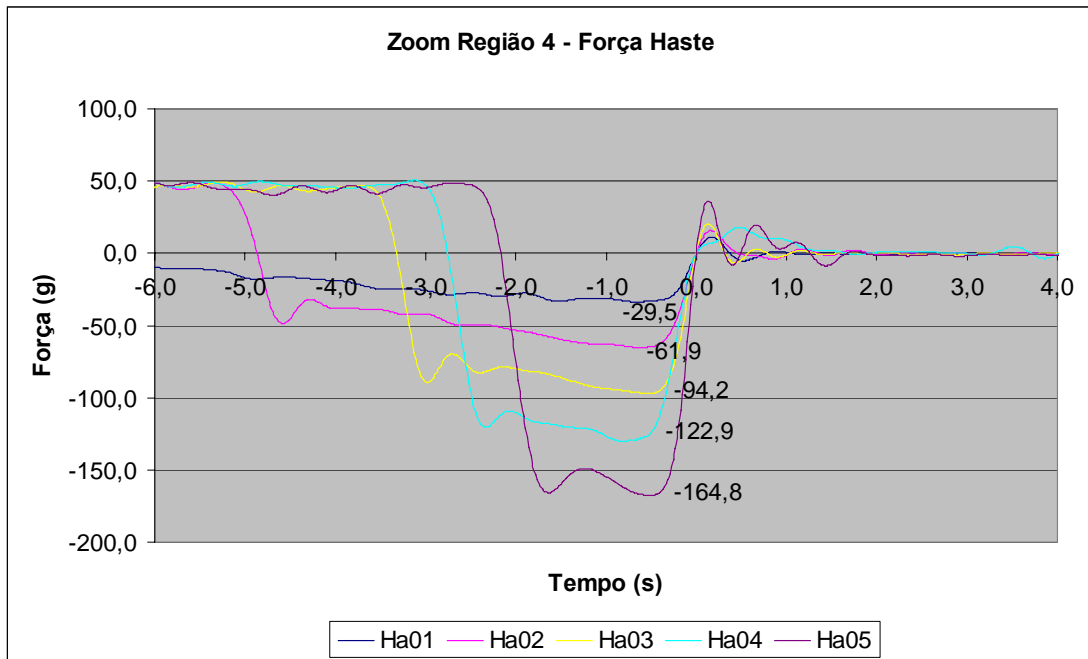


Figura 2.4.1.12b: Zoom da força na haste para a região 4, grupo de ensaios A.

➤ Grupo de Ensaios B: $V_{\text{final}} = 0,5 \text{ m/s}$

A superposição na região 4 para os ensaios do grupo B está mostrada nas Figuras 2.4.1.13a e 2.4.1.13b para a força na esfera e na haste. A variação da força apenas na haste é apresentada nas Figuras 2.4.1.14a e 2.4.1.14b.

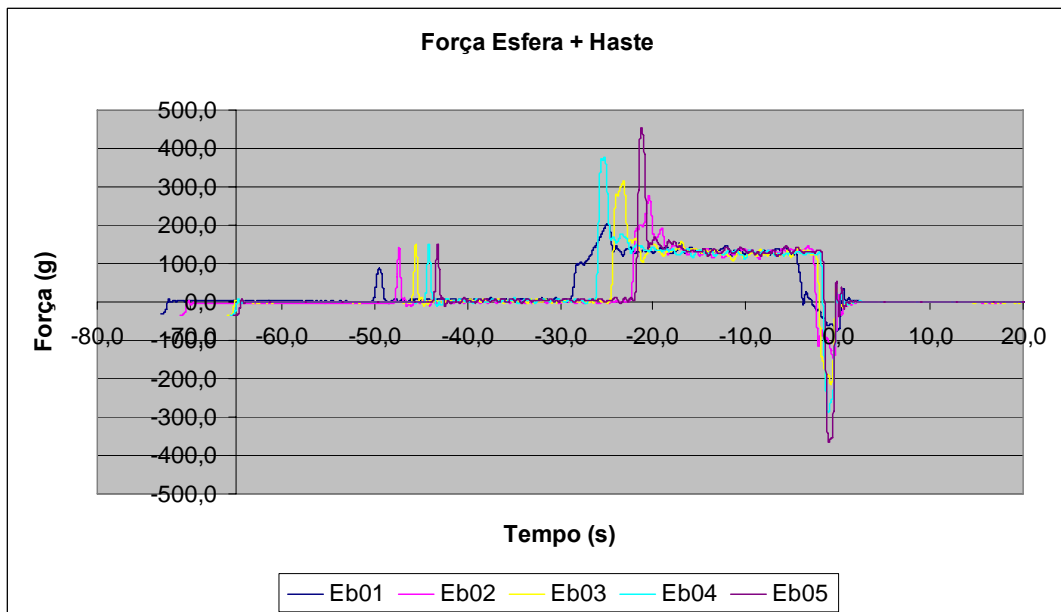


Figura 2.4.1.13a: Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 0,5 \text{ m/s}$, região 4.

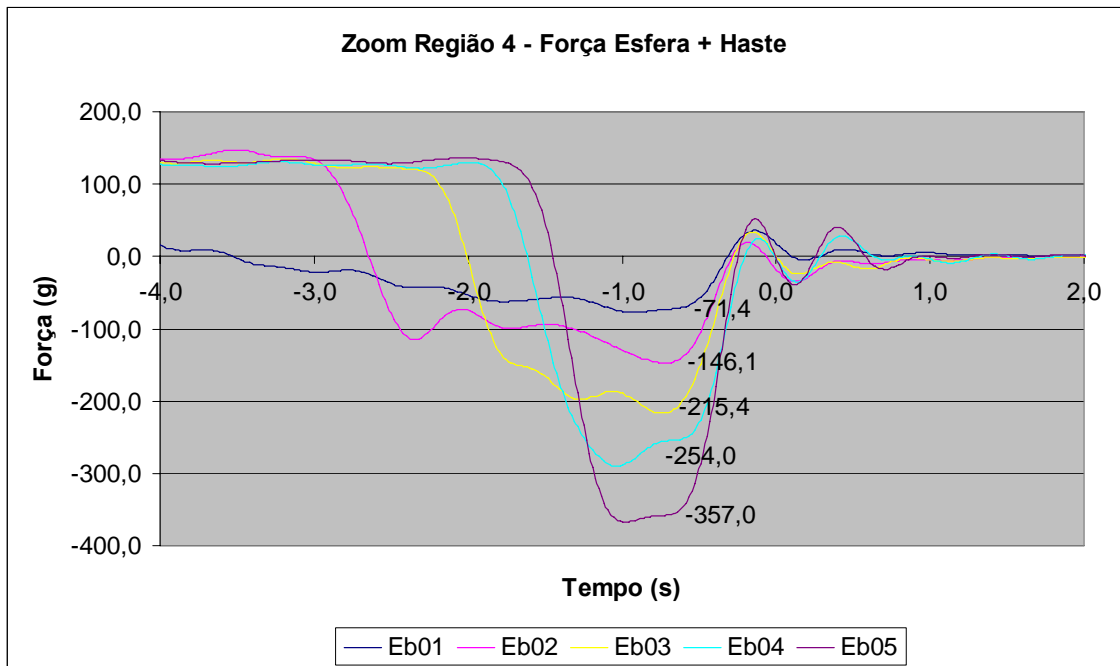


Figura 2.4.1.13b: Zoom da sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 0,5\text{m/s}$, região 4.

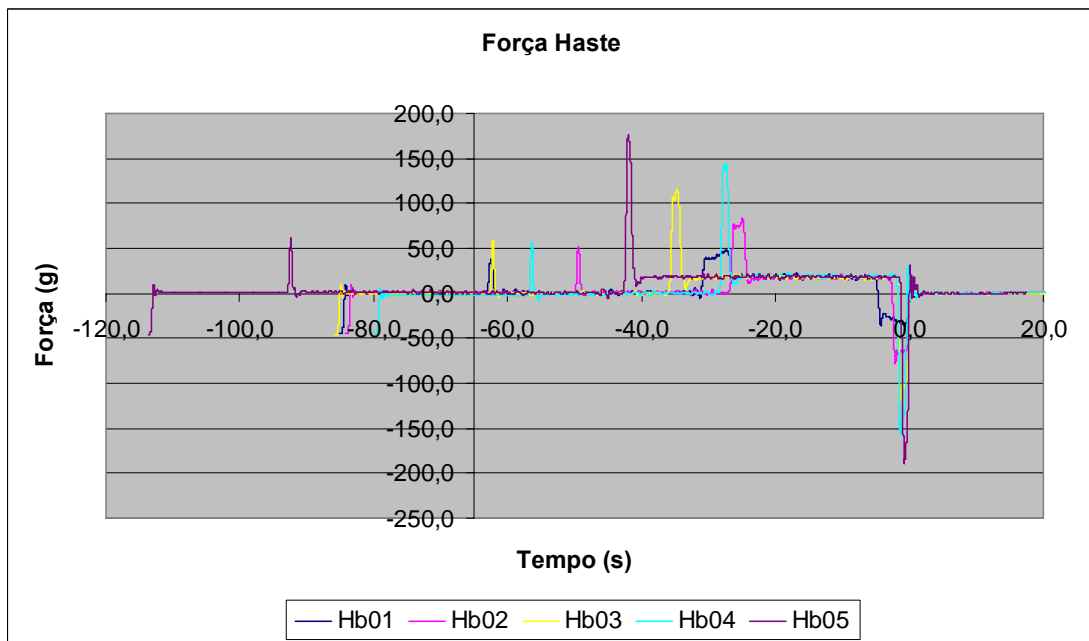


Figura 2.4.1.14a: Sobreposição dos ensaios, considerando apenas a variação da força na haste para $V_{\text{final}} = 0,5\text{m/s}$, região 4.

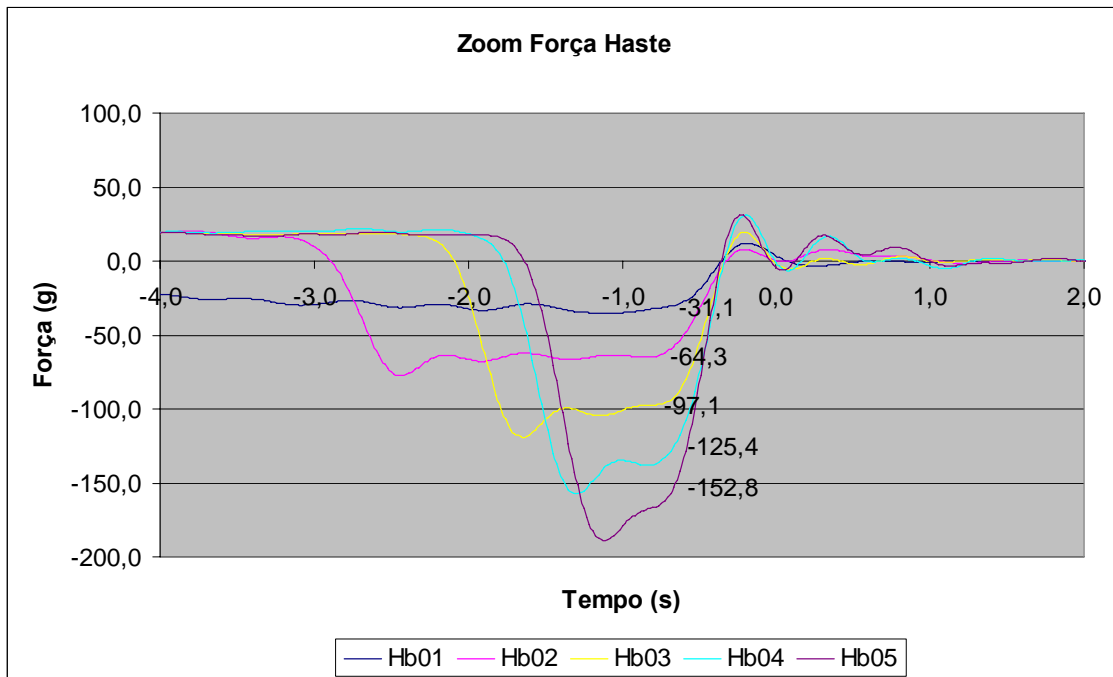


Figura 2.4.1.14b: Zoom da sobreposição dos ensaios, considerando apenas a variação da força na haste, região 4.

➤ Grupo de Ensaios C: $V_{\text{final}} = 2 \text{ m/s}$

No grupo de ensaios C, com $V_{\text{final}} = 2 \text{ m/s}$, a superposição na região 4, mostrando a força na esfera com a haste, é apresentada nas Figuras 2.4.1.15a e 2.4.1.15b e a força apenas na haste, nas Figuras 2.4.1.16a e 2.4.1.16b.

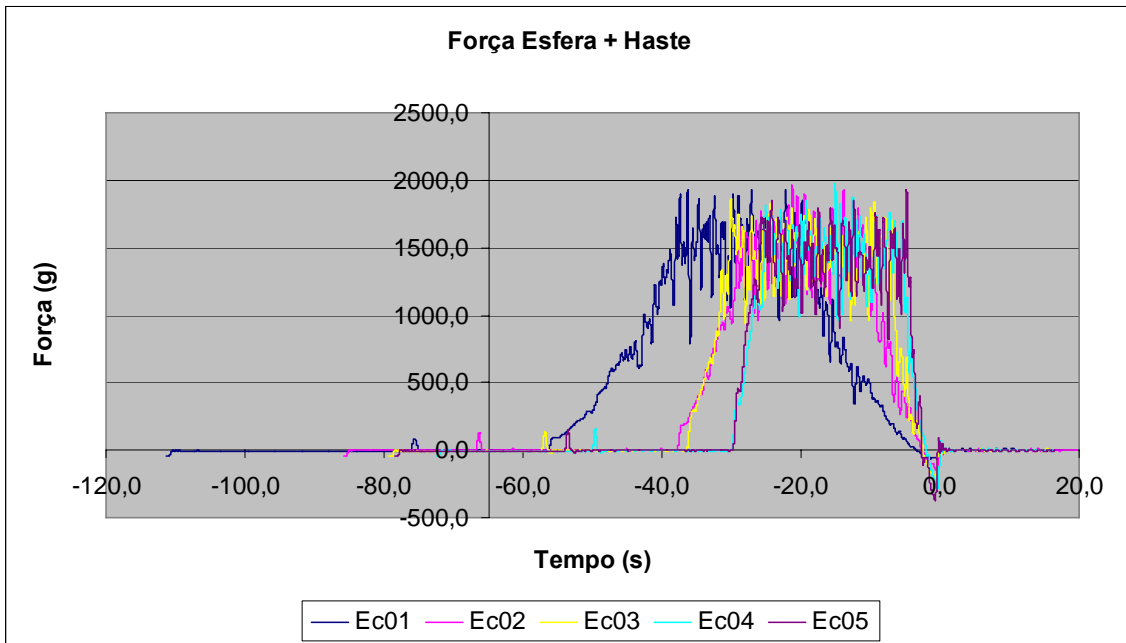


Figura 2.4.1.15a: Sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 2\text{m/s}$.

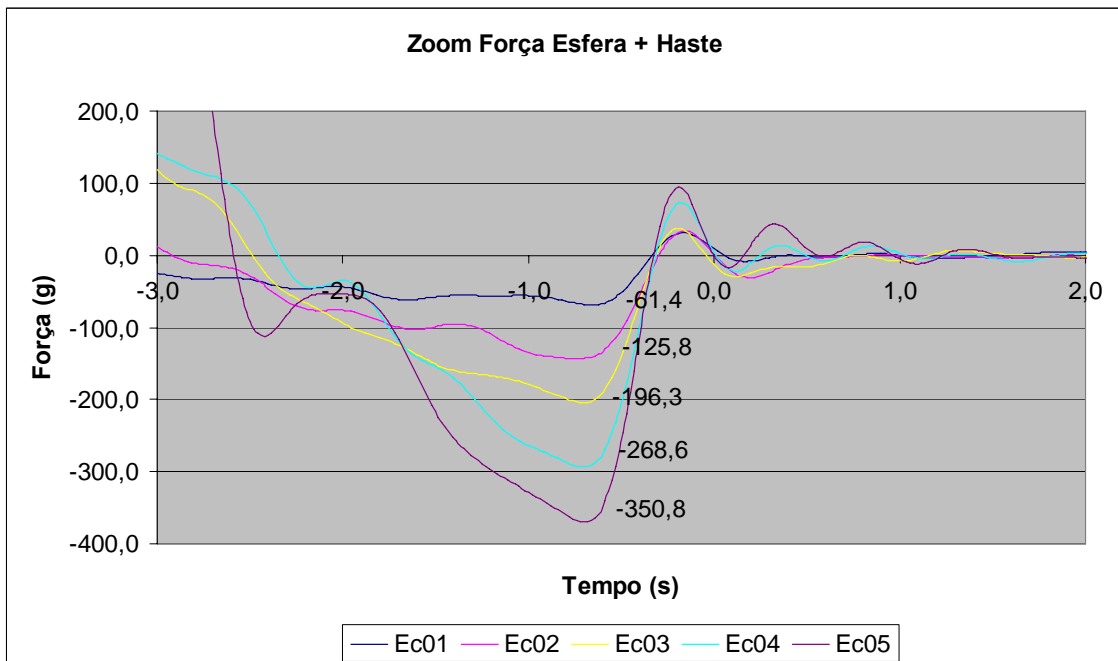


Figura 2.4.1.15b: Zoom na sobreposição dos ensaios mostrando a força para $V_{\text{final}} = 2\text{m/s}$, região 4.

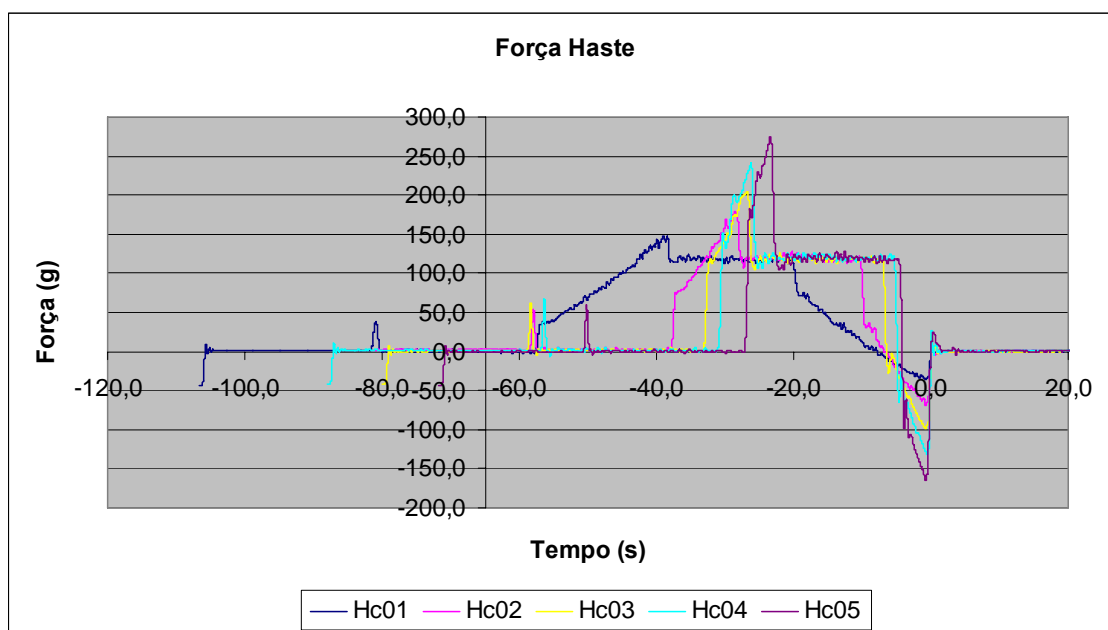


Figura 2.4.1.16a: Sobreposição dos ensaios mostrando a força da haste para $V_{\text{final}} = 2\text{m/s}$.

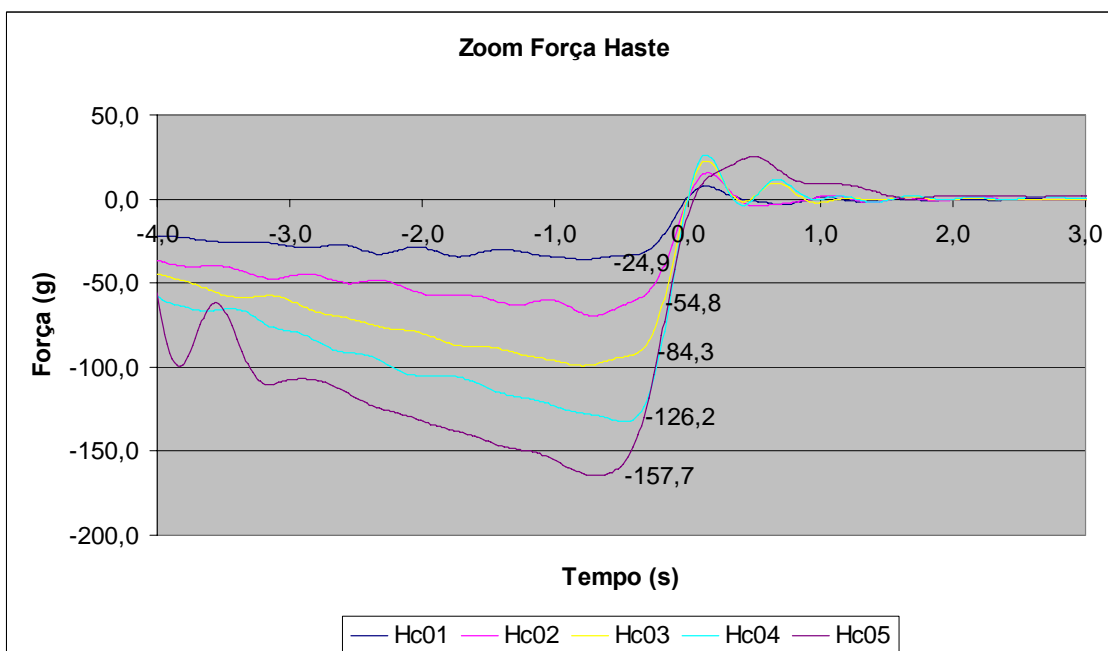


Figura 2.4.1.16b: Zoom na sobreposição dos ensaios mostrando a força na haste para o grupo de ensaios C, região 4.

Os resultados da massa adicional da esfera, assim como as amplitudes de força e aceleração utilizadas para o cálculo estão presentes na Tabela 2.4.1.3.

Tabela 2.4.1.3: Massa adicional da esfera a partir da análise da Região 4.

Região 4					
Ensaio	X_a (g)	a (1/g)	X_{AH} (g)	a_H (1/g)	m_{aE} (kg)
a01	67,07425	0,01044	35,83774	0,01042	1,00359
a02	136,57079	0,02029	77,81741	0,02078	1,00288
a03	233,57079	0,02047	114,89012	0,03084	1,04261
a04	248,63227	0,04088	130,51394	0,04211	1,00635
a05	316,03090	0,04940	178,98302	0,05234	1,01124
b01	75,21023	0,01134	40,28424	0,01122	0,94710
b02	149,13696	0,02023	78,04044	0,02035	0,94616
b03	217,53574	0,03144	134,13622	0,04082	0,92849
b04	287,67033	0,05314	146,66583	0,06246	0,92371
b05	359,31443	0,06896	158,04432	0,07074	1,01268
c01	62,26632	0,01195	31,69936	0,01373	1,08720
c02	137,81612	0,02636	62,49295	0,02727	1,05241
c03	201,78021	0,03739	100,45632	0,03904	1,16553
c04	279,50064	0,04817	143,24992	0,04817	1,16046
c05	355,29571	0,06154	173,13774	0,05989	1,10652

Pela análise dos resultados de massa adicional da esfera, m_{aE} , encontrados na Tabela 2.4.1.3, observa-se que estes se aproximam do valor teórico de 1,07, Equação (2.4.1.4), correspondendo a um coeficiente de massa adicional de 0,5. Na Figura 2.4.1.17 fica mais visível a comparação dos resultados experimentais com o teórico.

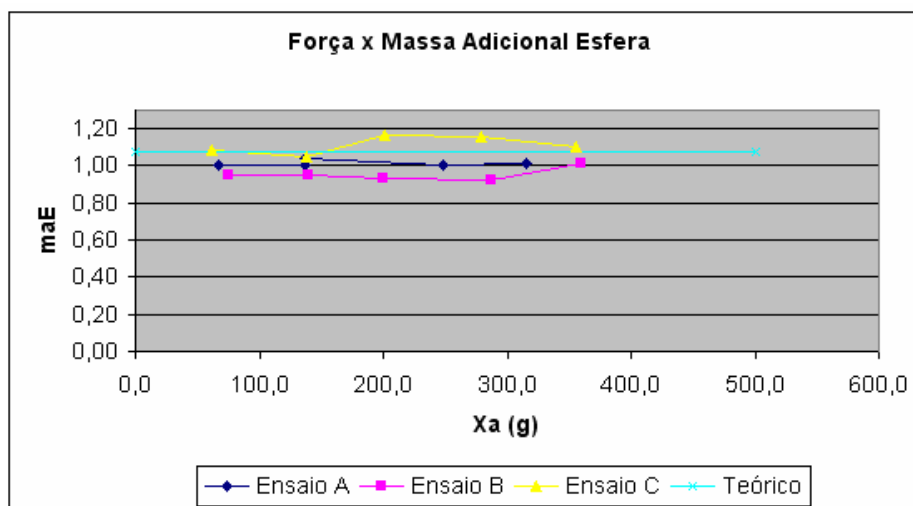


Figura 2.4.1.17: Resultados das massas adicionais calculadas pelos ensaios e valor teórico.

Pela Figura 2.4.1.17, onde os resultados da Tabela 2.4.1.3 são mostrados, nota-se que para a região 4, assim como na região 1, o ensaio A, com velocidade final de 1,0m/s, se aproxima mais do resultado teórico de massa adicional desejado. Os resultados de massa adicional para o grupo de ensaios B ficaram mais abaixo do teórico. O ensaio C, com maior velocidade final, de 2 m/s, tem a massa adicional maior do que o valor teórico.

➤ Conclusão

A metodologia de ensaios sugerida de fato permite a obtenção de estimativa de massa adicional na medida em que os valores teóricos da esfera foram resgatados. A região 1 fornece resultados mais próximos do teórico do que a região 4, devido ao efeito de memória que ocorre nesta última. A velocidade terminal deve ser de pelo menos 1,0 m/s, grupo de ensaios A, e a aceleração de 0,02g.

2.4.2 Ensaio com Aceleração Uniforme para Estimativa da Massa Adicional do *Manifold*

O método de obtenção dos coeficientes de massa adicional através de ensaios de reboque com aceleração uniforme foi aplicado para o *manifold*, após o estudo feito com a esfera. Para isto, foram realizados ensaios de arrasto com dois modelos de *manifold*, no Tanque de Provas do Agrupamento de Engenharia Naval e Oceânica da Divisão de Tecnologia de Transportes do IPT.

2.4.2.1 Descrição dos Ensaio de Reboque

Os modelos ensaiados foram construídos nas escalas 1:35 e 1:70 e receberam, respectivamente, os números 452 (M452) e 453 (M453). O modelo M452 foi ensaiado na direção dos três eixos de referência (X, Y e Z), e o modelo M453 nas direções Y e Z. A direção X (surge) corresponde a eixo paralelo ao lado horizontal de maior comprimento; a Y (sway) corresponde a eixo paralelo a lado horizontal de menor

comprimento; o eixo Z (heave) corresponde à vertical. As Tabelas 2.4.2.1.1 e 2.4.2.1.2 apresentam as características do protótipo e dos modelos, respectivamente. As Figuras 2.4.2.1.1 e 2.4.2.1.2 mostram os dois modelos construídos.

Tabela 2.4.2.1.1: Características do protótipo.

Característica	
Comprimento (m)	16,635
Largura (m)	8,501
Altura (m)	5,149
Peso aprox. (kgf)	278.525

Tabela 2.4.2.1.2: Características dos modelos nas condições de ensaio.

Característica				
	M452 (1:35)		M453 (1:70)	
Comprimento (m)	0,4753		0,2376	
Largura (m)	0,2429		0,1214	
Altura (m)	0,1471		0,0736	
Peso em escala (kgf)	6,338		0,792	
Área frontal (m ²)				
Arrasto, oscil., eixo x	0,0357		-	
Arrasto, oscil., eixo y	0,0699		0,0175	
Arrasto, oscil., eixo z	0,1154		0,0288	
Pesos (kgf)				
Ensaio	no ar	subm.	no ar	subm.
Arrasto, eixo x	3,629	1,501	-	-
Arrasto, eixo y	3,629	1,501	0,702	0,204
Arrasto, eixo z	3,829	1,636	0,623	0,255
Oscilação forçada, x	3,884	1,745	-	-
Oscilação forçada, y	3,644	1,709	0,672	0,253
Oscilação forçada, z	3,844	1,516	0,717	0,270
Obs.: Para efeito dos ensaios, as placas suportes foram consideradas como partes integrantes do modelo, em cada caso.				

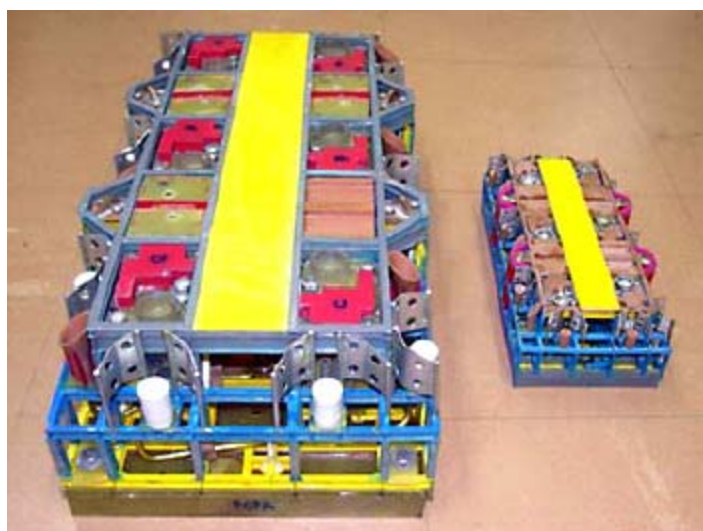


Figura 2.4.2.1.1: Aspecto dos modelos de *manifold* 1:35 e 1:70.

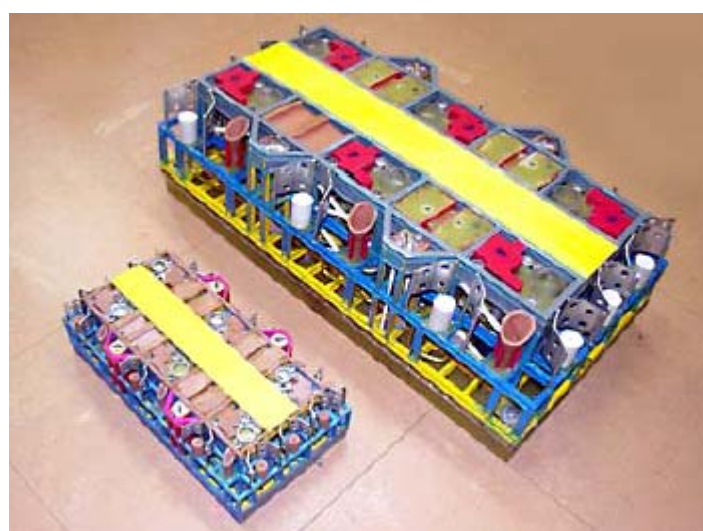


Figura 2.4.2.1.2: Aspecto dos modelos de *manifold* 1:35 e 1:70.

O ensaio de arrasto consistiu em rebocar o modelo ao longo do Tanque de Provas, através do carro dinamométrico, utilizando-se um bloco de força para medir a força de resistência ao reboque, durante cada corrida, a uma certa velocidade de avanço. O bloco de força foi fixado entre uma haste de perfil hidrodinâmico e uma base rígida na parte superior. O modelo de *manifold* foi fixado na parte inferior da haste, e submerso a uma profundidade maior que 1,5 vezes a maior dimensão do modelo maior (M452). Um esquema do ensaio de arrasto é mostrado na Figura 2.4.2.1.3.

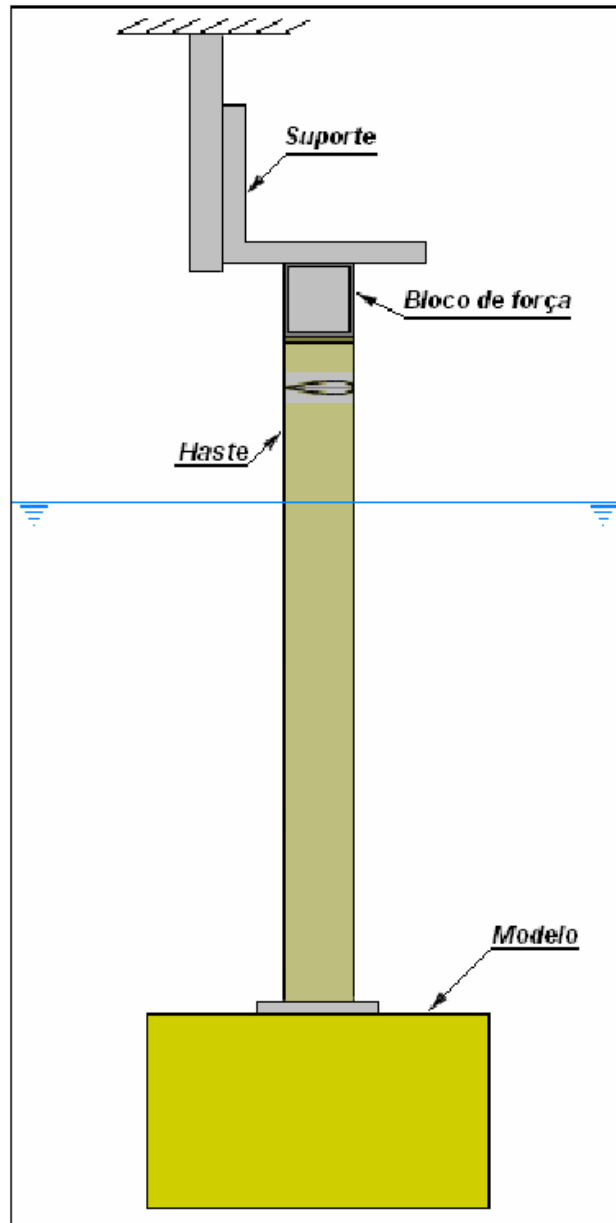


Figura 2.4.2.1.3: Esquema do ensaio de arrasto.

Durante cada corrida, foram efetuadas medições da velocidade de avanço, da força de arrasto e aceleração no trecho transiente, com aceleração constante, para alguns valores definidos de velocidade e aceleração.

Para a direção X, a velocidade final foi mantida em 0,5 m/s e a aceleração variou em função de g (0,01g, 0,02g, 0,03g, 0,04g).

No caso da direção Y, a velocidade final foi de 1,0 m/s e a aceleração variou em 0,02g e 0,04g. Para Y, ensaiou-se ainda o caso de uma placa acoplada em cada um

dos lados do *manifold* desta direção, visando entender melhor o efeito da porosidade, Figura 2.4.2.1.4.



Figura 2.4.2.1.4: Aspecto do modelo de *manifold* com placa.

Na direção *Z* realizaram-se dois ensaios com velocidade final de 1,0 m/s e acelerações de 0,02g e 0,04g.

Uma matriz dos ensaios realizados com o modelo pode ser vista na Tabela 2.4.2.1.3.

Tabela 2.4.2.1.3: Matriz de ensaios para estimativa da massa adicional.

Direção do Ensaio	Velocidade Final (m/s)	Aceleração (g)
X	0,5	0,01
X	0,5	0,02
X	0,5	0,03
X	0,5	0,04
Y	1,0	0,02
Y	1,0	0,04
Y + pl	1,0	0,02
Y + pl	1,0	0,04
Z	1,0	0,02
Z	1,0	0,04

As Figuras 2.4.2.1.5 a 2.4.2.1.7 mostram o modelo de *manifold* na escala 1:35 durante ensaio de reboque.



Figura 2.4.2.1.5: Modelo 1:35 durante ensaio de arrasto no eixo X.

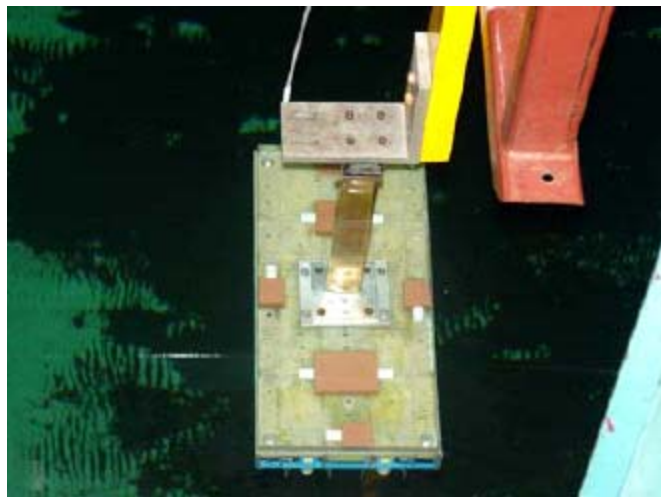


Figura 2.4.2.1.6: Modelo 1:35 durante ensaio de arrasto no eixo Y.



Figura 2.4.2.1.7: Modelo 1:35 durante ensaio de arrasto no eixo Z.

As Figuras 2.4.2.1.8 e 2.4.2.1.9 apresentam o modelo de *manifold* na escala 1:70 durante os ensaios de arrasto.

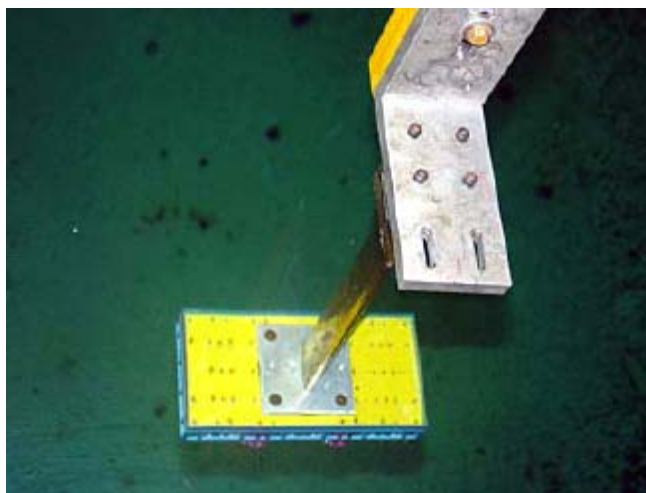


Figura 2.4.2.1.8: Aspecto do modelo 1:70 durante ensaio de arrasto no eixo Y.



Figura 2.4.2.1.9: Aspecto do modelo 1:70 durante ensaio de arrasto no eixo Z.

2.4.2.2 Obtenção dos Coeficientes de Massa Adicional

Analogamente ao caso da esfera, no cálculo da massa adicional do *manifold*, leva-se em consideração a haste que foi acoplada a este. Para obtenção dos coeficientes de massa adicional, utiliza-se as Equações (2.4.2.2.1) e (2.4.2.2.2).

$$M_{aM} = X_A/a - X_{AH}/aH - m_M \quad (2.4.2.2.1)$$

$$Ca = M_{aM} / (\rho V) \quad (2.4.2.2.2)$$

Onde M_{aM} e V são a massa adicional e o volume do *manifold* respectivamente; m_M é a massa do manifold; X_A é a força no manifold e X_{AH} , a força na haste.

Os registros foram divididos em 4 regiões, representadas na Figura 2.4.2.2.1, que são respectivamente:

Região 1: Aceleração inicial;

Região 2: Entrada no patamar de velocidade constante;

Região 3: Saída do patamar de velocidade constante;

Região 4: Parada.

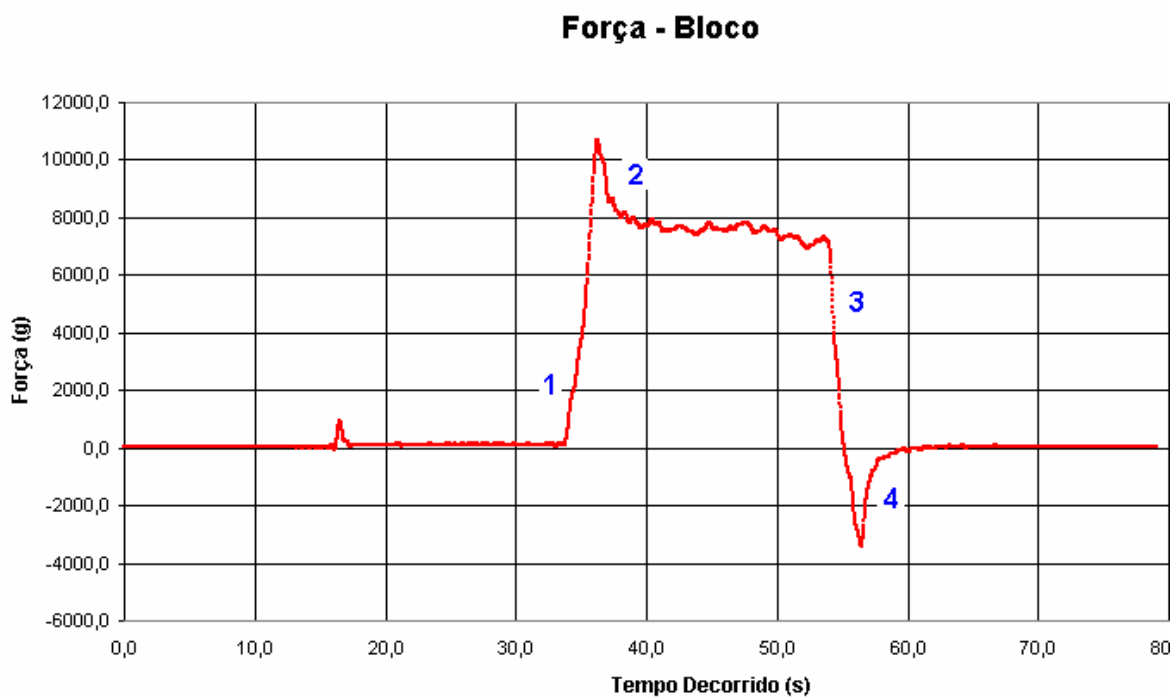


Figura 2.4.2.2.1: Registros temporais típicos e definição das regiões consideradas nos ensaios do *manifold* para a obtenção da massa adicional.

Nota-se pela Figura 2.4.2.2.1 que, para o caso do *manifold*, a região 1 não é identificada imediatamente (poderia sê-lo em caso de necessidade) como acontece no caso da esfera. Como a região 2 também se presta para este tipo de análise, ela foi de fato a melhor para o caso do *manifold* por estar melhor definida. A análise da região 4 também foi realizada para exibir o efeito memória.

As regiões de maior interesse para a análise e cálculo da massa adicional são as regiões 2 e 4 pois estas estão claras e bem definidas. Porém, a região 1 também será considerada para cálculo da massa adicional para efeito de comparação com os resultados das regiões 2 e 4.

➤ Região 2

➤ Ensaio em X

Na Figura 2.4.2.2.2a estão sobrepostos os quatro ensaios realizados na direção X, com velocidade final igual a 0,5 m/s e acelerações de 0,01g, 0,02g, 0,03g e 0,04g. A Figura 2.4.2.2.2b apresenta os valores máximos da região 2. Nota-se que para efeito de cálculo da massa adicional, deve-se subtrair o valor do patamar de velocidade constante, considerando-se assim o valor da amplitude da região 2.

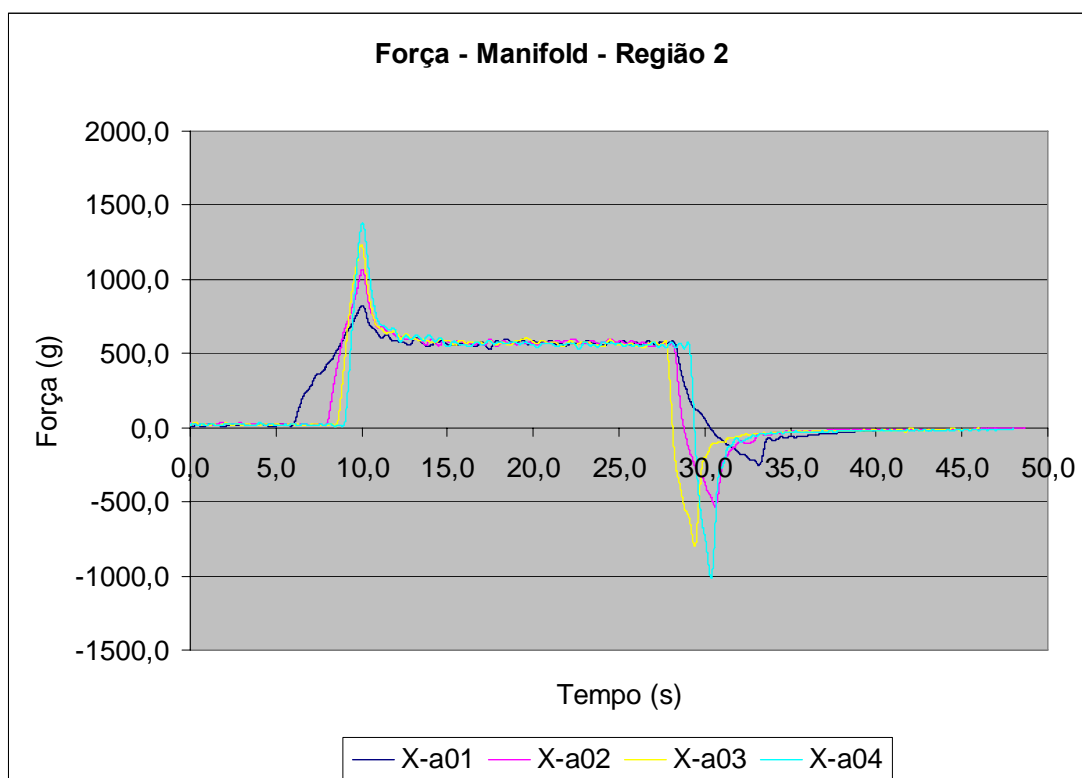


Figura 2.4.2.2.2a: Sobreposição dos ensaios em X com acelerações de 0,01g a 0,04g.

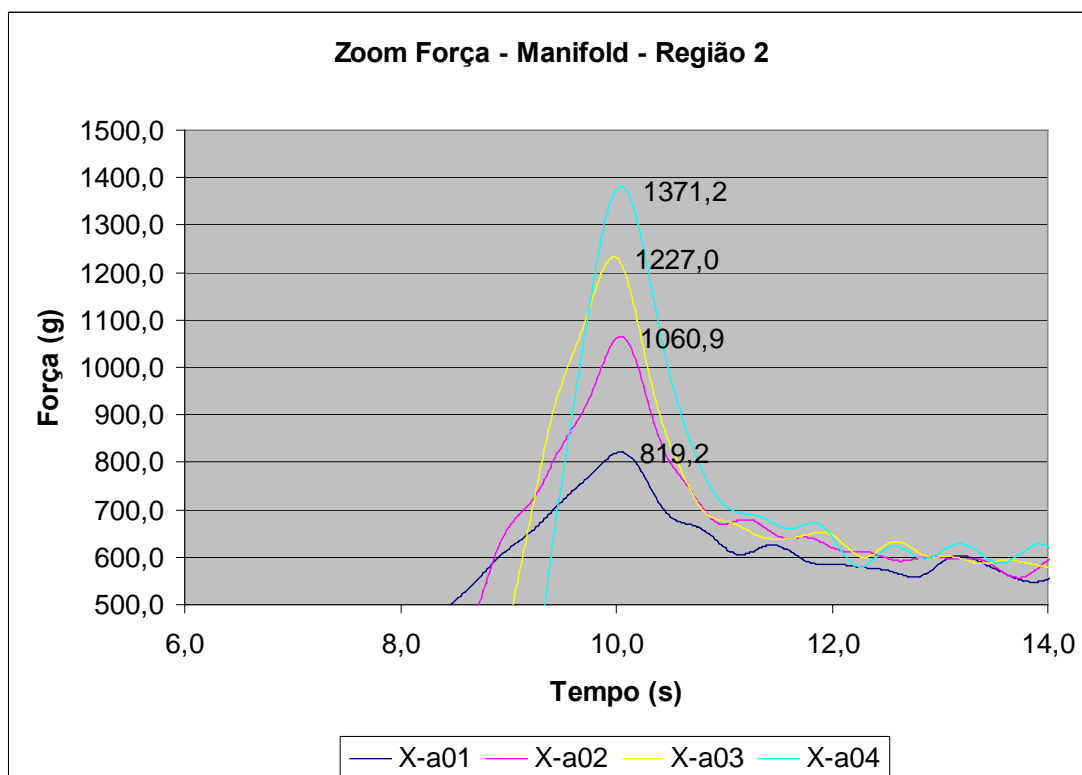


Figura 2.4.2.2.2b: Zoom na sobreposição dos ensaios em X, região 2.

Pela superposição mostrada nas Figuras 2.4.2.2.2a e 2.4.2.2.2b, percebe-se a variação dos ensaios conforme aumenta-se o valor da aceleração, na região 2.

➤ Ensaios em Y

Para a direção Y, são apresentados as Figuras 2.4.2.2.3 e 2.4.2.2.4. Na Figura 2.4.2.2.3a, são sobrepostos os ensaios realizados em Y com velocidade final de 1,0 m/s e acelerações de 0,02g e 0,04g e na Figura 2.4.2.2.3b tem-se um zoom da região 2. A Figura 2.4.2.2.4a mostra os registros com mesma velocidade final e acelerações, porém nestes foram acopladas as placas. A Figura 2.4.2.2.4b apresenta um zoom da força na haste para a região 2 considerada.

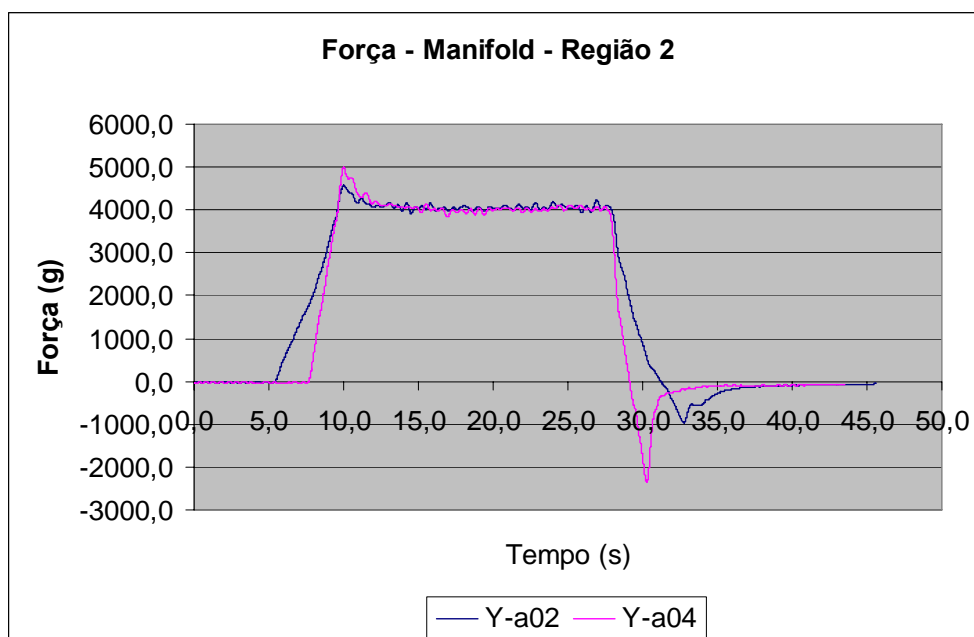


Figura 2.4.2.2.3a: Sobreposição dos ensaios na direção Y.

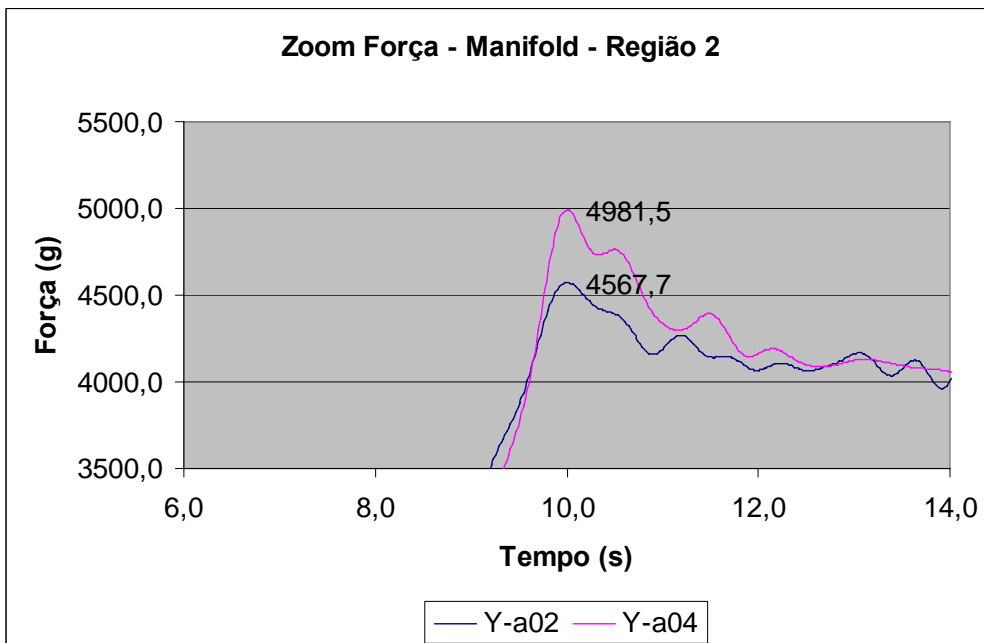


Figura 2.4.2.2.3b: Zoom na sobreposição dos ensaios na direção Y.

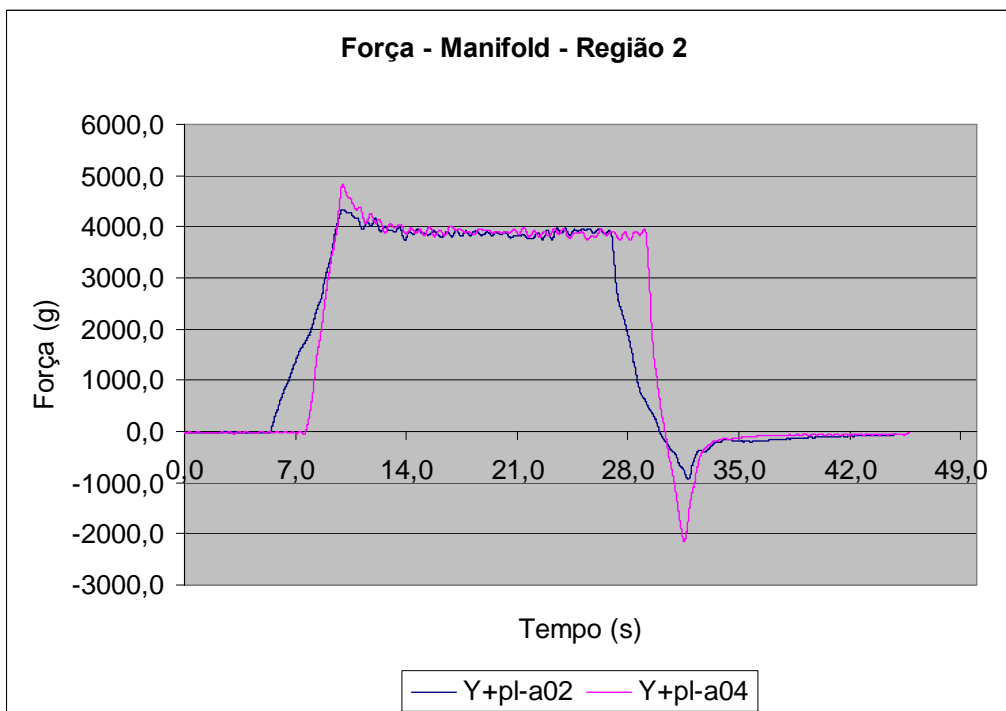


Figura 2.4.2.2.4a: Sobreposição dos ensaios em Y com placa acoplada.

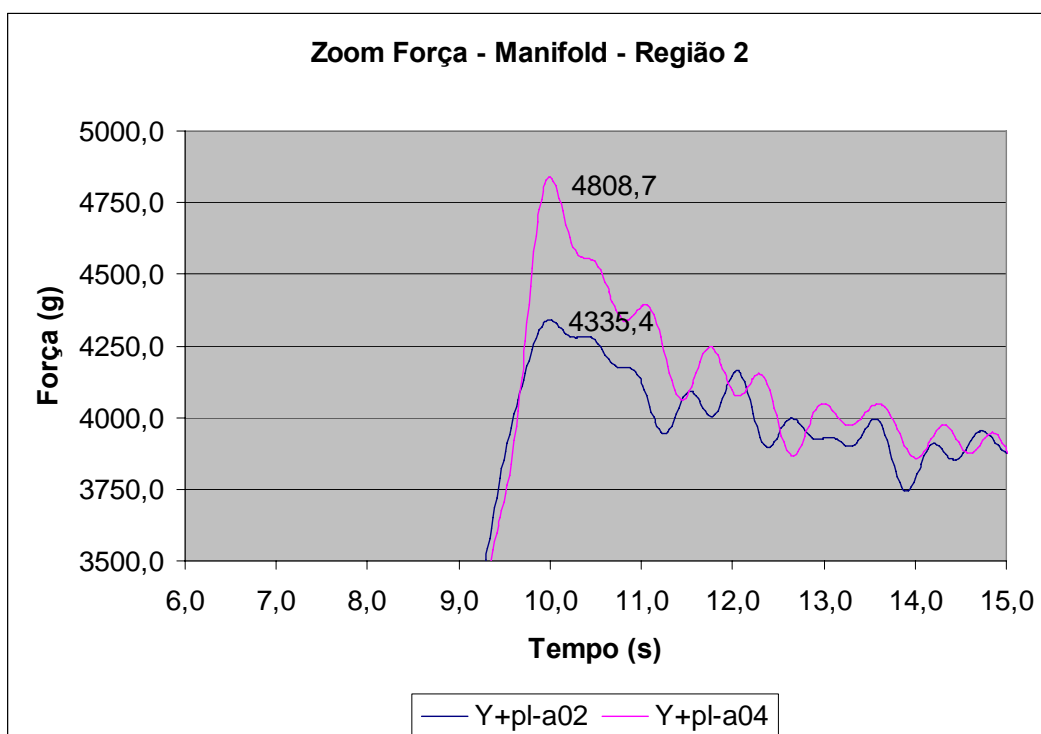


Figura 2.4.2.2.4b: Zoom na sobreposição dos ensaios em Y com placa acoplada.

➤ Ensaios em Z

Na direção Z, foram realizados dois ensaios, um com aceleração 0,02g e outro com aceleração 0,04g. Ambos os ensaios com velocidade final de 1 m/s. As Figuras 2.4.2.2.5a e 2.4.2.2.5b mostram a superposição dos ensaios.

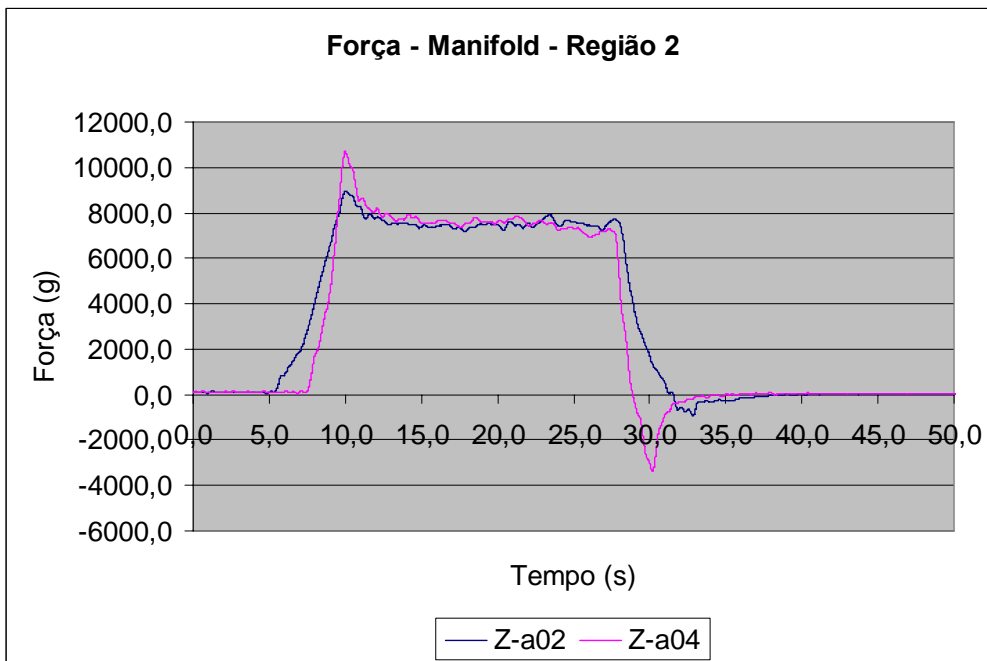


Figura 2.4.2.2.5a: Superposição dos ensaios na direção Z.

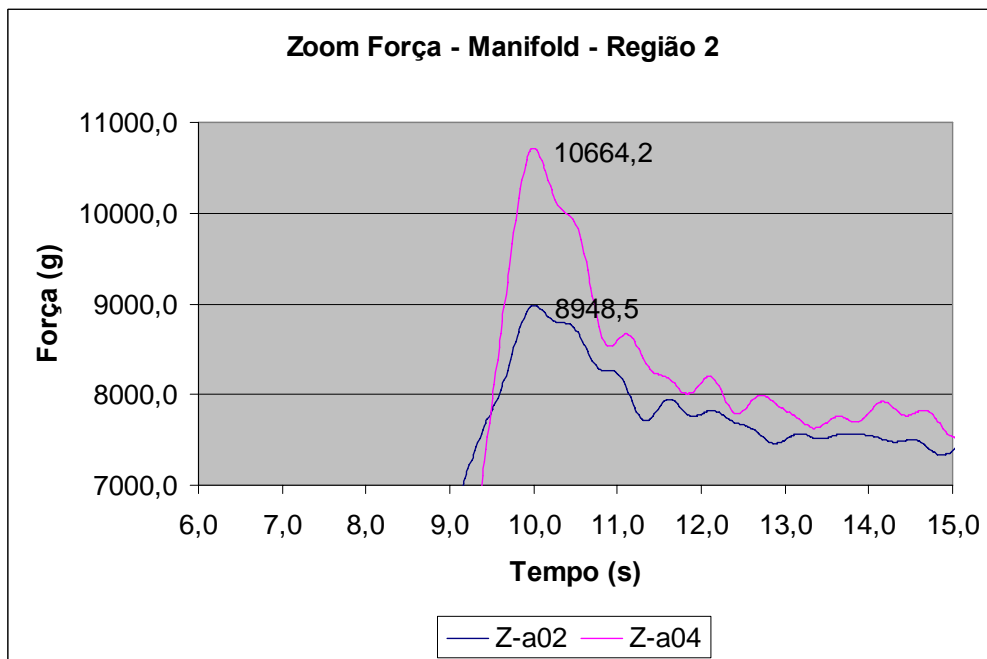


Figura 2.4.2.2.5b: Zoom na superposição dos ensaios na direção Z.

A Tabela 2.4.2.2.1 apresenta os valores das amplitudes de força, X_a e X_{AH} , e acelerações, a e a_H , obtidos dos registros temporais dos ensaios, e os resultados da massa adicional e do coeficiente de massa adicional, calculados através das Equações (2.4.2.2.1) e (2.4.2.2.2), para os eixos X, Y e Z.

Tabela 2.4.2.2.1: Massa adicional do *manifold* – Região 2.

Região 2						
Ensaio	X_a (g)	a (1/G)	X_{AH} (g)	a_H (1/G)	m_{aM} (kg)	Ca
x-v05-a01	257,7029	0,0098	41,1898	0,0109	21,0310	1,2385
x-v05-a02	498,4140	0,0196	61,1898	0,0209	21,0635	1,2404
x-v05-a03	682,6530	0,0271	88,1932	0,0330	21,0072	1,2371
x-v05-a04	962,0420	0,0377	128,1932	0,0430	21,0383	1,2389
y-v10-02	671,6730	0,0201	61,1898	0,0209	29,0087	1,7083
y-v10-04	1341,5080	0,0401	128,1932	0,0430	29,0167	1,7088
y+pl.-v10-02	575,5760	0,0192	61,1898	0,0209	25,5534	1,5048
y+pl.-v10-04	1164,0150	0,0386	128,1932	0,0430	25,7002	1,5135
z-v10-02	898,7260	0,0210	61,1898	0,0209	38,2505	2,2526
z-v10-04	2062,6300	0,0449	239,1932	0,0430	38,7250	2,2805

Analisando os resultados apresentados na Tabela 2.4.2.2.1, região 2, chega-se aos seguintes coeficientes de massa adicional:

$$Ca_{11} = 1,2387$$

$$Ca_{22} = 1,7085$$

$$Ca_{22} \text{ com placa} = 1,5091$$

$$Ca_{33} = 2,2665$$

A Figura 2.4.2.2.6 mostra os valores de Ca obtidos. Observa-se que os coeficientes de massa adicional variam muito pouco com a aceleração, sendo praticamente constantes. Esta região foi a melhor das três regiões analisadas pois está bem definida pelo ensaio.

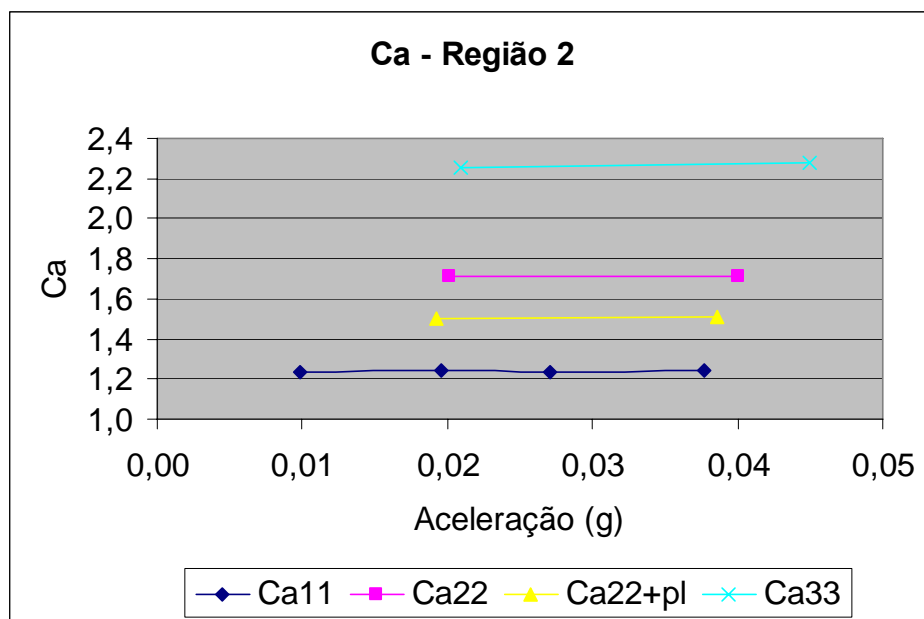


Figura 2.4.2.2.6: Coeficientes de massa adicional calculados através do ensaio.

➤ Região 4

➤ Ensaio em X

Na Figura 2.4.2.2.7a, verifica-se a sobreposição dos ensaios realizados na direção X, na região 4. A Figura 2.4.2.2.7b mostra um zoom na região 4. Nota-se que para região 4, ao contrário da região 2 anteriormente analisada, deve-se subtrair o valor do patamar da parada. Isso acontece pois tanto o patamar de parada como o valor máximo do pico são negativos.

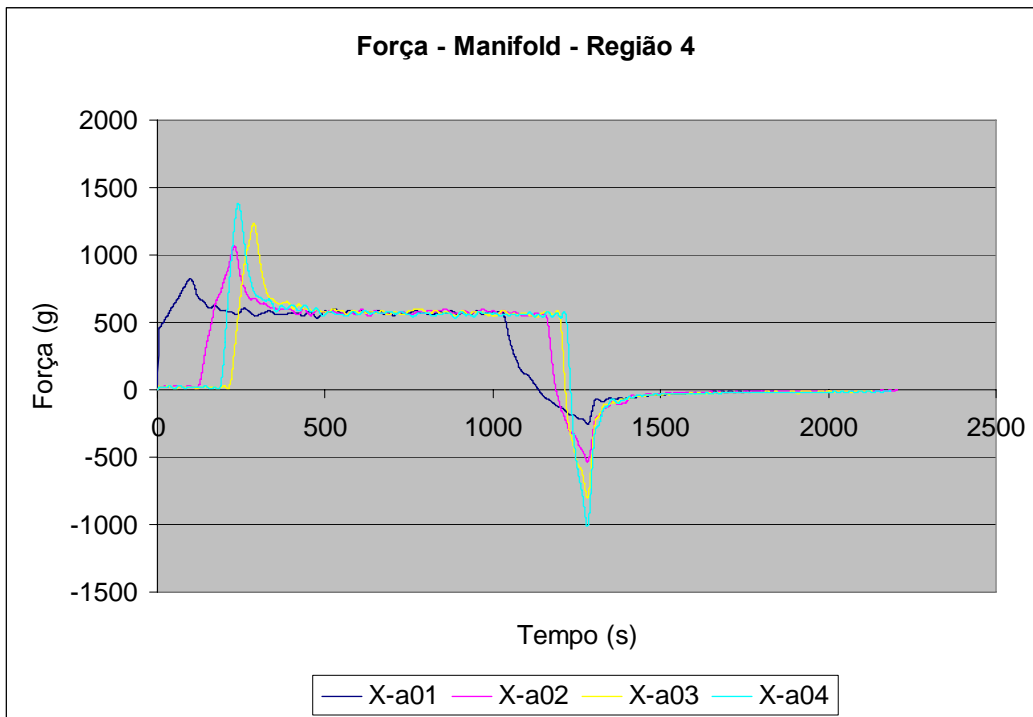


Figura 2.4.2.2.7a: Sobreposição dos ensaios em X com acelerações de 0,01g a 0,04g.

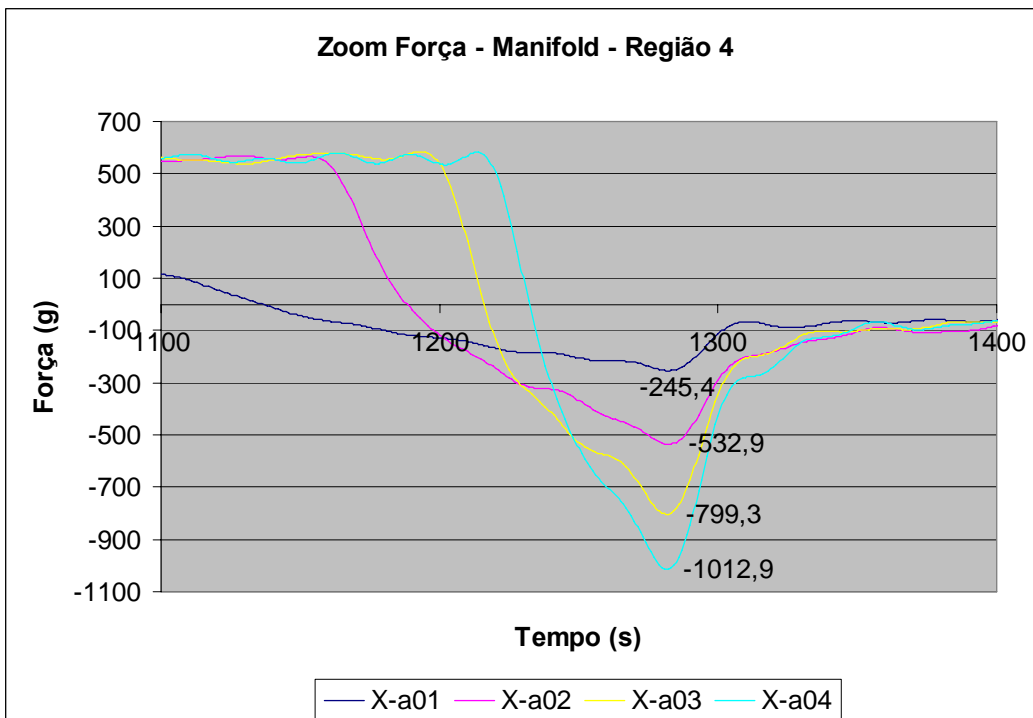


Figura 2.4.2.2.7b: Zoom na sobreposição dos ensaios em X, região 4.

➤ Ensaio em Y

Para a direção Y, a sobreposição dos ensaios na região 4 é apresentada nas Figuras 2.4.2.2.8a e 2.4.2.2.8b, sem a placa acoplada e nas Figuras 2.4.2.2.9a e 2.4.2.2.9b, com a placa.

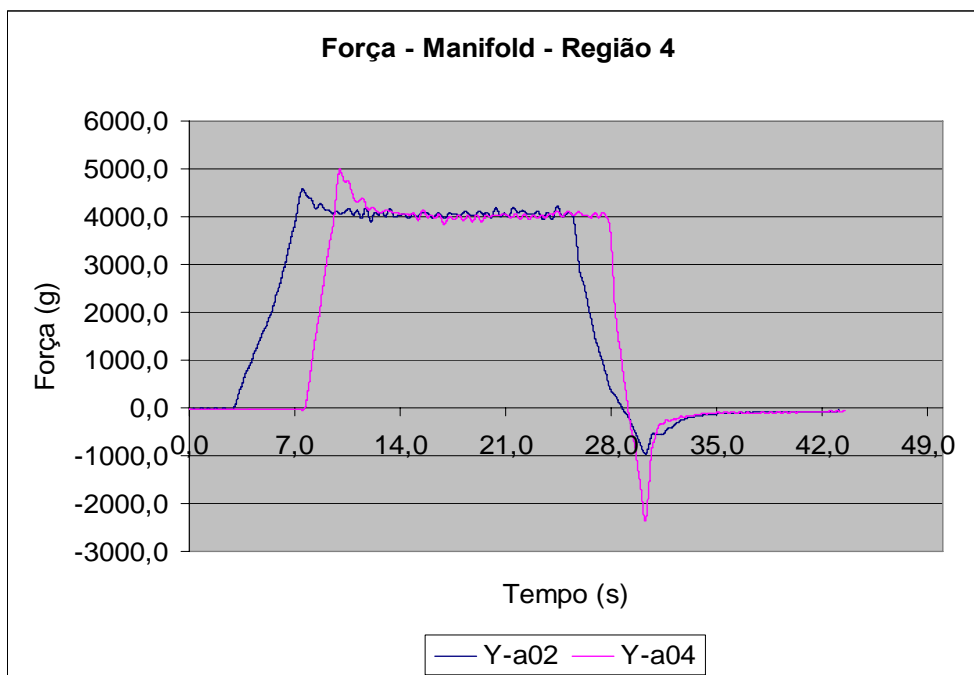


Figura 2.4.2.2.8a: Sobreposição dos ensaios na direção Y.

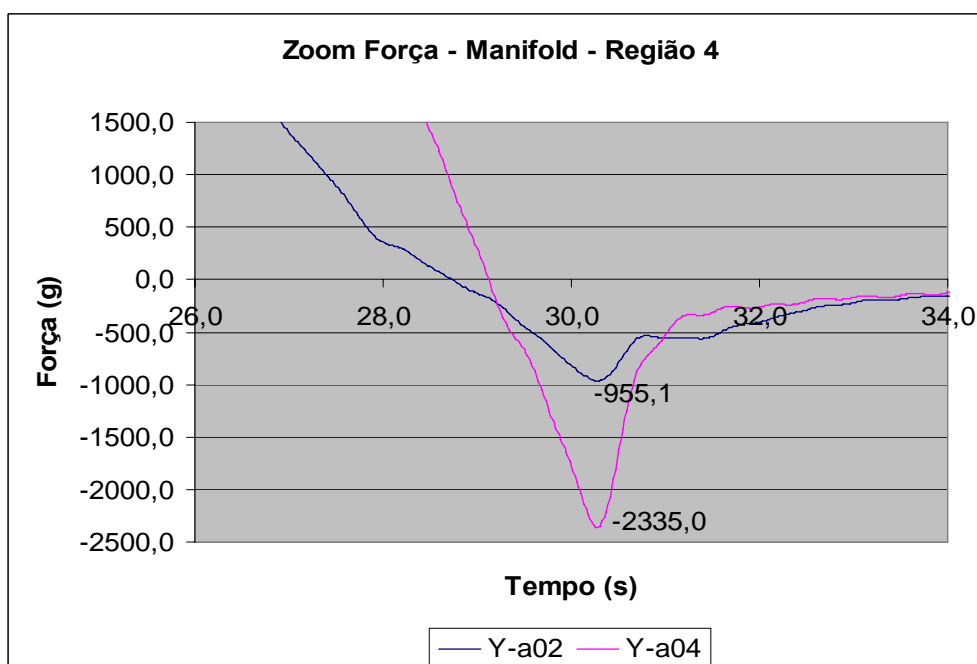


Figura 2.4.2.2.8b: Zoom na sobreposição dos ensaios na direção Y, região 4.

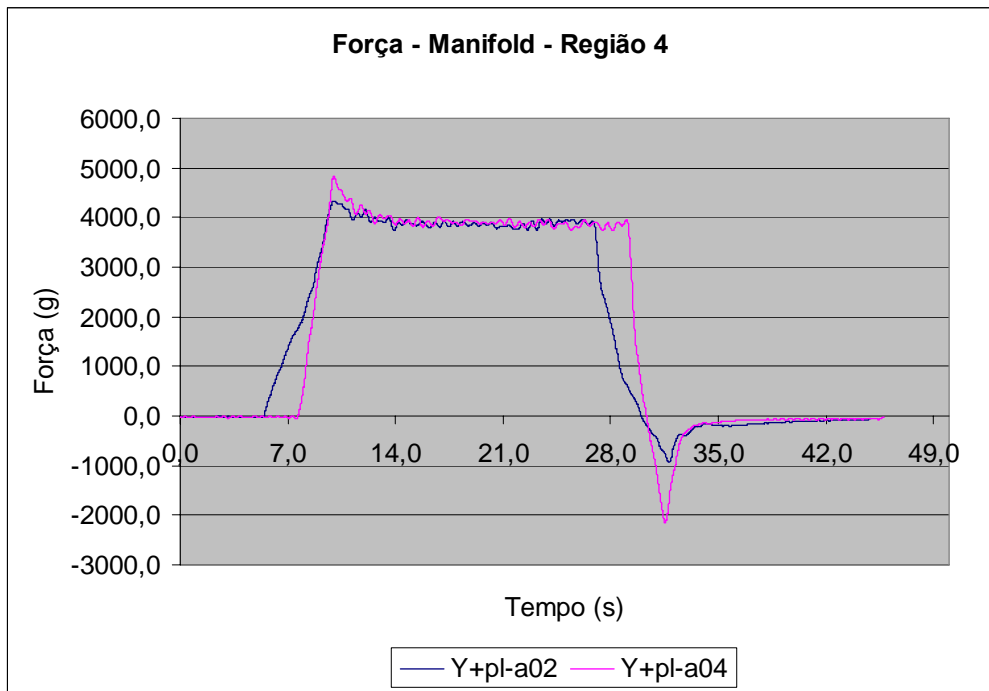


Figura 2.4.2.2.9a: Sobreposição dos ensaios em Y com placa acoplada.

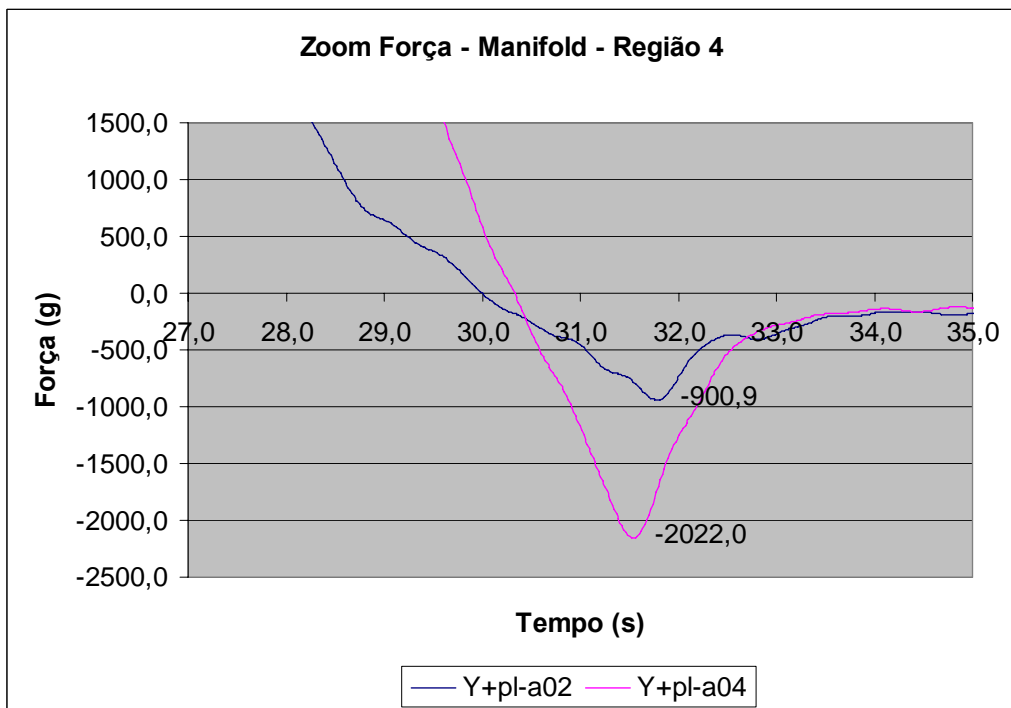


Figura 2.4.2.2.9b: Zoom na sobreposição dos ensaios em Y com placa acoplada.

➤ Ensaio em Z

A sobreposição dos ensaios em Z na região 4 é mostrada na Figura 2.4.2.2.10a. A Figura 2.4.2.2.10b apresenta um zoom na região 4, mostrando o valor máximo do pico negativo.

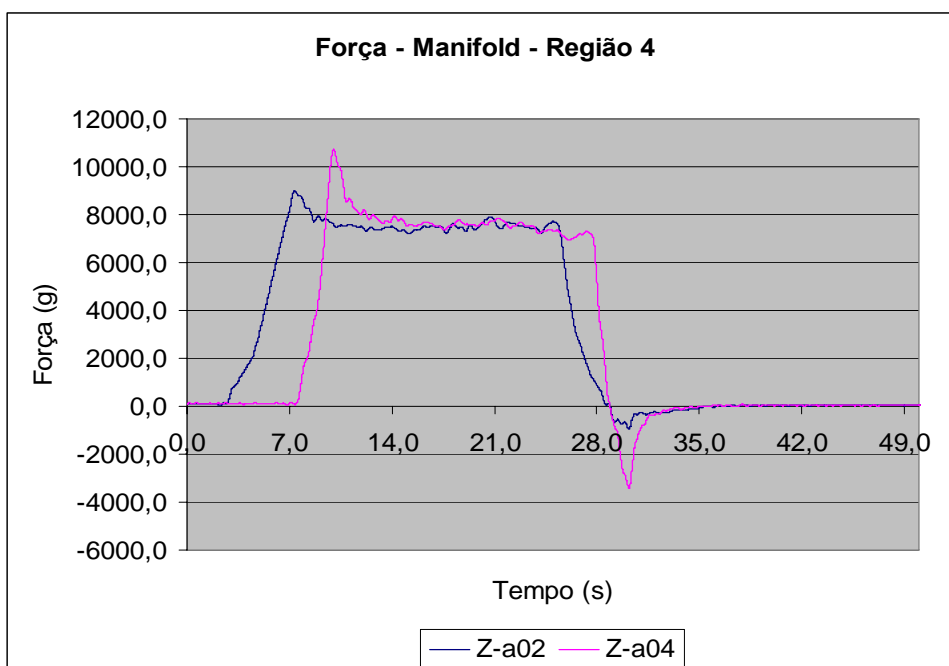


Figura 2.4.2.2.10a: Superposição dos ensaios na direção Z.

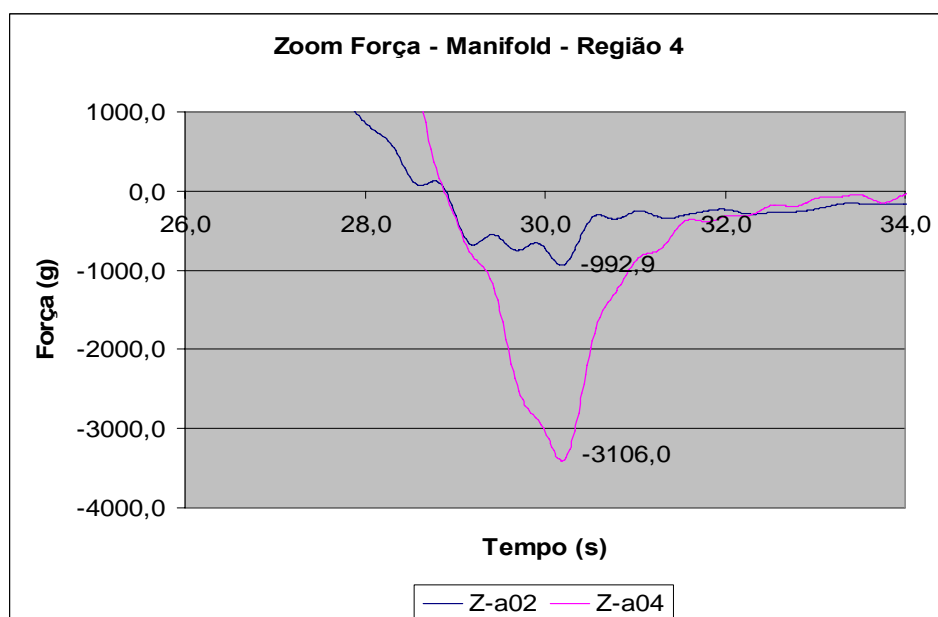


Figura 2.4.2.2.10b: Zoom da superposição dos ensaios na direção Z.

Os resultados da massa adicional do *manifold*, bem como as amplitudes de força e aceleração, utilizadas para o cálculo, são apresentados na Tabela 2.4.2.2.3. Os resultados de Ca também podem ser vistos na Tabela 2.4.2.2.2 e na Figura 2.4.2.2.11.

Tabela 2.4.2.2.2: Massa adicional do *manifold*, região 4.

Região 4						
Ensaio	X_a (g)	a (1/G)	X_{AH} (g)	a_H (1/G)	m_{aE} (kg)	Ca
x-v05-a01	260,1240	0,0106	24,3035	0,0103	20,7412	1,2214
x-v05-a02	535,3810	0,0203	75,0035	0,0203	21,1850	1,2476
x-v05-a03	792,0676	0,0297	134,6844	0,0309	20,8072	1,2253
x-v05-a04	1040,5880	0,0407	134,6844	0,0437	20,9737	1,2351
y-v10-02	899,9296	0,0214	61,0035	0,0203	37,4700	2,2066
y-v10-04	2033,5570	0,0438	134,6844	0,0437	37,2667	2,1946
y+pl.-v10-02	823,8861	0,0214	61,0035	0,0203	34,0324	2,0042
y+pl.-v10-04	1824,5630	0,0415	134,6844	0,0437	34,6015	2,0377
z-v10-02	819,4053	0,0238	61,0035	0,0203	38,1485	2,2466
z-v10-04	2690,9450	0,0449	244,6844	0,0437	38,4602	2,2649

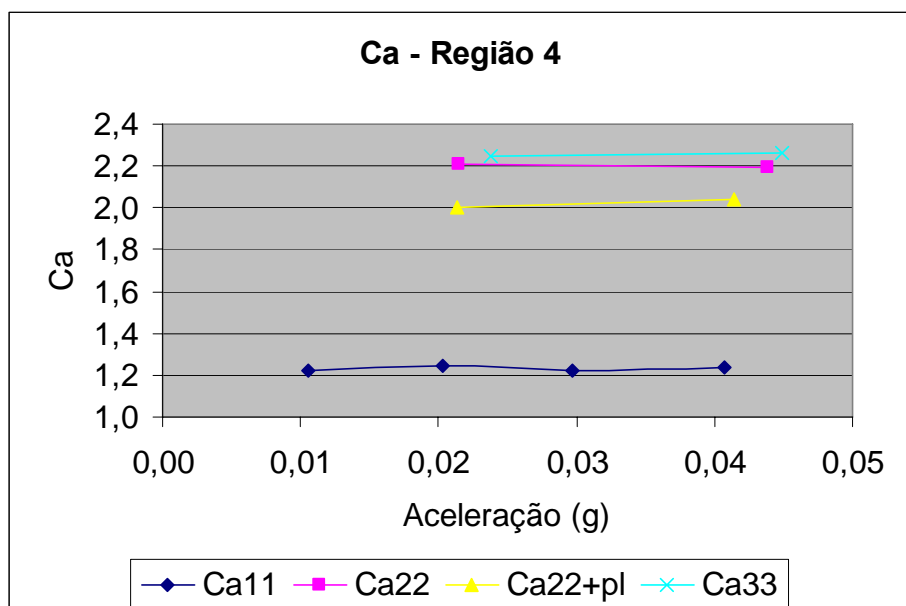


Figura 2.4.2.2.11: Coeficientes de massa adicional obtidos para a região 4.

Analisando os resultados da região 4, conforme a Tabela 2.4.2.2.2, chega-se aos seguintes coeficientes de massa adicional:

$$Ca_{11} = 1,2324$$

$$Ca_{22} = 2,2006$$

$$Ca_{22} \text{ com placa} = 2,0210$$

$$Ca_{33} = 2,2558$$

Nota-se que os únicos valores discrepante em relação aos resultados da região 2 são os correspondentes à Ca_{22} . Assim a avaliação dos resultados na escala 1:70 torna-se relevante como mostrado em seguida.

➤ Região 1

Os registros temporais dos ensaios não foram sobrepostos para a região 1 pois esta não é tão bem definida como as regiões 2 e 4, mostradas anteriormente. Os resultados obtidos para essa região estão na Tabela 2.4.2.2.3 e os coeficientes de massa adicional estão plotados na Figura 2.4.2.2.12.

Tabela 2.4.2.2.3: Resultados do cálculo da massa adicional para a região 1.

Região 1						
Ensaio	X_a (g)	a (1/G)	X_{AH} (g)	a_H (1/G)	m_{aM} (kg)	Ca
x-v05-a01	302,9363	0,0107	59,0925	0,0112	21,4415	1,2627
x-v05-a02	574,9000	0,0221	69,1179	0,0212	21,2569	1,2518
x-v05-a03	779,5016	0,0310	94,0989	0,0306	20,5737	1,2116
x-v05-a04	1045,8084	0,0404	138,0989	0,0406	20,9738	1,2351
y-v10-02	770,3050	0,0229	69,1179	0,0212	28,9251	1,7034
y-v10-04	1407,0040	0,0414	138,0989	0,0406	29,0521	1,7109
y+pl.-v10-02	615,5350	0,0204	69,1179	0,0212	25,4272	1,4974
y+pl.-v10-04	1229,9940	0,0402	138,0989	0,0406	25,6872	1,5127
z-v10-02	1041,9740	0,0241	69,1179	0,0212	38,4252	2,2629
z-v10-04	1929,2950	0,0439	138,0989	0,0406	38,9043	2,2911

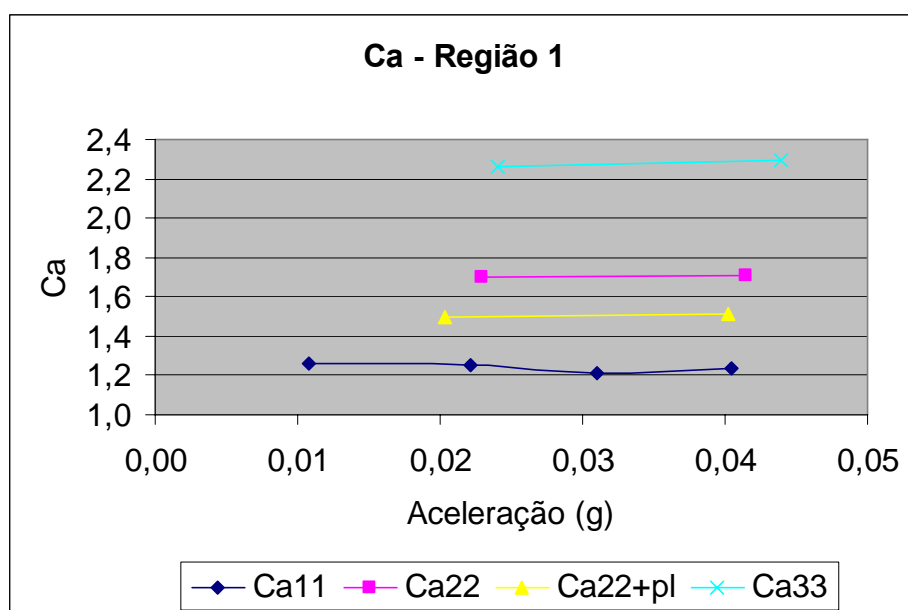


Figura 2.4.2.2.12: Variação do Ca para os eixos X, Y e Z.

Na Figura 2.4.2.2.12, observa-se que os valores de Ca variam mais do que nas regiões 2 e 4, Figuras 2.4.2.2.6 e 2.4.2.2.11, respectivamente, pois a região 1 não é tão clara como as demais.

➤ Comparação com a escala 1:70

No IPT, também foram realizados ensaios na escala 1:70 para as direções Y e Z. Os coeficientes de massa adicional foram então calculados através dos valores de amplitude de força e aceleração, conforme descrito anteriormente. A seguir, nas figuras 2.4.2.2.13 e 2.4.2.2.14 são comparados os valores de Ca obtidos na escala 1:70 com os da escala 1:35. A Figura 2.4.2.2.13 mostra a comparação para a região 2 e a Figura 2.4.2.2.14 para a região 4.

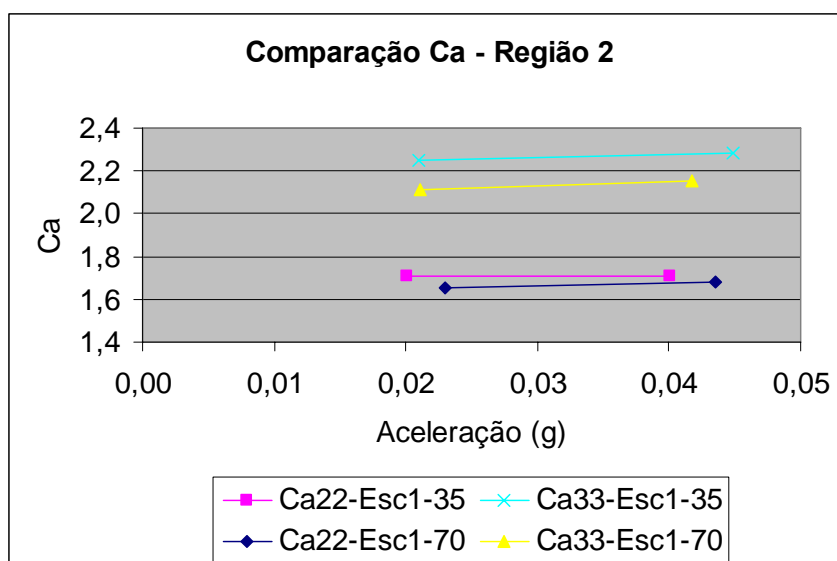


Figura 2.4.2.2.13: Comparação do Ca obtido pelas escalas na região 2.

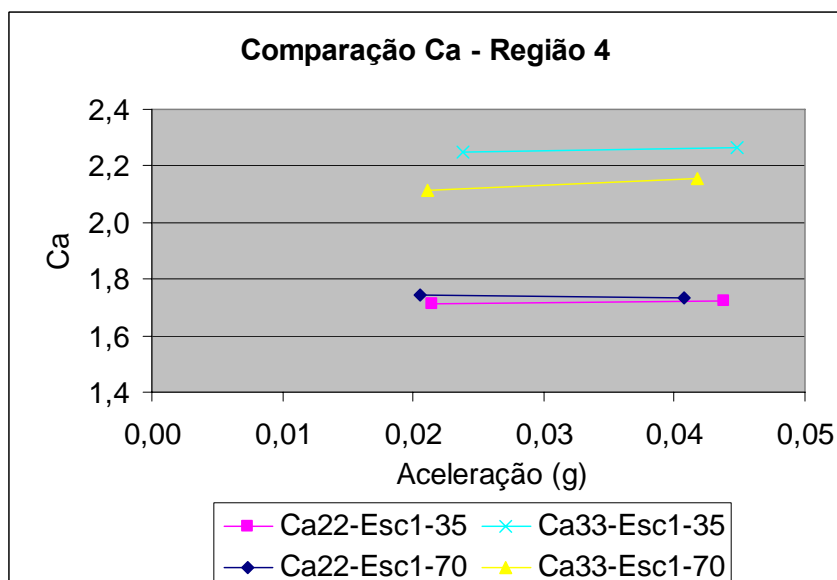


Figura 2.4.2.2.14: Comparação do Ca obtido pelas escalas na região 4.

2.4.2.3 Conclusão

As regiões analisadas 2 e 4, bem como as comparações com os resultados nas duas escalas, 1:35 e 1:70, sugerem os valores finais indicados na Tabela 2.4.2.3.1. Os resultados da região 1 são descartados pois nestes ocorrem variações maiores.

Tabela 2.4.2.3.1: Valores finais obtidos dos ensaios de reboque com aceleração uniforme.

	Ca ₁₁	Ca ₂₂	Ca ₂₂ com placa	Ca ₃₃
Região 2	1,24	1,71	1,51	2,27
Região 4	1,23	2,20	2,02	2,26
WAMIT V6.211	1,24	1,64	-	2,15

Primeiramente, da Tabela 2.4.2.3.1, cumpre notar que a influência da placa no *manifold* é diminuir a massa adicional. Isso ocorre tanto na região 2 (de 1,71 para 1,51) quanto na região 4 (de 2,20 para 2,02). De certa forma é um resultado inesperado. Entretanto, indica que a placa facilitaria o escoamento que passaria a ser menos perturbado pela porosidade maior no que tange a aceleração do fluido (efeito de massa adicional).

Em seguida, vê-se que para Ca₁₁ o resultado de ambas as regiões (2 e 4) dos ensaios são muito próximos da caixa envoltória, WAMIT V6.211, indicando ao longo do eixo X que a porosidade poderia ser considerada desprezível. A simetria é consistente com os resultados parecidos nas duas regiões.

Com relação à Ca₃₃ apesar da mesma ordem de grandeza (diferença menor do que 5%) do resultado com a caixa envoltória, seria de se esperar uma diferença mais significativa nos resultados na medida em que a falta de simetria na direção Z, indicaria resultados diferentes nas duas regiões. Mas essas considerações qualitativas não se respaldaram nos valores da prática.

Com relação à Ca₂₂ (e também Ca₂₂ com placa) há uma diferença significativa entre os valores da região 2 e 4. Na região 2 o corpo é desacelerado instantaneamente mas continua a se mover, ou seja o fluxo da esteira nunca alcança o corpo. Na região 4 por outro lado, o corpo vem desacelerando mas atinge a parada completa e, portanto, o fluxo da esteira atinge o corpo de modo completo, justificando a mudança de sinal observada nos ensaios na região 4 (Ver Figura 2.4.2.2.1). Entretanto, o fluxo que chega na região 4 é bem menos uniforme do que a uniformidade perfeita encontrada na região 2, o que pelos valores medidos levam a um aumento dos efeitos inerciais do fluido sobre o corpo conforme as medições realizadas. Estas considerações levam a descartar

os resultados da região 4 na medida que o maior interesse é no comportamento típico da região 2.

3 OBTENÇÃO DO ARRASTO

3.1 Coeficientes de Arrasto na Literatura (Norma DNV)

A norma DNV 30.5 fornece uma tabela de coeficientes de forma para o cálculo da força de vento em corpos tridimensionais tais como alojamentos de convés e estruturas similares colocadas sobre uma superfície horizontal. Esta tabela poderia ser aproveitada para avaliação da força de arraste de corpos similares submersos, em contato com o leito marinho ou uma superfície plana adjacente. A Tabela 3.1.1 reproduz a referida tabela (Table 5.5) da norma DNV e é citada em Paganelli (1997).

Tabela 3.1.1: Coeficiente de forma (mesmo que coeficiente de arrasto) para um prisma, norma 30.5 DNV.

Table 5.5 Shape coefficient C for three-dimensional bodies placed on a horizontal surface.

Plan shape	$\frac{l}{w}$	$\frac{b}{d}$	C_f for height/breadth ratio $\frac{h}{b}$						
			Up to 1	1	2	4	6		
	≥ 4	≥ 4	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6		
		$\leq 1/4$	0.7	0.7	0.75	0.75	0.75		
	3	3	1.1	1.2	1.25	1.35	1.4		
		$1/3$	0.7	0.75	0.75	0.75	0.8		
	2	2	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2		
		0.5	0.75	0.75	0.8	0.85	0.9		
	1.5	1.5	0.95	1.0	1.05	1.1	1.15		
		$2/3$	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0		
Plan shape	$\frac{l}{w}$	$\frac{b}{d}$	C_f for height/breadth ratio $\frac{h}{b}$						
	1	1	Up to 0.5	1	2	4	6	10	20
			0.9	0.95	1.0	1.05	1.1	1.2	1.4

b = the dimension of the member normal to the wind.
 d = the dimension of the member measured in the direction of the wind.
 l = the greater horizontal dimension.
 w = the lesser horizontal dimension of a member.
 Example A: $l = b, w = d$. Example B: $w = b, l = d$.

Utilizando a Tabela 3.1.1 para o caso do *manifold*, tem-se as razões $h/b = 5,149/8,500 = 0,610$ e $b/d = 8,500/16,635 = 0,510$ que resultam nos coeficientes $Cd_{11} = 0,75$, $Cd_{22} = 1,0$ e $Cd_{33} = 0,95$.

3.2 Obtenção do Arrasto Através de Ensaio de Reboque com Velocidade Constante

Neste método, os coeficientes de arrasto do manifold, nas direções X, Y e Z, são obtidos através de ensaios de reboque com o modelo, realizados pelo IPT (2005). O modelo ensaiado foi construído na escala 1:35. Os detalhes do ensaio foram descritos na seção 2.4.2.1.

Do ensaio, para cada valor de velocidade, tem-se valores para força do manifold + haste e força da haste.

O coeficiente de arrasto será calculado pela Equação:

$$Cd = \frac{F_D}{0,5\rho A_T V^2} \quad (3.2.1)$$

Onde F_D é a força de arrasto, V é a velocidade e A_T é a área transversal. A força no caso do *manifold*, F_{man} , é obtida pela diferença entre a força do *manifold* + haste, $F_{man+haste}$, e a força da haste, F_{haste} , ambas obtidas dos ensaios. A área transversal, A_T , varia com cada direção (X, Y, Z). A Tabela 3.2.1 mostra as dimensões e áreas utilizadas para cada direção.

Tabela 3.2.1: Dimensões do modelo e áreas utilizadas para cálculo do Cd.

Direção	Dimensão (Esc. 1:35)	Área (m ²)
X	0,4753	Y x Z = 0,0357
Y	0,2429	X x Z = 0,0699
Z	0,1471	X x Y = 0,1154

O número de Reynolds também é calculado para comparação com o coeficiente de arrasto. O número de Reynolds é obtido pela Equação (3.2.2):

$$Re_y = \frac{VL}{\nu} \quad (3.2.2)$$

Onde V é a velocidade, ν é a viscosidade cinemática e L é o comprimento do lado correspondente à área transversal, A_T .

➤ Cd em *surge*

O cálculo do Cd em *surge* (direção X) é feito pela Equação (3.2.1). A Tabela 3.2.2 apresenta os dados de V , $F_{man+haste}$ e F_{haste} obtidos dos ensaios de reboque com velocidade constante, e os resultados dos cálculos da força no manifold, F_{man} , e dos coeficientes de arrasto, Cd.

Tabela 3.2.2: Cd para a direção X, *surge*.

V (m/s)	$F_{man+haste}$ (g)	F_{haste} (g)	F_{man} (g)	Cd_{11}
0,098	26,579	3,639	22,940	1,320
0,098	25,724	3,659	22,065	1,261
0,201	101,675	10,134	91,541	1,254
0,201	99,133	10,147	88,986	1,216
0,301	211,292	16,656	194,636	1,185
0,401	378,175	23,335	354,841	1,218
0,500	589,944	30,184	559,760	1,232
0,501	587,553	30,206	557,347	1,225
0,600	838,397	37,239	801,159	1,225
0,700	1139,374	44,451	1094,923	1,231
0,800	1467,515	51,844	1415,671	1,220
0,899	1871,833	59,401	1812,432	1,235
0,899	1868,245	59,420	1808,825	1,232
0,999	2284,155	67,153	2217,002	1,225

O coeficiente de arrasto médio obtido em *surge* é: $Cd_{11} = 1,228$.

O número de Reynolds também foi calculado, através da Equação (3.2.2). Os resultados estão na Tabela 3.2.3, e a Figura 3.2.1 mostra a relação do Reynolds com o coeficiente de arrasto.

Tabela 3.2.3: Comparação do Rey com o Cd.

V (m/s)	Rey	Cd ₁₁
0,098	26263,885	1,320
0,098	26348,311	1,261
0,201	53826,213	1,254
0,201	53879,885	1,216
0,301	80720,668	1,185
0,401	107509,120	1,218
0,500	134255,976	1,232
0,501	134340,779	1,225
0,600	161095,417	1,225
0,700	187845,762	1,231
0,800	214591,276	1,220
0,899	241280,702	1,235
0,899	241347,525	1,232
0,999	268018,166	1,225

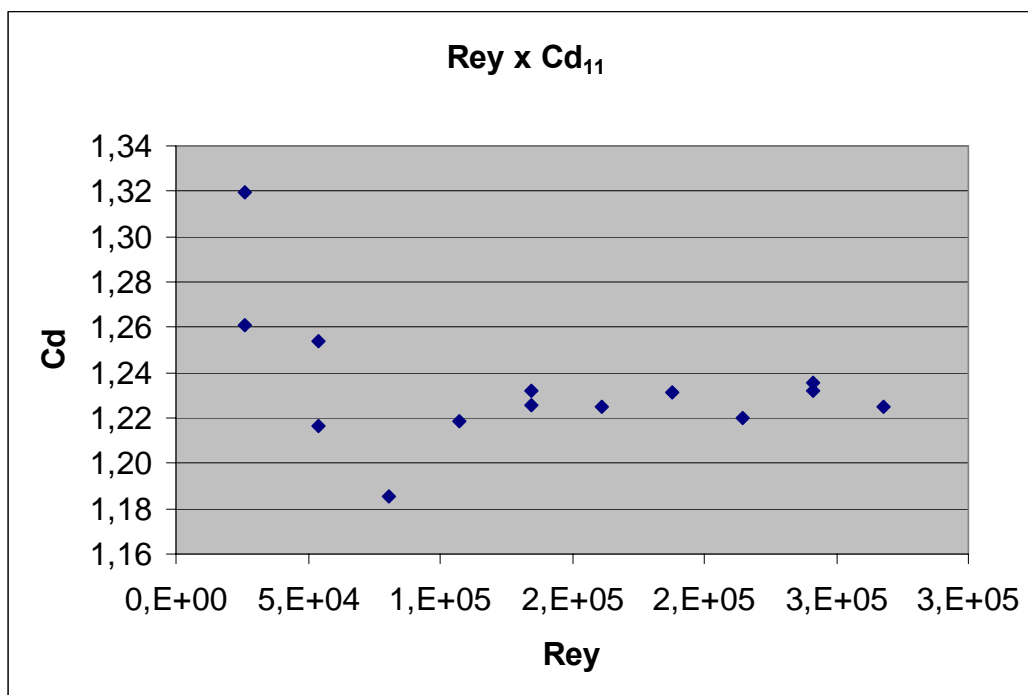


Figura 3.2.1: Variação do Cd com o Número de Reynolds.

Pela Figura 3.2.1, nota-se o aparecimento de uma região, $Rey = 10^5$, que pode ser interpretada como transição entre o escoamento laminar e o turbulento, e é típica em corpos mais simples como a esfera.

➤ Cd em *sway*

Na direção Y, foram feitos ensaios sem e com placa acoplada.

➤ Sem placa acoplada

O coeficiente de arrasto em *sway* (direção Y) foi calculado pela Equação (3.2.1). A Tabela 3.2.4 apresenta os dados utilizados para o cálculo e os resultados obtidos para o coeficiente de arrasto.

Tabela 3.2.4: Cd para a direção Y, *sway*.

V (m/s)	F_{man+haste} (g)	F_{haste} (g)	F_{man} (g)	Cd₂₂
0,098	45,366	3,655	41,710	1,219
0,098	45,435	3,673	41,762	1,213
0,200	179,377	10,126	169,250	1,185
0,201	182,905	10,147	172,758	1,206
0,301	386,777	16,653	370,124	1,151
0,401	683,202	23,344	659,858	1,156
0,500	1057,094	30,174	1026,919	1,155
0,501	1060,546	30,201	1030,345	1,157
0,600	1507,339	37,241	1470,098	1,148
0,700	2049,896	44,448	2005,448	1,152
0,700	2044,254	44,449	1999,805	1,148
0,800	2656,179	51,858	2604,321	1,145
0,899	3360,994	59,398	3301,597	1,149
0,999	4147,329	67,163	4080,166	1,151
0,999	4144,886	67,176	4077,710	1,149

O coeficiente de arrasto médio obtido em *sway* é: $Cd_{22} = 1,158$.

O número de Reynolds também foi calculado, através da Equação (3.2.2). Os resultados estão na Tabela 3.2.5, e a Figura 3.2.2 mostra a relação do Reynolds com o coeficiente de arrasto.

Tabela 3.2.5: Comparação do Rey com o Cd.

V (m/s)	Rey	Cd ₂₂
0,098	50473,663	1,219
0,098	50619,859	1,213
0,200	103115,156	1,185
0,201	103283,369	1,206
0,301	154702,827	1,151
0,401	206149,550	1,156
0,500	257277,852	1,155
0,501	257479,501	1,157
0,600	308811,510	1,148
0,700	360046,810	1,152
0,700	360056,584	1,148
0,800	411437,977	1,145
0,899	462476,257	1,149
0,999	513817,011	1,151
0,999	513902,403	1,149

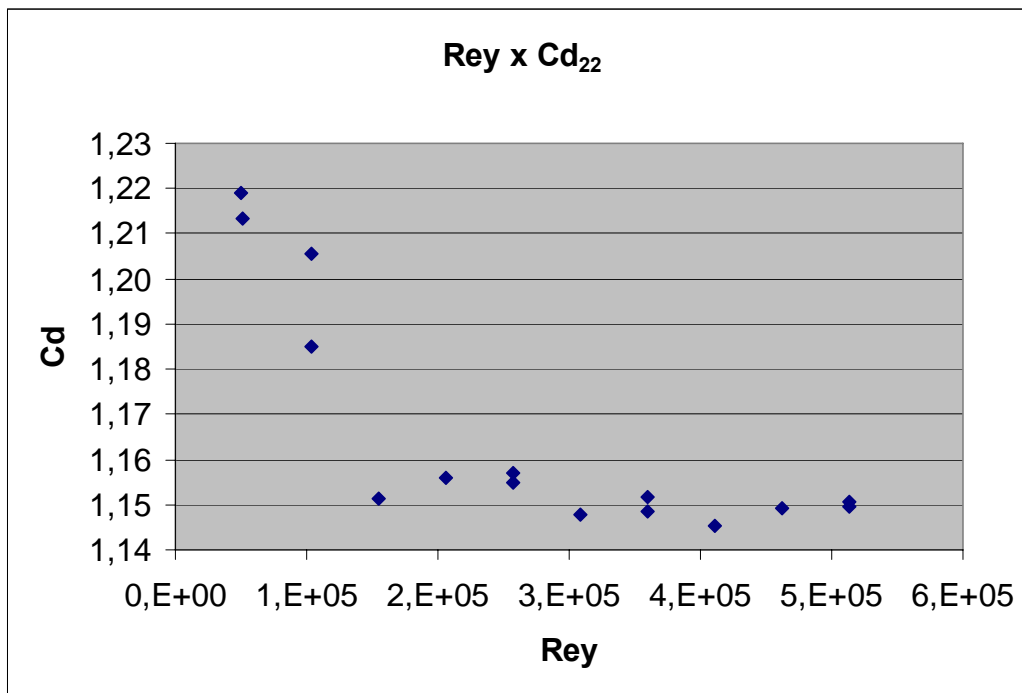


Figura 3.2.2: Variação do Cd com Reynolds.

➤ Com placa acoplada

Uma placa foi acoplada nos lados do modelo para a direção Y, conforme mostrado na Figura 2.4.2.1.4. A Tabela 3.2.6 mostra os valores de força e velocidade utilizados no cálculo do coeficiente de arrasto em Y, Cd_{22+pl} .

Tabela 3.2.6: Cd para a direção Y com placa, *sway*.

V (m/s)	F_{man+l_{am}} (g)	F_{lam} (g)	F_{man} (g)	C_{d_{22+pl}}
0,098	48,357	3,639	44,718	1,314
0,201	175,154	10,132	165,022	1,154
0,201	176,815	10,136	166,679	1,165
0,301	371,750	16,655	355,095	1,104
0,400	652,476	23,314	629,162	1,105
0,500	1010,539	30,184	980,355	1,102
0,600	1453,067	37,234	1415,833	1,106
0,700	1947,296	44,420	1902,876	1,094
0,799	2545,497	51,829	2493,668	1,098
0,904	3242,385	59,764	3182,621	1,096
0,999	3931,446	67,152	3864,294	1,090
0,999	3950,827	67,177	3883,650	1,095

O coeficiente de arrasto médio obtido em Sway, com a placa, é: $Cd_{22+pl} = 1,099$.

A Tabela 3.2.7, apresenta os resultados do cálculo do número de Reynolds e do coeficiente de arrasto. A Figura 3.2.3 mostra a relação do Reynolds com o coeficiente de arrasto.

Tabela 3.2.7: Relação entre Rey e Cd.

V (m/s)	Rey	Cd _{22+pl}
0,098	50335,956	1,314
0,201	103159,396	1,154
0,201	103190,260	1,165
0,301	154720,832	1,104
0,400	205920,123	1,105
0,500	257349,355	1,102
0,600	308763,156	1,106
0,700	359851,849	1,094
0,799	411237,356	1,098
0,904	464924,337	1,096
0,999	513745,508	1,090
0,999	513907,547	1,095

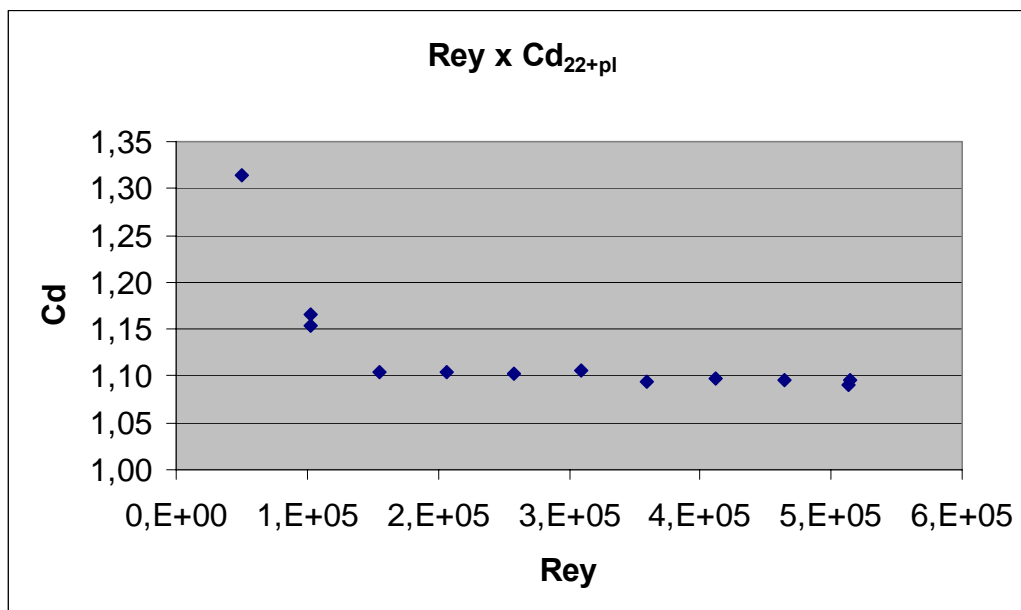


Figura 3.2.3: Variação do Cd com o Reynolds.

No caso das duas últimas figuras nota-se que há uma região de transição, $Rey = 10^5$, mas sem uma diminuição do arrasto. O patamar para Reynolds altos é razoavelmente constante.

➤ Cd em *heave*

O cálculo do Cd em *heave* (direção Z) foi feito utilizando a Equação (3.2.1). A Tabela 3.2.8 apresenta os dados utilizados para o cálculo e os resultados obtidos para o coeficiente de arrasto.

Tabela 3.2.8: Cd para a direção Z, *heave*.

V (m/s)	F_{man+haste} (g)	F_{haste} (g)	F_{man} (g)	Cd₃₃
0,098	94,609	3,667	90,943	1,602
0,098	95,742	3,678	92,063	1,616
0,201	347,465	10,158	337,308	1,422
0,201	357,680	10,158	347,522	1,465
0,301	769,214	16,658	752,556	1,416
0,401	1367,926	23,336	1344,590	1,426
0,501	2043,512	30,214	2013,298	1,367
0,501	2064,483	30,219	2034,264	1,381
0,601	2991,797	37,259	2954,538	1,395
0,700	4069,071	44,452	4024,619	1,399
0,700	3999,472	44,471	3955,001	1,373
0,800	5262,119	51,888	5210,231	1,385
0,900	6569,480	59,446	6510,034	1,369
0,999	8306,341	67,212	8239,128	1,404
1,000	8319,891	67,228	8252,663	1,406

O coeficiente de arrasto médio obtido em *heave* é: $Cd_{33} = 1,401$.

O número de Reynolds também foi calculado, através da equação (3.2.2). Os resultados estão na Tabela 3.2.9, e a Figura 3.2.4 mostra a relação do Reynolds com o coeficiente de arrasto.

Tabela 3.2.9: Resultados do Reynolds e comparação com o Cd.

V (m/s)	Rey	Cd ₃₃
0,098	50333,924	1,602
0,098	50430,546	1,616
0,201	102890,097	1,422
0,201	102893,681	1,465
0,301	154027,922	1,416
0,401	205141,170	1,426
0,501	256385,499	1,367
0,501	256419,294	1,381
0,601	307521,788	1,395
0,700	358414,859	1,399
0,700	358547,989	1,373
0,800	409743,163	1,385
0,900	460666,956	1,369
0,999	511772,010	1,404
1,000	511871,858	1,406

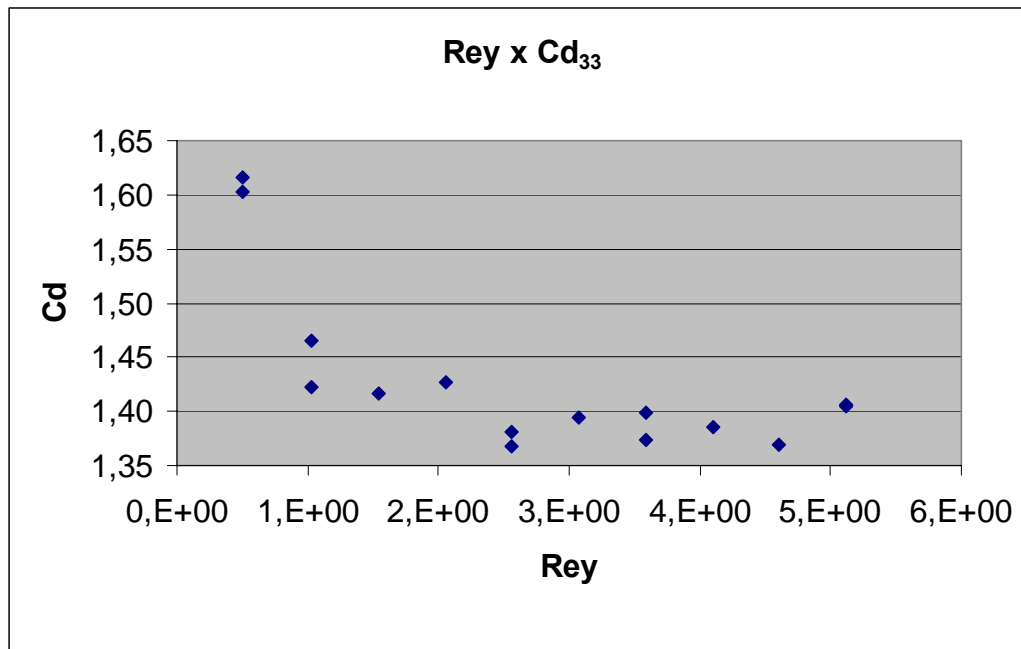


Figura 3.2.4: Variação do Cd com o Número de Reynolds.

➤ Conclusão

A partir dos dados de força do *manifold* + haste, força da haste e velocidade, obtidos pelos ensaios do IPT (2005), foi possível calcular os coeficientes de arrasto nas direções X, Y e Z. Os coeficientes finais de arrasto obtidos depois da transição, Re_y maiores do que 2×10^5 são apresentados na Tabela 3.2.10. É importante mencionar que para a placa acoplada nos ensaios na direção Y, a mesma área projetada da envoltória é utilizada para a adimensionalização.

Tabela 3.2.10: Valores finais de Cd para as direções X, Y e Z.

Cd₁₁	Cd₂₂	Cd_{22+pl}	Cd₃₃
1,228	1,158	1,099	1,401

Analisando-se a Tabela 3.2.10, nota-se que os valores dos coeficientes de arrasto em X, Cd_{11} , e em Z, Cd_{33} , são bem maiores do que os obtidos pela norma 30.5 da DNV ($Cd_{11} = 0,75$ e $Cd_{33} = 0,95$). Já o coeficiente de arrasto em Y, com a placa acoplada, é igual ao obtido através da DNV.

4 OBTENÇÃO SIMULTÂNEA DA MASSA ADICIONAL E DO ARRASTO

4.1 Lançamento Vertical

O lançamento vertical é um método de estimativa numérica dos coeficientes de massa adicional e arrasto para *surge*, *sway* e *heave* a partir de ensaios experimentais realizados em um tanque oceânico com 15 metros de profundidade. Foram realizados vários ensaios verticais com um modelo de *manifold*, o mesmo apresentado nas Figuras 2.4.2.1.1 e 2.4.2.1.2.

A partir das séries temporais, deslocamento X tempo, obtidas pelo sistema de filmagem dos ensaios verticais realizados no tanque oceânico do LabOceano, analisou-se os resultados de deslocamento no eixo Z através do ajuste de modelo matemático sugerido pela planilha EMM (Modelo de Extrapolação Matemática), (Fernandes 2005).

No modelo matemático da planilha EMM, a velocidade terminal é obtida através do balanço entre o arrasto (com um coeficiente de arrasto constante) e a gravidade. Existe também um tempo de aceleração no qual a massa adicional também é significativa. Em princípio, durante a aceleração, o coeficiente de arrasto pode não ser constante, no entanto, devido a observações fenomenológicas, isso não influencia muito. Considerando as forças atuantes, a velocidade terminal, segundo o modelo de extrapolação matemática, EMM, é dada por:

$$V_T = \sqrt{\frac{(m - \rho \nabla)g}{\frac{1}{2} \rho C d A_F}} \quad (4.1.1)$$

Onde:

m : massa do *manifold*.

ρ : densidade da água.

∇ : volume deslocado.

g : aceleração da gravidade.

A_F : área frontal.

Cd : coeficiente de arrasto.

A Equação (4.1.1) é bem conhecida na literatura como em White (1994). Agora, considerando a Segunda Lei de Newton durante o período de aceleração, pode-se obter a Equação (4.1.2).

$$(m + ma) \frac{dV}{dt} = \alpha - \beta V^2 \quad (4.1.2)$$

Onde:

$$\alpha \equiv (m - \rho \nabla)g \quad (4.1.3)$$

$$\beta \equiv \frac{1}{2} \rho A_F C d \quad (4.1.4)$$

E as outras variáveis são:

ma : massa adicional do *manifold*.

V : velocidade instantânea do *manifold*.

Sob a hipótese de Cd constante, presente em β na Equação (4.1.4), a Equação (4.1.2) pode ser rearranjada e integrada, levando à solução simples mostrada na Equação (4.1.5).

$$V = Atgh(B + Ct) \quad (4.1.5)$$

Onde:

$$A \equiv \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (4.1.6)$$

$$B \equiv arctgh\left(\frac{V_0}{A}\right) \quad (4.1.7)$$

$$C \equiv \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{(m + ma)} \quad (4.1.8)$$

Na Equação (4.1.7), V_0 , é a velocidade inicial, a qual é importante para ajustar o período inicial de aceleração. Nesse período inicial de aceleração, além da variação do coeficiente de arrasto, a massa adicional tem um comportamento particular devido ao impulso logo após o lançamento.

Em princípio, a velocidade terminal é atingida na Equação (4.1.1) somente quando $t \rightarrow \infty$ na Equação (4.1.5). Na prática, é suficiente considerar 99% dos valores finais para obtê-la. Nesse caso, o segundo período de aceleração pode ser escrito como mostra a Equação (4.1.9).

$$T_{0,99} = \frac{arctgh\left(\frac{0,99v_T}{A}\right) - B}{C} \quad (4.1.9)$$

Finalmente, com a solução da Equação (4.1.5) por integração, é possível obter o deslocamento (s), Equação (4.1.10), e por derivação, a aceleração (a), Equação (4.1.11), através do segundo período de aceleração.

$$s = \frac{A}{C} \ln \cosh(B + Ct) \quad (4.1.10)$$

$$a = \frac{AC}{\cosh^2(B + Ct)} \quad (4.1.11)$$

As equações acima são usadas para obter os parâmetros dos ensaios de lançamento vertical no modelo de extrapolação matemática (EMM). A extrapolação é necessária pois o tanque oceânico tem profundidade finita de 15 m e o lançamento tem que ser interrompido.

Considerando as Equações mostradas, na planilha do EMM, entrou-se com os dados dimensionais do *manifold* e variou-se então 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, obtém-se os coeficientes de massa adicional e arrasto corretos.

As Figuras 4.1.1 e 4.1.2 apresentam respectivamente as curvas de deslocamento e velocidade para o ensaio vertical na direção do eixo X, V35XL1 (ensaio vertical, eixo X, série de dados L1). O coeficiente de massa adicional, Ca_{11} , obtido pela planilha é igual a 1,24, e o coeficiente de arrasto, Cd_{11} é igual a 1,23, mesmos resultado do caso de *steady flow* (ensaio de reboque com aceleração uniforme).

Ensaio V35XL1 - Deslocamento em X

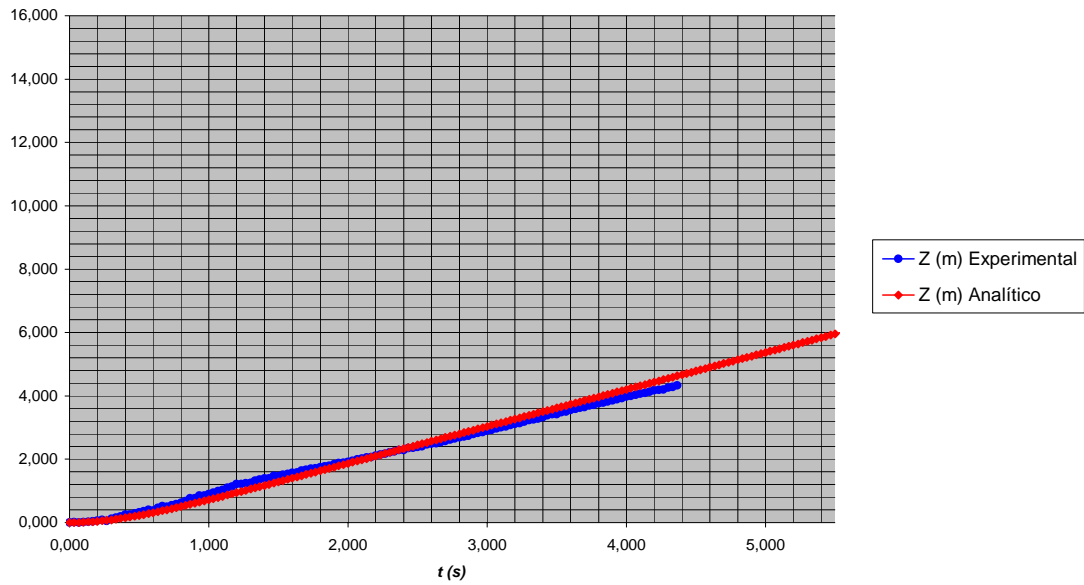


Figura 4.1.1: Deslocamento do ensaio vertical no eixo X.

Ensaio V35XL1 - Velocidade em X

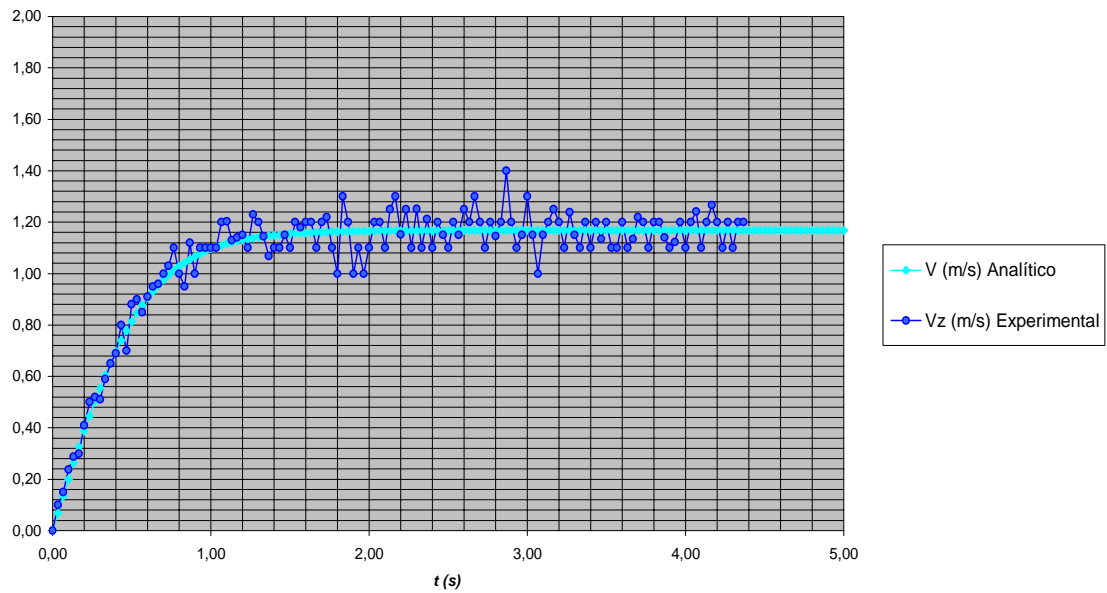


Figura 4.1.2: Velocidade do ensaio vertical no eixo X.

As Figuras 4.1.3 e 4.1.4 apresentam respectivamente as curvas de deslocamento e velocidade para o ensaio vertical na direção do eixo Y, V35YL2, ajustadas com $Ca_{22} = 1,71$ (mesmo resultado da região 2 do *steady flow*) e $Cd_{22} = 1,16$.

Ensaio V35YL2 - Deslocamento em Y

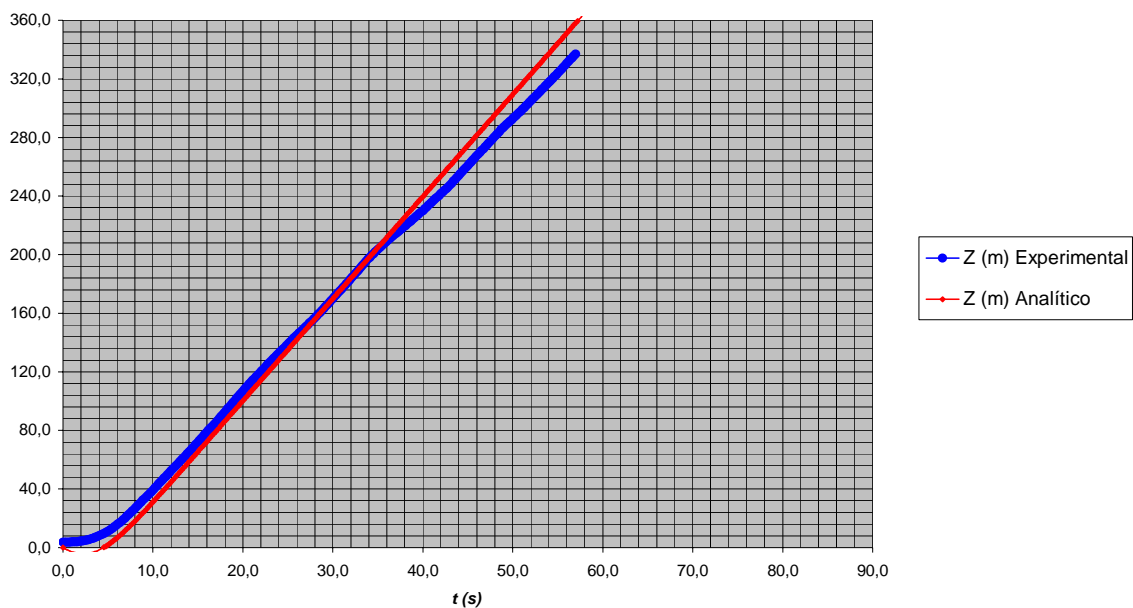


Figura 4.1.3: Deslocamento do ensaio vertical no eixo Y.

Ensaio V35YL2 - Velocidade em Y

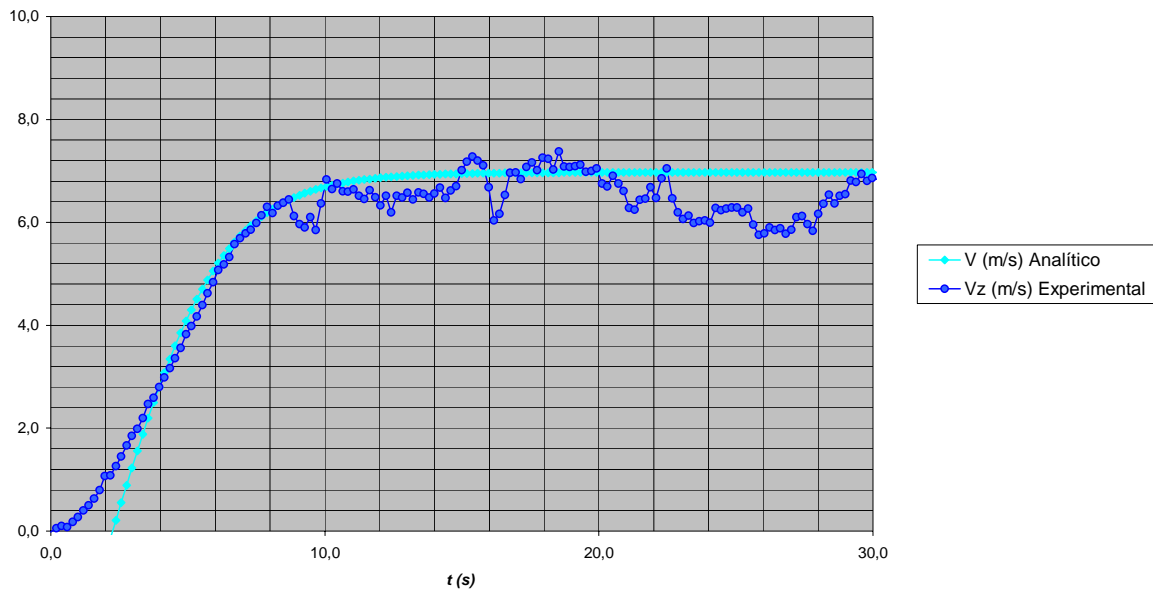


Figura 4.1.4: Velocidade do ensaio vertical no eixo Y.

As Figuras 4.1.5 e 4.1.6 apresentam respectivamente as curvas de deslocamento e velocidade para o ensaio vertical na direção do eixo Z, V35ZL4, com $Ca_{33} = 2,26$ e $Cd_{33} = 1,40$, confirmando os resultados dos ensaios de reboque.

Ensaio V35ZL4 - Deslocamento em Z

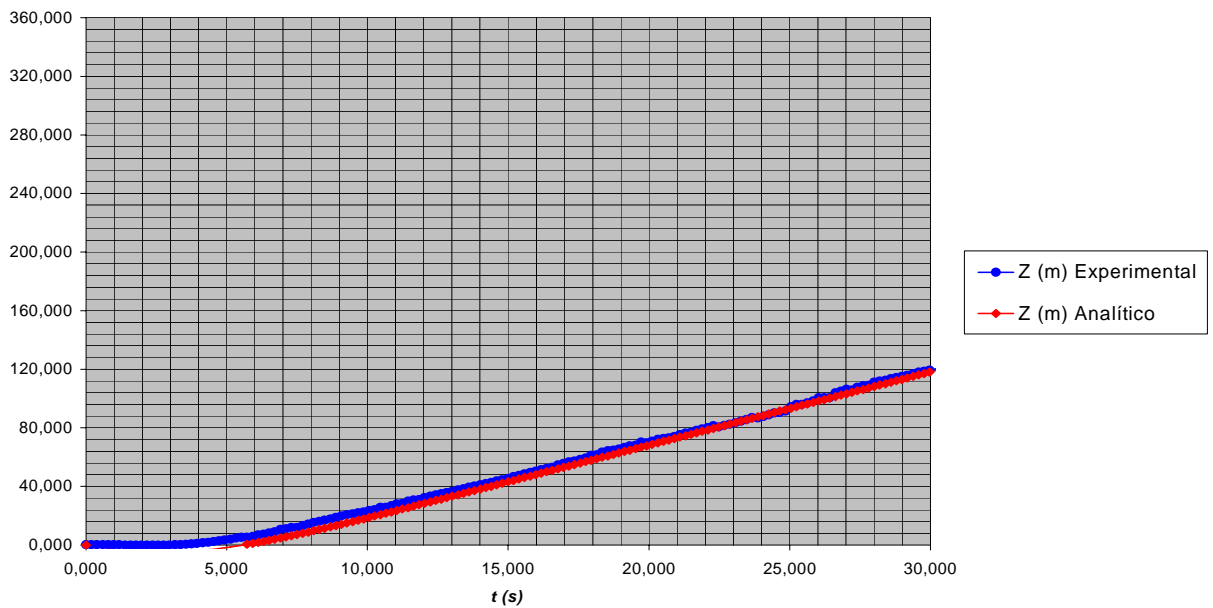


Figura 4.1.5: Deslocamento do ensaio vertical no eixo Z.

Ensaio V35ZL4 - Velocidade em Z

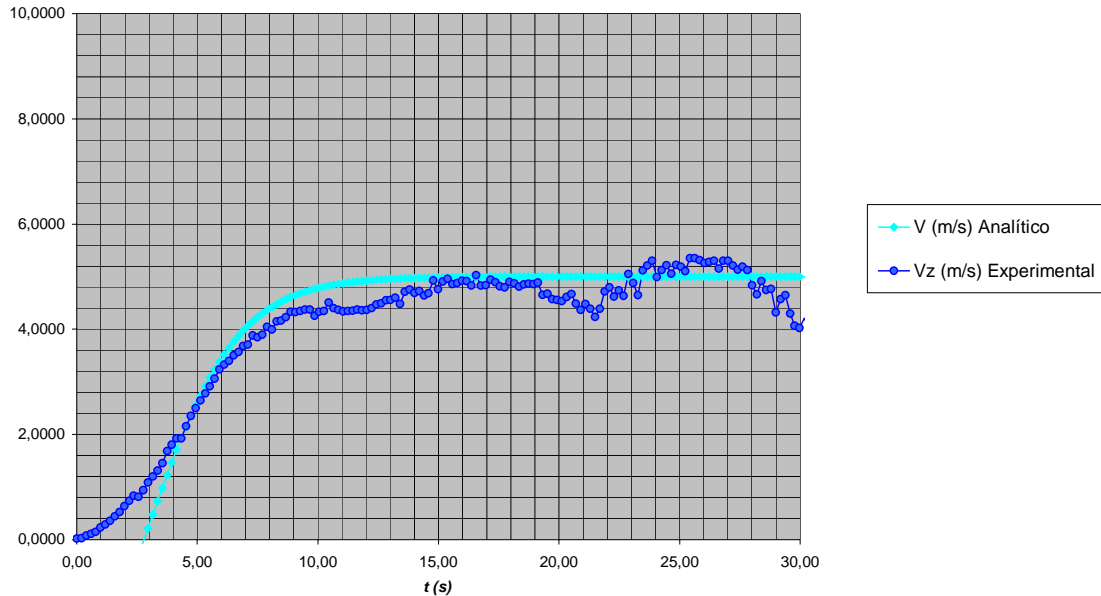


Figura 4.1.6: Velocidade do ensaio vertical no eixo Z.

As curvas do modelo experimental, apresentadas nas Figuras 4.1.2, 4.1.4 e 4.1.6, referentes aos ensaios verticais realizados no LabOceano possuem oscilações devido a problema de estabilidade no lançamento e à porosidade do *manifold*, que desviam este de sua trajetória uniforme. Porém, a média das curvas do modelo experimental coincide com a curva do modelo numérico, ratificando-se assim os coeficientes de massa adicional e arrasto obtidos pelo método de ensaios de reboque, *steady flow*.

A planilha EMM foi desenvolvida para trajetórias uniformes por isso não há total exatidão nas curvas do modelo experimental. Para solucionar os problemas de estabilidade, poder-se-ia utilizar estabilizadores nos modelos de *manifold* ou ainda alterar a posição do CG.

4.2 Ensaios de Oscilação Forçada

4.2.1 Descrição dos Ensaios de Oscilação Forçada

Os ensaios de oscilação forçada foram realizados com os dois modelos de *manifold* utilizados para os ensaios de reboque, segundo a direção dos eixos X, Y e Z (M452), e dos eixos Y e Z (M453), no Tanque de Provas do Agrupamento de Engenharia Naval e Oceânica da Divisão de Tecnologia de Transportes do IPT.

No ensaio de oscilação forçada, o modelo, submerso, foi fixado na extremidade inferior de uma haste vertical, parte de um dispositivo que permitia o movimento oscilatório dessa haste. Foram medidos força, aceleração e deslocamento, para diversas frequências de oscilação.

O dispositivo de oscilação foi composto basicamente de um motor de passo, controlado eletronicamente, com o eixo, de rotação reversível, acoplado a um fuso com caixa de conversão de movimento rotativo para alternativo. A caixa de conversão foi ligada a uma haste vertical, movimentando-se entre dois guias, e na extremidade inferior dessa haste foi fixado o modelo de *manifold*. A haste foi imersa a uma profundidade adequada para não haver efeitos de superfície livre.

Os instrumentos de medição utilizados foram: célula de carga “Interface – SSMAT-100” (força); acelerômetro “Kyowa – 1G” (aceleração) e LVDT (*linear variable differential transformer*) “Schaevitz 5000 DC-D” (amplitude do movimento).

O esquema do sistema utilizado no ensaio de oscilação é apresentado na Figura 4.2.1.1.

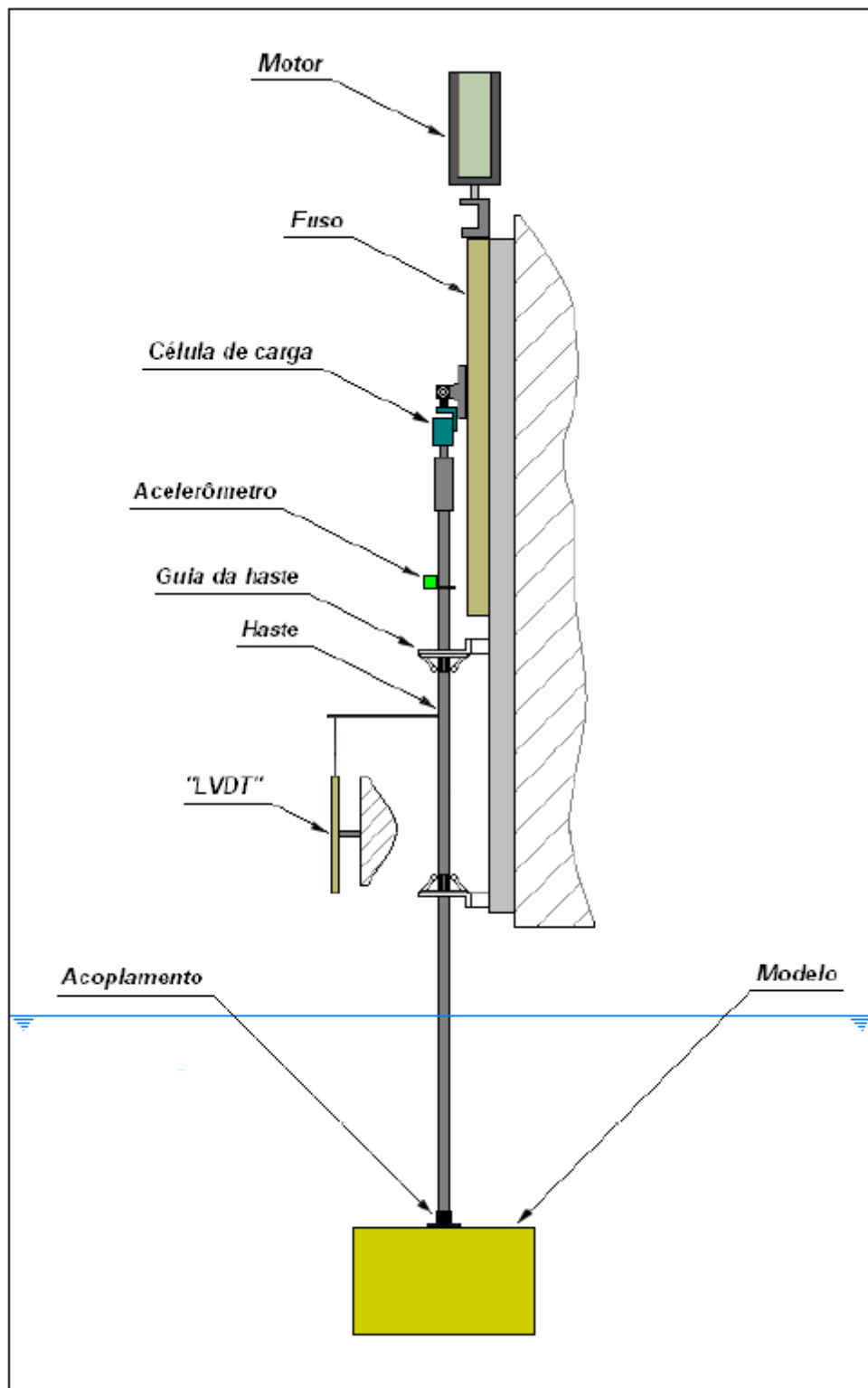


Figura 4.2.1.1: Esquema do ensaio de oscilação forçada.

As Figuras 4.2.1.2 e 4.2.1.3 mostram aspectos do dispositivo de ensaio de oscilação forçada.



Figura 4.2.1.2: Aspecto do dispositivo de ensaio de oscilação forçada.

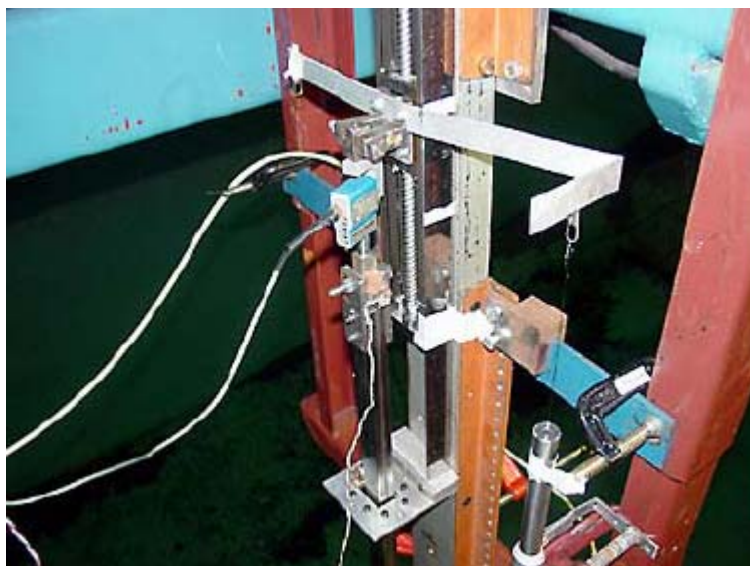


Figura 4.2.1.3: Aspecto do dispositivo de ensaio de oscilação forçada.

As Figuras 4.2.1.4 a 4.2.1.6 mostram o modelo 1:35 durante o ensaio de oscilação forçada, para os eixos X, Y e Z respectivamente.



Figura 4.2.1.4: Modelo na escala 1:35 no ensaio de oscilação forçada, eixo X.



Figura 4.2.1.5: Modelo na escala 1:35 no ensaio de oscilação forçada, eixo Y.

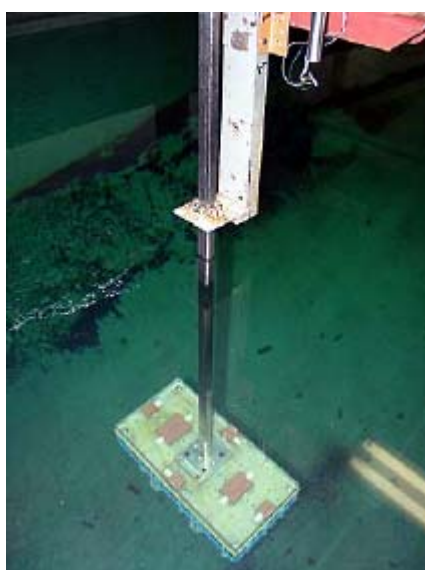


Figura 4.2.1.6: Modelo na escala 1:35 no ensaio de oscilação forçada, eixo Z.

As Figuras 4.2.1.7 e 4.2.1.8 apresentam o modelo de *manifold* na escala 1:70 durante os ensaios de oscilação forçada nos eixos Y e Z respectivamente.



Figura 4.2.1.7: Modelo na escala 1:70 no ensaio de oscilação forçada, eixo Y.

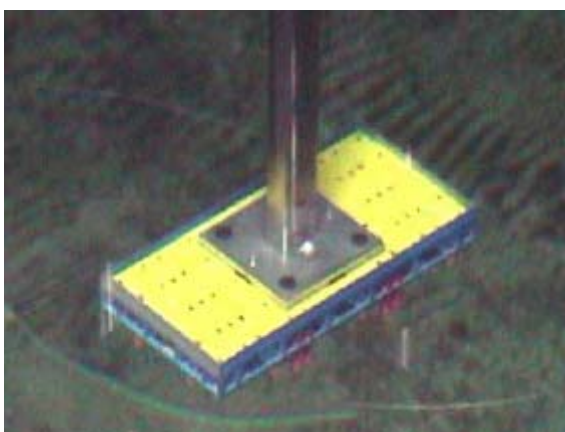


Figura 4.2.1.8: Modelo na escala 1:70 no ensaio de oscilação forçada, eixo Z.

4.2.2 Números de Reynolds e Keulegan-Carpenter

A partir dos dados dos ensaios de oscilação forçada obtidos pelo IPT (2005), foram calculados o número de Reynolds e o número de KC (Keulegan-Carpenter) para as três direções (X, Y e Z), comparando-se estes posteriormente com o coeficiente de massa adicional, Ca , e com o coeficiente de arrasto, Cd .

O número de Reynolds ($Re y_m$) foi obtido através dos dados de velocidade máxima dos ensaios de oscilação forçada, V_m , e o número de Keulegan-Carpenter (KC) através dos dados de amplitude, A , utilizando-se as Equações (4.2.2.1) e (4.2.2.2):

$$Re y_m = \frac{V_m L}{\nu} \quad (4.2.2.1)$$

$$KC = 2\pi \frac{A}{L} \quad (4.2.2.2)$$

Onde, ν é a viscosidade cinemática e L é um comprimento característico (para oscilação na direção X, L é o comprimento do *manifold*; em Y, L é a largura e em Z, L é a altura).

4.2.3 Obtenção dos Coeficientes de Massa Adicional

Os coeficientes de massa adicional foram calculados para os três eixos, X, Y e Z, no modelo 1:35 e para os eixos Y e Z, no modelo 1:70. O coeficiente de massa adicional foi obtido para a caixa envoltória, pela Equação (4.2.3.1):

$$Ca = \frac{Ma}{\rho \nabla} \quad (4.2.3.1)$$

Onde Ma é a massa adicional e ∇ é o volume da envoltória do manifold. As tabelas com os dados obtidos dos ensaios de oscilação forçada são apresentadas no anexo A.

As Figuras 4.2.3.1 a 4.2.3.10 mostram a variação do coeficiente de massa adicional com os números de Reynolds e de KC. Nas Figuras inseriu-se também a curva do resultado do ensaio em regime permanente (*steady flow*) obtidas dos ensaios de reboque com aceleração uniforme (2.4), para efeito de comparação.

As Figuras 4.2.3.1 e 4.2.3.2 mostram a variação do Ca para oscilação na direção X.

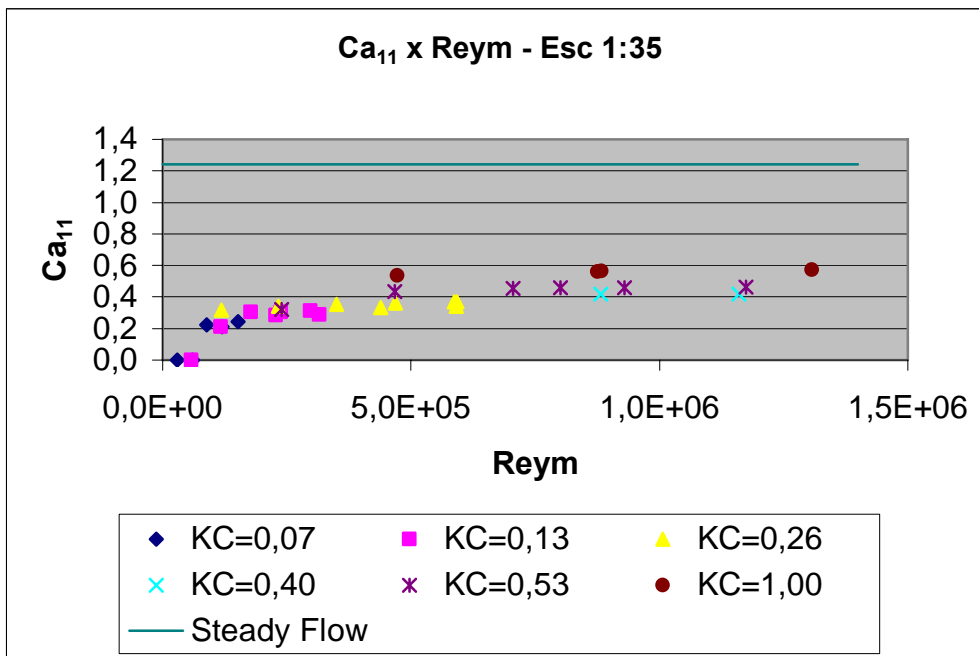


Figura 4.2.3.1: Ca_{11} variando com Re_{ym} .

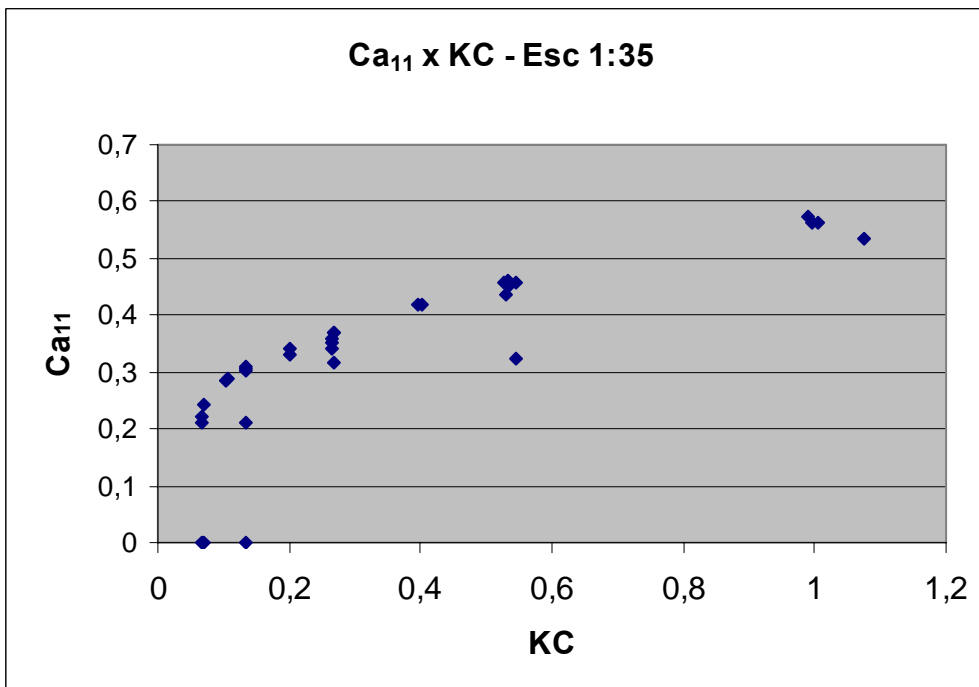


Figura 4.2.3.2: Ca_{11} variando com o KC.

Pelas Figuras 4.2.3.1 e 4.2.3.2, observa-se que o valor para Ca_{11} aparentemente assintótico para KC grande é igual a 0,57. Nota-se ainda que para baixos valores de KC tem-se coeficientes de massa adicionais pequenos.

Nas Figuras 4.2.3.3 e 4.2.3.4, observam-se a variação do Ca respectivamente com o número de Reynolds e com o KC , no eixo Y, com escala 1:35.

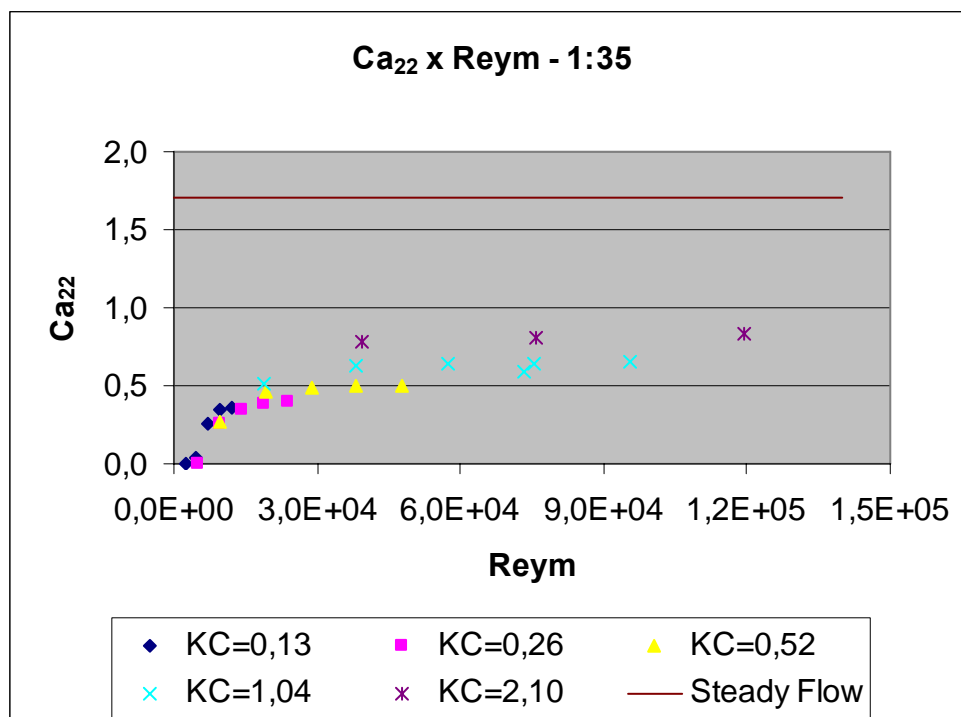


Figura 4.2.3.3: Ca em Y variando com o Re_{ym} .

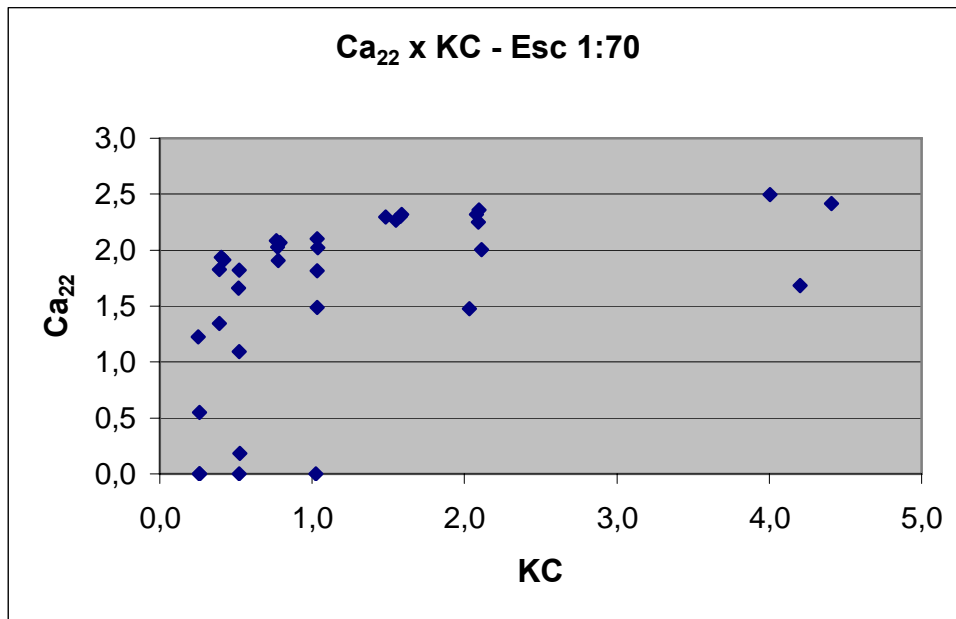


Figura 4.2.3.6: Ca_{22} variando com KC na escala 1:70.

Pelas Figuras 4.2.3.5 e 4.2.3.6, observa-se que o valor para Ca_{22} aparentemente assintótico para KC grande é igual a 2,50, na escala 1:70.

As Figuras 4.2.3.7 e 4.2.3.8 mostram a variação do coeficiente de massa adicional em Z respectivamente com o número de Reynolds e com o KC, na escala 1:35.

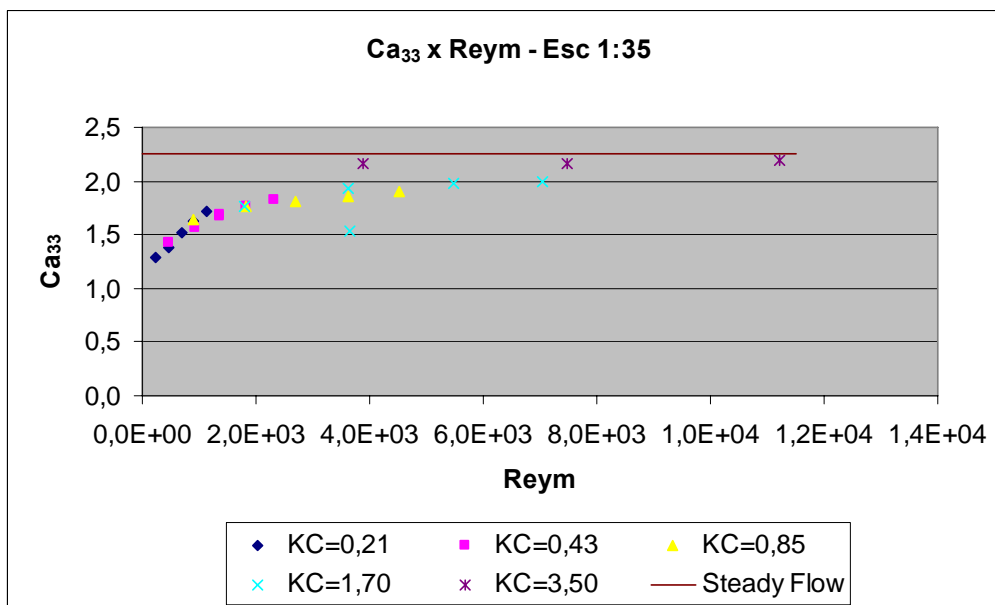


Figura 4.2.3.7: Ca_{33} em função do número de Reynolds, escala 1:35.

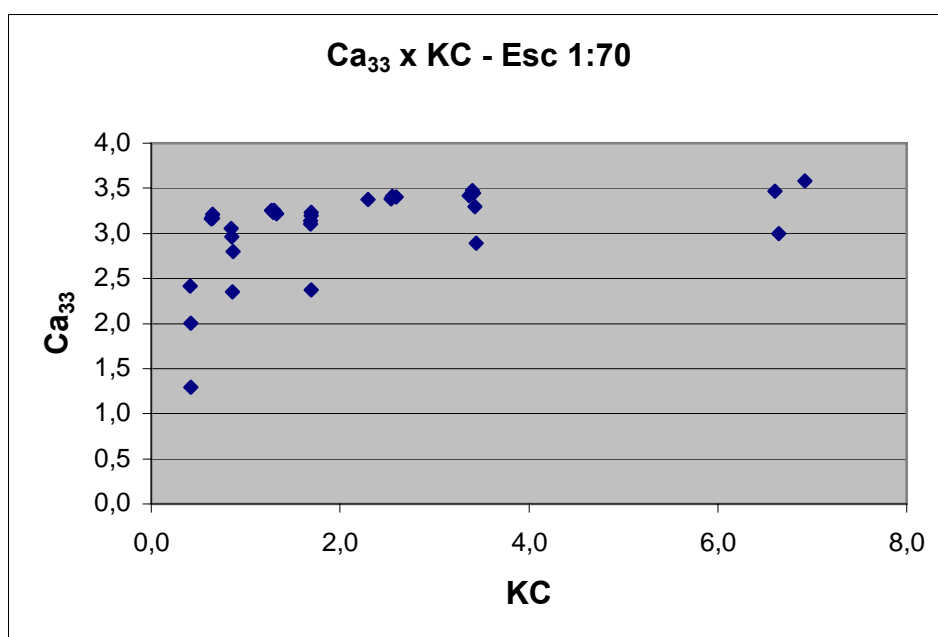


Figura 4.2.3.10: Ca_{33} variando com o número de Keulegan-Carpenter.

Pelas Figuras 4.2.3.9 e 4.2.3.10, observa-se que o valor para Ca_{33} aparentemente assintótico para KC grande é igual a 3,50, na escala 1:70.

4.2.3.1 MARINTEK (2002)

Para complementação do método de oscilação forçada, foram adicionados resultados de Ca em ensaios de oscilação forçada de um estudo realizado pela MARINTEK (2002) para a Petrobras, a fim de comparar estes com os resultado de Ca obtidos das análises dos ensaios do IPT (2005).

Os ensaios da MARINTEK (2002) foram realizados considerando uma caixa com as características da Tabela 4.2.3.1.1.

Tabela 4.2.3.1.1: Características da caixa nos ensaios da MARINTEK (2002).

Comprimento (L)	9,0 m
Largura (B)	9,0 m
Altura (H)	5,4 m
Comprimento característico (D)	9,0 m
Volume (V)	437,4 m ³
Massa (M)	220 t

A Figura 4.2.3.1.1 a seguir, mostra a comparação dos resultados de Ca obtidos pela análise dos resultados do IPT com os resultados dos ensaios realizados no estudo da MARINTEK (2002).

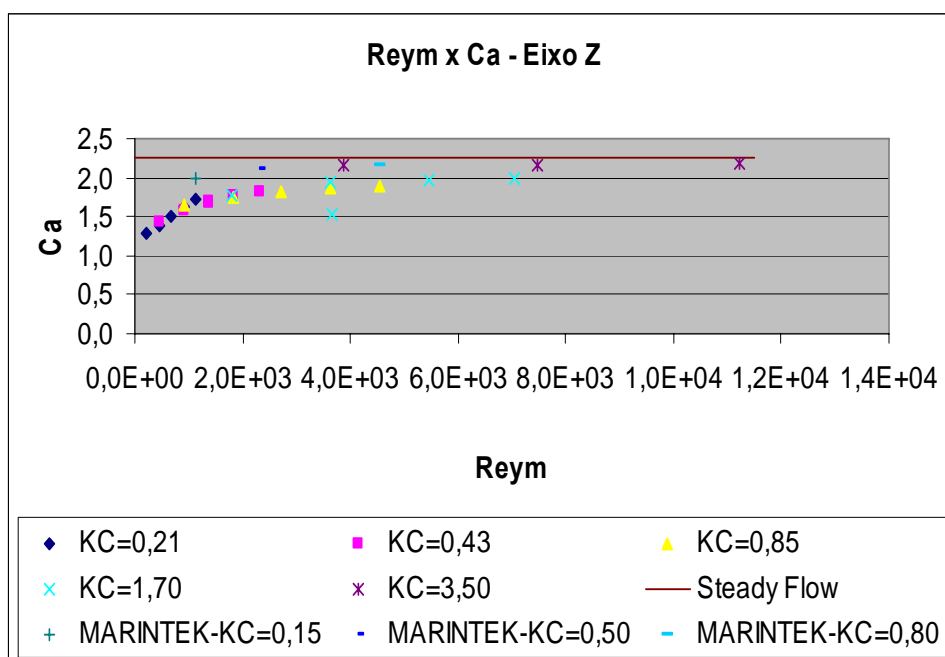


Figura 4.2.3.1.1: Comparação com valores de Ca da MARINTEK (2002).

Pela Figura 4.2.3.1.1, pode-se notar que o valor de Ca da MARINTEK (2002), 2,15, para KC = 0,80, é semelhante ao resultado obtido pelos ensaios de oscilação forçada do IPT (2005).

4.2.3.2 Conclusões sobre Ca

Na Tabela 4.2.3.2.1 a seguir, encontram-se valores de todos os coeficientes de massa adicional obtidos para os eixos X, Y e Z, nas escalas 1:35 e 1:70, em regime permanente (*steady flow*) e com oscilação forçada. Por essa tabela, conclui-se que os valores de Ca_{11} e Ca_{22} , para oscilação forçada, estão bem abaixo do caso de *steady flow* na escala de 1:35 enquanto que os valores para Ca_{33} de oscilação forçada e regime permanente (*steady flow*) se aproximam mais. A razão disso é que o modelo do *manifold* é mais poroso lateralmente do que na direção Z. Na escala 1:70, os coeficientes de massa adicional obtidos em regime permanente (*steady flow*) e na oscilação forçada, para as direções Y e Z, são maiores para o caso forçado, o que indicaria, talvez, um efeito de massa agregada. Na Tabela 4.2.3.2.1, inclui-se os valores de Ca_{33} obtidos através da MARINTEK (2002) e de Blevins (1979). Este último está bem próximo dos casos de *steady flow*, escala 1:35, e do lançamento vertical, enquanto que o Ca_{33} da MARINTEK (2002) é próximo à escala 1:70 do *steady flow* e também à escala 1:35 da oscilação forçada. Resultado esperado já que a MARINTEK (2002) realizou ensaios de oscilação forçada.

Tabela 4.2.3.2.1: Tabela comparativa dos valores de Ca obtidos considerando valores grandes de KC.

	Ca_{11}	Ca_{22}	Ca_{33}
Steady Flow 1:35	1,24	1,71	2,26
Osc. Forc. 1:35	0,57	0,84	2,19
Steady Flow 1:70	-	1,70	2,16
Osc. Forc. 1:70	-	2,50	3,50
Blevins (1979)	-	-	2,30
Ensaio Vertical LabOceano	1,24	1,71	2,26
MARINTEK (2002)	-	-	2,15

A conclusão sugerida pela Tabela 4.2.3.2.1 é descartar os valores na escala 1:70 (que estariam com efeito escala) e considerar apenas os valores da escala 1:35. Pela geometria do *manifold*, há consistência relativa nos resultados da escala 1:35.

Nota-se que os valores de oscilação forçada a menos dos valores para Z, são bem diferentes dos obtidos para regime permanente (*steady flow*). Estes últimos já foram analisados inclusive em comparação com resultados para a caixa envoltória obtidos da teoria de potencial (2.3). Ao contrário da direção em Z, que devido à base é relativamente fechada, os valores menores se justificariam devido à porosidade na direção X e Y. Isso afetaria de modo diferente (à direção Z) a volta do escoamento imposta pela oscilação forçada.

4.2.4 Obtenção dos Coeficientes de Arrasto

Os coeficientes de arrasto foram calculados para os três eixos, X, Y e Z, no modelo 1:35 e para os eixos Y e Z, no modelo 1:70.

O coeficiente de arrasto foi obtido pela Equação (4.2.4.1):

$$Cd = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho A V_m^2} \quad (4.2.4.1)$$

Onde:

F_d : Força de arrasto

ρ : Densidade da água

A: Área frontal em relação à direção do escoamento

V_m : Velocidade máxima

Os valores de velocidade foram obtidos através dos resultados dos ensaios do IPT (2005).

As Figuras 4.2.4.1 a 4.2.4.10 a seguir mostram os coeficientes de arrasto comparados com o número de Reynolds e com KC. Nas Figuras inseriu-se o resultado do ensaio em regime permanente (*steady flow*) para efeito de comparação.

As Figuras 4.2.4.1 e 4.2.4.2 mostram a variação do C_d para oscilação na direção do eixo X.

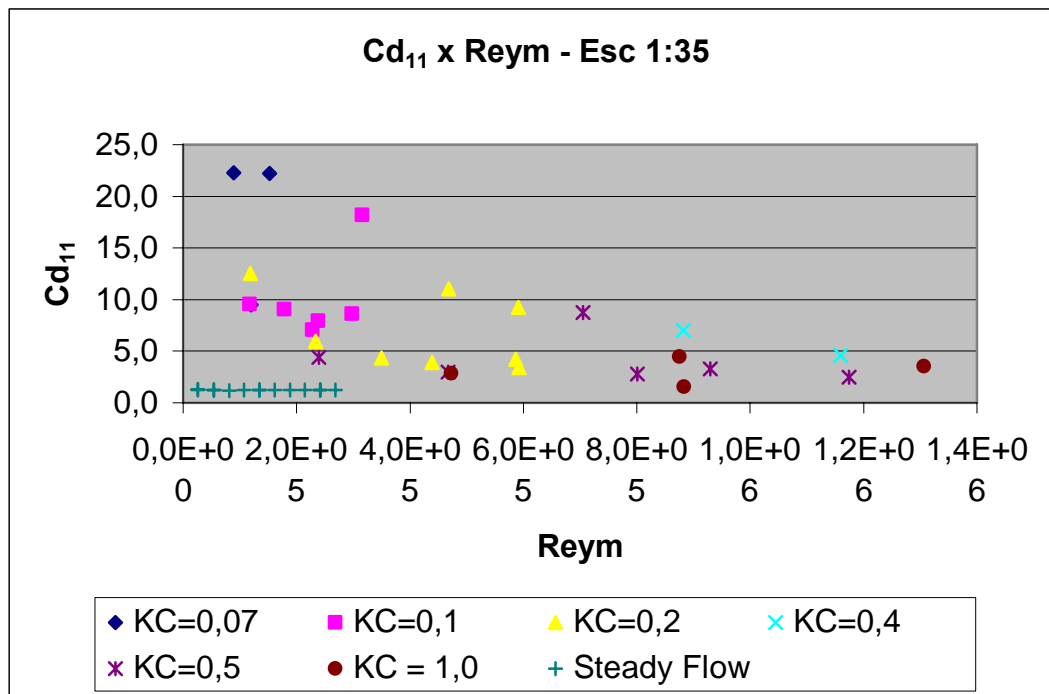


Figura 4.2.4.1: Cd_{11} variando com Reym.

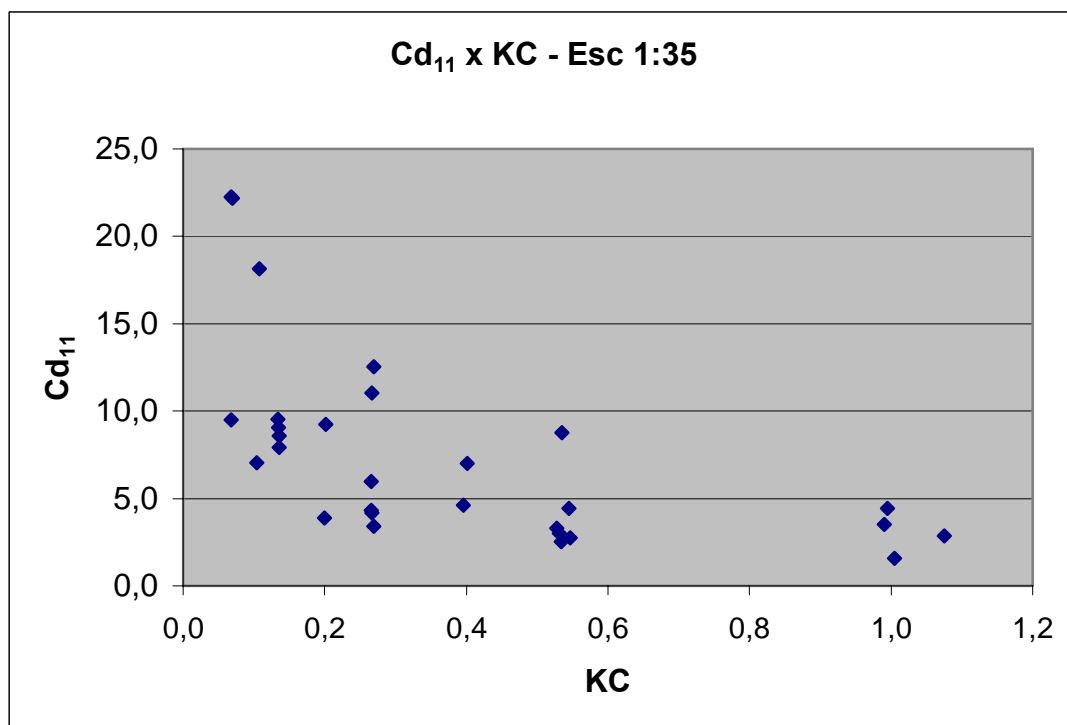


Figura 4.2.4.2: Cd_{11} variando com o KC.

Pelas Figuras 4.2.4.1 e 4.2.4.2, observa-se um coeficiente de arrasto em X, assintótico para KC grande igual a 1,57.

Nas Figuras 4.2.4.3 e 4.2.4.4, observa-se a variação do Cd com o número de Reynolds e com o número de Keulegan-Carpenter respectivamente, no eixo Y, com escala 1:35.

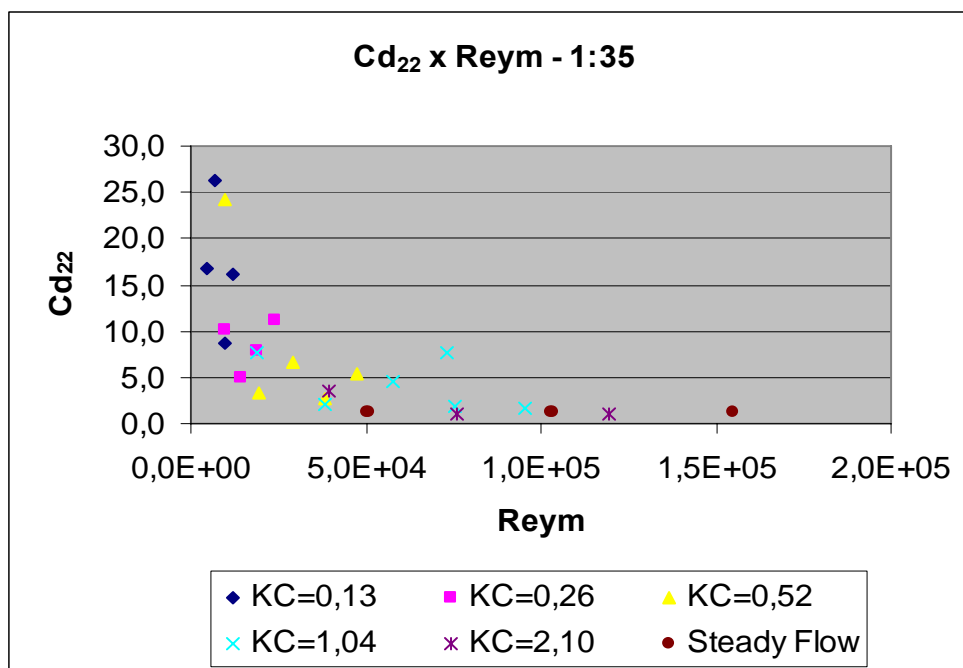


Figura 4.2.4.3: Coeficiente de arrasto em Y variando com o Reym.

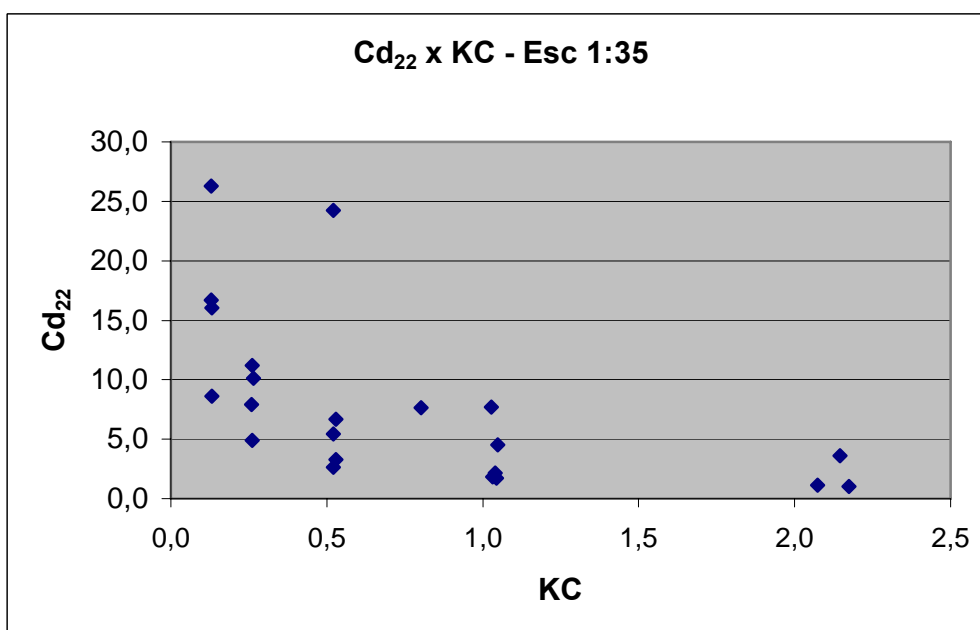


Figura 4.2.4.4: Coeficiente de arrasto em Y, Cd₂₂, variando com o KC.

Pelas Figuras 4.2.4.3 e 4.2.4.4, observa-se um coeficiente de arrasto em Y, Cd_{22} , na escala de 1:35, assintótico para KC grande igual a 1,13.

As Figuras 4.2.4.5 e 4.2.4.6 mostram a variação do Cd com o número de Reynolds e com o número de Keulegan-Carpenter respectivamente, para o eixo Y na escala 1:70.

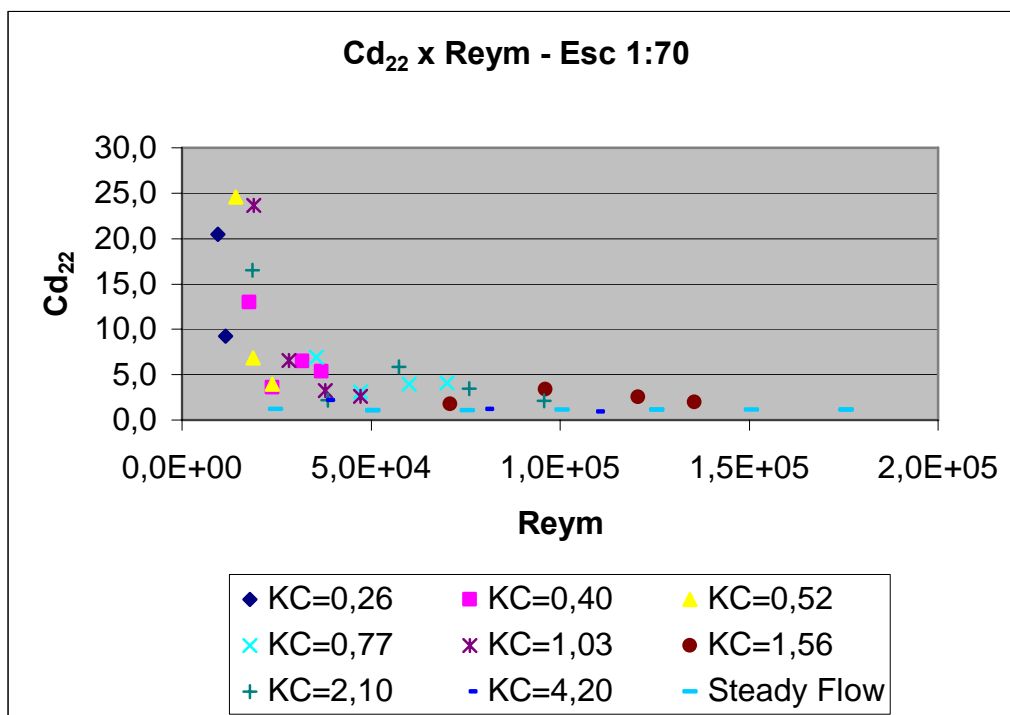


Figura 4.2.4.5: Cd variando com Reynolds no eixo Y para escala de 1:70.

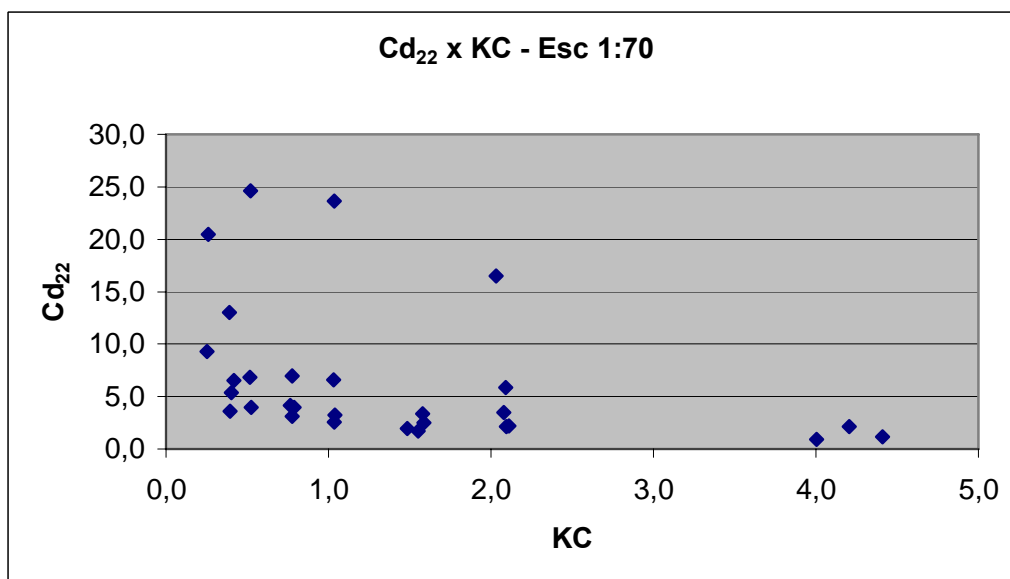


Figura 4.2.4.6: Cd_{22} variando com KC na escala 1:70.

Pelas Figuras 4.2.4.5 e 4.2.4.6, observa-se um coeficiente de arrasto em Y, Cd_{22} , na escala de 1:70, assintótico para KC grande igual a 1,17.

As Figuras 4.2.4.7 e 4.2.4.8 mostram a variação do coeficiente de arrasto em Z com o número de Reynolds e com o KC respectivamente, na escala 1:35.

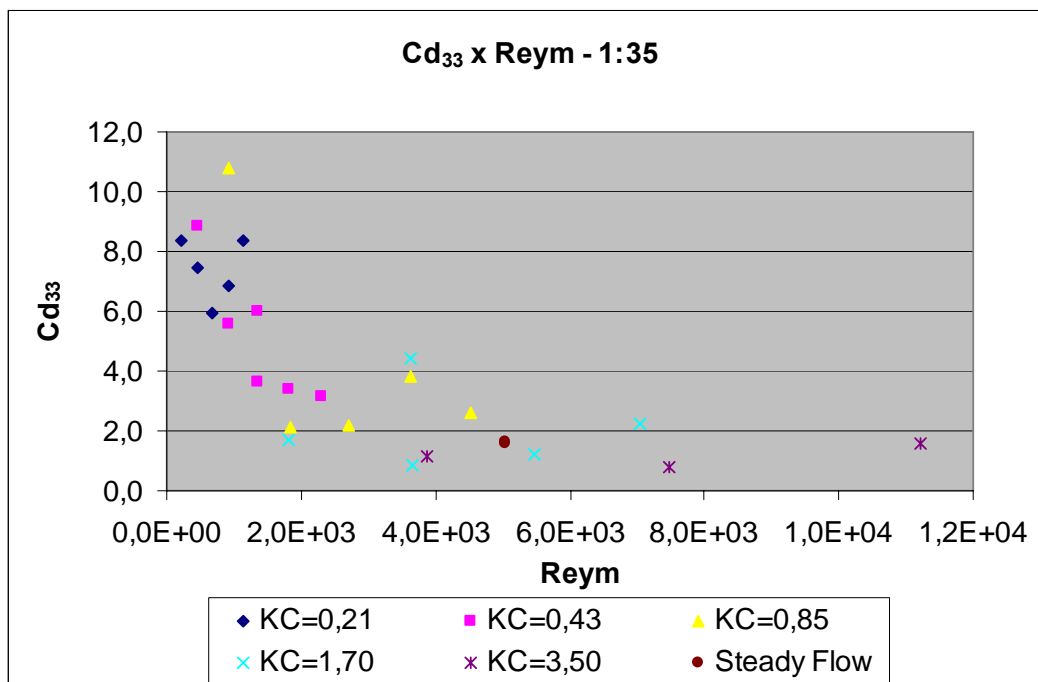


Figura 4.2.4.7: Cd no eixo Z em função do número de Reynolds, escala 1:35.

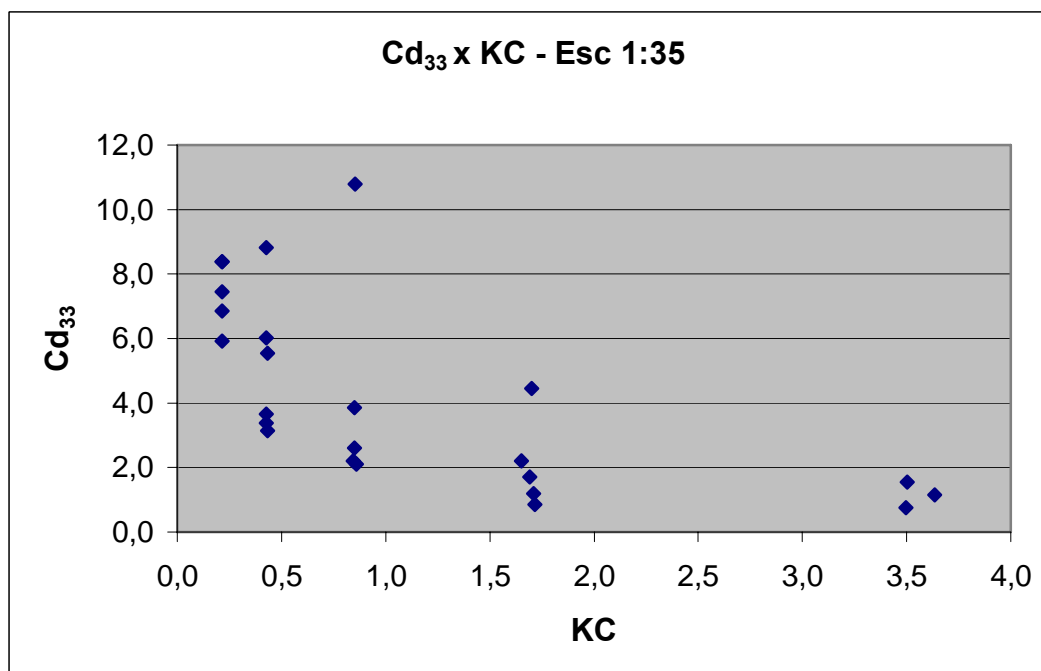


Figura 4.2.4.8: Cd em Z variando com o número de Keulegan-Carpenter.

Pelas Figuras 4.2.4.7 e 4.2.4.8, observa-se um coeficiente de massa adicional em Z, na escala de 1:35, assintótico para KC grande igual a 1,55.

Nas Figuras 4.2.4.9 e 4.2.4.10, observa-se a variação do Cd com o número de Reynolds e com o número de Keulegan-Carpenter respectivamente, no eixo Z na escala 1:70.

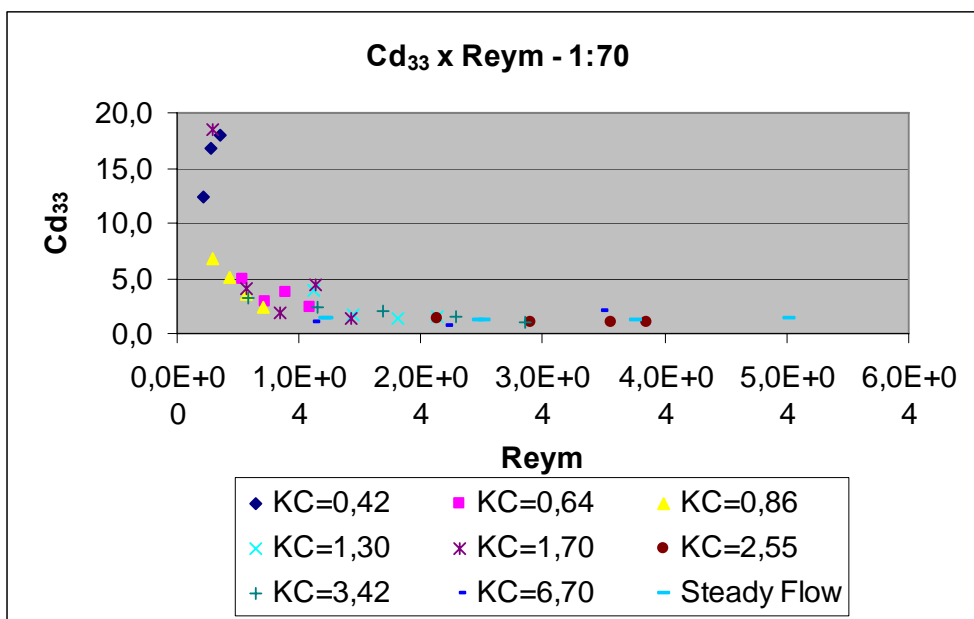


Figura 4.2.4.9: Cd₃₃ variando com Reynolds para a escala de 1:70.

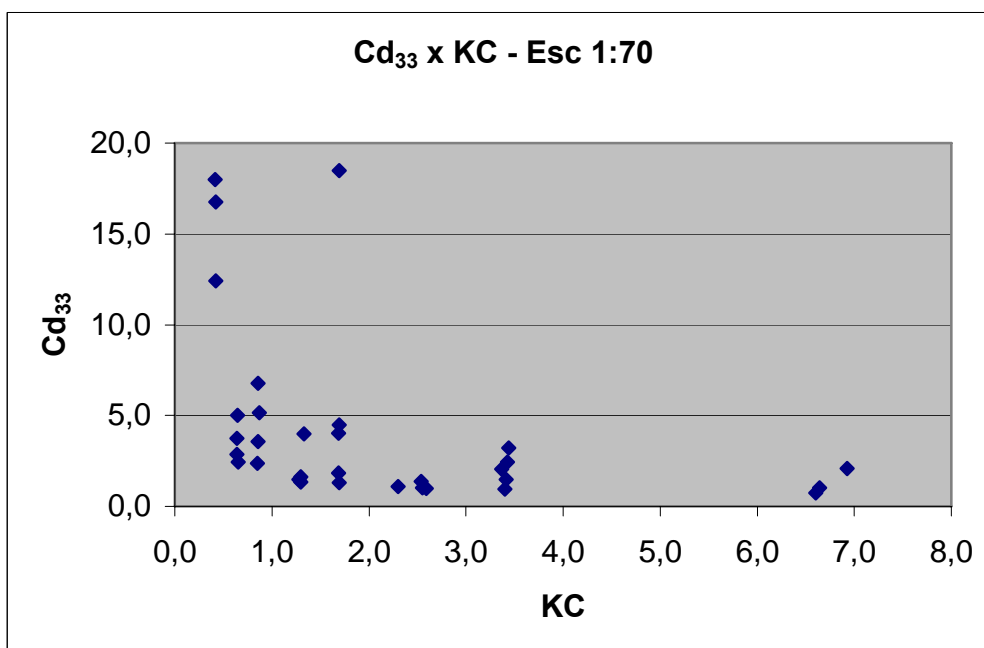


Figura 4.2.4.10: Cd₃₃ variando com o número de Keulegan-Carpenter.

Pelas Figuras 4.2.4.9 e 4.2.4.10, observa-se um coeficiente de arrasto em Z, na escala de 1:70, assintótico para KC grande igual a 1,60.

4.2.4.1 Conclusões sobre Cd

Na Tabela 4.2.4.1.1, encontram-se valores de todos os coeficientes de arrasto obtidos para os eixos X, Y e Z, nas escalas 1:35 e 1:70, em *steady flow* e com oscilação forçada. Pela Tabela 4.2.4.1.1, conclui-se que os valores de Cd₁₁, Cd₂₂ e Cd₃₃ para oscilação forçada, estão acima dos mesmos para o caso de *steady flow*.

Tabela 4.2.4.1.1: Tabela comparativa dos valores assintóticos de Cd nos ensaios de oscilação forçada.

	Cd₁₁	Cd₂₂	Cd₃₃
Steady Flow 1:35	1,23	1,16	1,43
Osc. Forc. 1:35	1,57	1,13	1,55
Steady Flow 1:70	-	1,12	1,29
Osc. Forc. 1:70	-	1,17	1,60
DNV	0,75	1,00	0,95
Ensaio Vertical LabOceano	1,23	1,16	1,40

No caso da Tabela 4.2.4.1.1, as diferenças entre as escalas diferentes são menos pronunciadas mas, mesmo assim, recomenda-se fixar idéias nos resultados da escala 1:35, devido ao efeito escala. Nota-se que os valores de oscilação forçada, mesmo para os maiores KCs são maiores do que para o regime permanente como esperado. Para KCs menores, alguns resultados de coeficientes de arrastos em todas as direções são bem maiores do que em regime permanente.

Recomenda-se assim cautela para as aplicações onde a situação de oscilação forçada ocorre. Deve-se sempre avaliar o valor de KC.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Através dos vários métodos numéricos e experimentais apresentados para obtenção dos coeficientes de massa adicional e arrasto, é possível estimar com bastante precisão os valores dos coeficientes hidrodinâmicos em questão para formas geométricas mais complexas, como o *manifold*.

O método numérico dos limites de frequência, utilizando o programa WAMIT V6.211, obtém aproximações para o coeficiente de massa adicional bem próximas da realidade para regime estacionário, *steady flow*, conforme comparação destes resultados com os ensaios de reboque com aceleração uniforme, Tabela 2.4.2.3.1. A influência da placa no *manifold*, utilizada no método experimental de ensaios de reboque com aceleração uniforme, é diminuir a massa adicional e indica que a placa facilitaria o escoamento, que passaria a ser menos perturbado pela porosidade maior no que tange a aceleração do fluido (efeito de massa adicional). A diminuição dos coeficientes de massa adicional também foi verificada no estudo da porosidade no WAMIT V6.211, Figura 2.3.4.2.

Para o método de obtenção dos coeficientes de massa adicional através de oscilação forçada, a conclusão sugerida pela Tabela 4.2.3.1.1 é descartar os valores na escala 1:70 (que estariam com efeito escala) e considerar apenas os valores da escala 1:35. Pela geometria do *manifold*, há consistência relativa nos resultados da escala 1:35.

No caso dos coeficientes de arrasto, a Tabela 4.2.4.1.1 mostra que as diferenças entre as escalas diferentes são menos pronunciadas mas, mesmo assim, recomenda-se o uso da escala 1:35. Nota-se que os valores de oscilação forçada, mesmo para os maiores KCs são maiores do que para o regime permanente como esperado. Para KCs menores alguns resultados de coeficiente de arrasto em todas as direções são bem maiores do que em regime permanente. Recomenda-se assim cautela para as aplicações onde a situação de oscilação forçada ocorre. Deve-se sempre avaliar o valor de KC e consultar as Figuras 4.2.4.1, 4.2.4.3 e 4.2.4.7 para Cd_{11} , Cd_{22} e Cd_{33} respectivamente, dos ensaios na escala 1:35.

5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de outras propriedades hidrodinâmicas que possam vir influenciar o manifold. A obtenção das propriedades de arrasto de rotação (momento de arrasto; Cd_{44} , Cd_{55} , Cd_{66}) ainda está em aberto. Recomenda-se fortemente que esta tarefa seja atacada, haja visto que essas propriedades influem no comportamento do *manifold*. Nos ensaios experimentais verificou-se em alguns casos o tombamento do *manifold*. Além do momento de arrasto, isto pode ser justificado ainda pelos valores do momento restaurador, momento de Munk, e da posição do centro de gravidade do corpo.

Uma alternativa viável para estabilizar o *manifold* é o uso de asas nas suas laterais, aumentando assim a restauração. Com a inclusão das asas, é necessário estudar o coeficiente de *lift*, C_L , destas já que é parte de um método inovador e não consta dados na literatura a respeito. Recomenda-se a investigação deste coeficiente hidrodinâmico através de simulações numéricas e ensaios experimentais.

O método de lançamento pendular através da planilha EMM pode ser atualizada para a aplicação específica do *manifold*, no sentido de melhorar a aproximação dos coeficientes de massa adicional e arrasto.

A influência da porosidade no manifold deve ser melhor investigada. Recomenda-se o aprimoramento da sub-rotina criada para o programa WAMIT V6.211 visando a investigação do efeito da porosidade no *manifold*. Recomenda-se ainda o estudo da porosidade em ensaios experimentais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLEVINS, R. D., “Formulas for Natural Frequency and Mode Shape”, 1979.

FERNANDES, A.C., SANTOS, M.F., MINEIRO, F.P.S. e 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 Técnico, Etapa 2, Versão 1, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Julho, 2005b.

FERNANDES, A.C., Comunicação Particular, 2005.

FERNANDES, A.C., “Definição da Janela de Instalação e Estudo Paramétrico da Instalação do Dummy Manifold de Roncador pelo Método Pendular”, Proposta de projeto PENO-6625, para PETROBRAS, Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 22 de Fevereiro, 2005.

FERNANDES, A.C. MIWA, I e MINEIRO, F.P.S. “Estimativa de Massa Adicional de Corpos Submersos através de Ensaio de Reboque com Aceleração Uniforme em Tanque de Provas”, Relatório Técnico. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

FERNANDES, A.C. et al, Hydrodynamics Aspects of the Torpedo Anchor Installation”. OMAE, 2005.

FERNANDES, A.C. e MINEIRO, F.P.S. “Massa Adicional de Corpos Submersos com um Plano de Simetria através de Método de Painéis”, Relatório Técnico. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

IPT 2005 “Ensaio de arrasto e de oscilação Forçada com modelos Reduzidos de Manifold”, para FMC, Minuta de Relatório IPT, Julho, São Paulo.

MARINTEK 2002, “Deployment of Equipment in 3000 m water – Model tests and numerical analysis”, Petrobras R&D Center, November 2002.

MG 2005, “Mesh Generator – Manual do Usuário, Versão 3.0 TeCGraf, Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica, PUC, 2005.

NEWMAN, J.N., *Marine Hydrodynamics*, 2^a ed., The Massachusetts Institute of Technology, 1978.

NORMA DNV N0. 30.5 - Classification Notes “Environmental Conditions and Environmental Loads” , 1991.

PAGANELLI, L.M. “Procedimentos para Estimativa de Forças Hidrodinâmicas de Arraste e de Inércia”, Comunicação Técnica. CENPES/PDEP/ Métodos Científicos, 1997.

RIBEIRO, M.L.P.G., FERNANDES, A.C., "Concepção de Manifold Submarino Adequado ao Lançamento Pendular"; Proposta de Tese submetida ao Corpo Docente da Coordenação do Programa 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 Engenharia Naval e Oceânica; Rio de Janeiro, RJ – BRASIL; Outubro, 2005c.

ROVERI, F. E., CERQUEIRA, M. B., VARDARO, E., “Dados para Análise de Instalação do Dummy Manifold de Roncador”, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello – CENPES, Projeto 600789, RT TS 044_2004, Dez. 2004.

SALES, J.S. e FERNANDES, A.C. “Ensaio de Lançamento Pendular do Manifold MSGL-RO2”, Relatório Parcial #1, REP3_03A-05, Projeto

MANPEND-2, LabOceano, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 22 de Setembro, 2005.

WAMIT 2005, “*WAMIT USER MANUAL – Versions 6.2, 6.2PC, 6.2S, 6.2S-PC*”, WAMIT, Incorporated and Massachusetts Institute of Technology, 2005.

WHITE, F.M., “Fluid Mechanics, 4th edition, McGraw-Hill, 1999.

ANEXO A – TABELAS DE OSCILAÇÃO FORÇADA

As Tabelas A.1 a A.5 apresentam os dados dos ensaios de oscilação forçada.

Tabela A.1: Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo X, escala 1:35.

ENSAIO DE OSCILAÇÃO FORÇADA													
ESCALA	1:35	ρ				997,81	kg/m ³				Volume =	0,017	m ³
		v				9,682E-07	m ² /s				M =	6,506	kg
		μ				9,661E-04	kg/m*s					16,944	kg
Eixo X	Filtro Passa Baixa: 10 Hz					Taxa Amostragem: 256 Hz							
ARQUIVO	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Amplitude (m)	Velocidade (m/s)	Período (s)	Ampl. Dupla(mm)	MA/M	MA	Famort. / (1/2 * ρ * S) * V ²	KC	Rey	Ca	
AX0002	0,300	5,1	0,005	0,010	3,333	10,3		0		0,067837	4,749E+03	0	
AX0003	0,600	5,2	0,005	0,020	1,666	10,4		0		0,068611	9,606E+03	0	
AX0004	0,300	10,1	0,010	0,019	3,333	20,1		0		0,133123	9,319E+03	0	
AX0005	0,600	10,1	0,010	0,038	1,666	20,2	0,5471	3,5594	9,5417	0,133388	1,868E+04	0,210074	
AX0006	0,900	5,1	0,005	0,029	1,111	10,2	0,5807	3,778	22,2546	0,067421	1,416E+04	0,222976	
AX0007	0,300	20,4	0,020	0,038	3,333	40,7	0,8287	5,3915	12,5372	0,269287	1,885E+04	0,318202	
AX0008	0,600	20,1	0,020	0,076	1,667	40,2	0,8924	5,806	5,9741	0,265454	3,716E+04	0,342661	
AX0009	0,900	10,2	0,010	0,058	1,111	20,4	0,7968	5,184	9,0524	0,13504	2,836E+04	0,305953	
AX0010	1,200	5,1	0,005	0,039	0,833	10,3	0,5485	3,5685	9,4803	0,067752	1,897E+04	0,210612	
AX0011	1,200	10,2	0,010	0,077	0,833	20,5	0,7922	5,1541	7,9316	0,135371	3,790E+04	0,304187	
AX0012	1,500	5,2	0,005	0,049	0,667	10,5	0,6338	4,1235	22,1797	0,06914	2,420E+04	0,243365	
AX0013	1,500	7,8	0,008	0,074	0,667	15,7	0,7403	4,8164	7,0524	0,10361	3,627E+04	0,284259	
AX0014	1,500	10,2	0,010	0,097	0,667	20,5	0,8097	5,2679	8,5935	0,135371	4,738E+04	0,310907	
AX0015	0,300	41,2	0,041	0,078	3,333	82,4	0,8388	5,4572	4,4227	0,544874	3,814E+04	0,32208	
AX0016	0,300	81,3	0,081	0,153	3,333	162,7	1,3957	9,0804	2,8566	1,075233	7,527E+04	0,535917	
AX0017	0,600	40,2	0,040	0,152	1,666	80,4	1,1317	7,3628	2,9953	0,531311	7,439E+04	0,434547	
AX0018	0,900	20,1	0,020	0,114	1,111	40,2	0,9177	5,9706	4,318	0,265388	5,573E+04	0,352376	
AX0019	0,900	40,4	0,040	0,229	1,111	80,9	1,1852	7,7109	8,7491	0,534675	1,123E+05	0,45509	
AX0020	1,200	20,1	0,020	0,152	0,833	40,3	0,9374	6,0987	11,0229	0,266313	7,458E+04	0,35994	
AX0021	1,500	15,1	0,015	0,142	0,667	30,2	0,8623	5,6101	3,8851	0,199553	6,985E+04	0,331104	
AX0022	1,500	20,4	0,020	0,192	0,667	40,8	0,9625	6,262	3,4043	0,26942	9,431E+04	0,369578	
AX0023	2,000	8,1	0,008	0,102	0,500	16,3	0,7497	4,8775	18,1575	0,107609	5,022E+04	0,287868	
AX0024	2,000	15,3	0,015	0,192	0,500	30,5	0,8914	5,7994	9,2404	0,201734	9,415E+04	0,342277	
AX0025	0,600	75,3	0,075	0,284	1,667	150,5	1,4634	9,5209	4,4403	0,994857	1,393E+05	0,561913	
AX0026	0,900	74,9	0,075	0,424	1,111	149,8	1,4945	9,7232	3,5259	0,990164	2,079E+05	0,573854	
AX0027	1,200	39,9	0,040	0,301	0,833	79,9	1,1895	7,7389	3,2915	0,527999	1,479E+05	0,456741	
AX0028	1,500	30,3	0,030	0,286	0,667	60,7	1,0877	7,0766	6,9925	0,400957	1,404E+05	0,417652	
AX0029	1,500	40,4	0,040	0,381	0,667	80,8	1,2018	7,8189	2,5122	0,534146	1,870E+05	0,461464	
AX0030	2,000	29,9	0,030	0,376	0,500	59,8	1,0927	7,1091	4,6126	0,395471	1,846E+05	0,419572	
AX0031	0,600	76,0	0,076	0,286	1,667	152,0	1,4643	9,5267	1,5659	1,004375	1,406E+05	0,562258	
AX0032	1,000	41,4	0,041	0,260	1,000	82,7	1,1906	7,746	2,762	0,546639	1,276E+05	0,457164	
AX0033	1,500	20,2	0,020	0,190	0,667	40,4	0,9617	6,2568	4,1953	0,266908	9,343E+04	0,369271	

Tabela A.2: Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo Y escala 1:35.

ENSAIO DE OSCILAÇÃO FORÇADA												
ESCALA	1:35	ρ			997,81	kg/m ³					Volume =	0,016981 m ³
		v			9,682E-07	m ² /s					M =	6,506 kg
		μ			9,661E-04	kg/m ² s						
Eixo Y	Filtro Passa Baixa: 10 Hz					Taxa Amostragem: 256 Hz						
ARQUIVO	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Amplitude (m)	Velocidade (m/s)	Período (s)	Ampl. Dupla(mm)	MA/M	MA	Famort. / (1/2 * ρ * S) * V ²	KC	Rey	Ca
AY0002	0,300	5,12	0,005	0,010	3,333	10,24		0,0000		0,132464	2421,249	0
AY0003	0,600	5,00	0,005	0,019	1,667	10,00	0,1077	0,7007	16,7097	0,12934	4727,867	0,041354
AY0004	0,300	10,22	0,010	0,019	3,333	20,44		0,0000		0,26445	4833,169	0
AY0005	0,600	10,26	0,010	0,039	1,666	20,51	0,6774	4,4072	10,1382	0,265317	9698,891	0,260106
AY0006	0,900	5,01	0,005	0,028	1,111	10,03	0,6682	4,3473	26,2623	0,129722	7112,724	0,256574
AY0007	0,300	20,11	0,020	0,038	3,333	40,22	0,7113	4,6277	24,2189	0,520298	9509,402	0,273123
AY0008	0,600	20,42	0,020	0,077	1,666	40,84	1,2159	7,9106	3,3057	0,526279	19311,72	0,466878
AY0009	0,900	10,04	0,010	0,057	1,111	20,08	0,8883	5,7793	4,8983	0,259806	14246,59	0,341087
AY0010	1,200	5,05	0,005	0,038	0,833	10,11	0,8967	5,8339	8,5916	0,130757	9559,174	0,344313
AY0011	1,200	10,01	0,010	0,076	0,833	20,03	0,9891	6,4351	7,9231	0,259043	18940,22	0,379792
AY0012	1,500	5,05	0,005	0,048	0,667	10,10	0,9245	6,0148	16,0634	0,130692	11942,48	0,354987
AY0013	1,500	10,03	0,010	0,095	0,667	20,06	1,0483	6,8202	11,2088	0,259547	23720,32	0,402524
AY0014	0,300	39,73	0,040	0,075	3,333	79,47	1,3513	8,7916	7,7225	1,027996	18788,52	0,518869
AY0015	0,300	82,88	0,083	0,156	3,333	165,76	2,0323	13,2221	3,5911	2,144266	39190,44	0,780357
AY0016	0,600	40,20	0,040	0,152	1,667	80,40	1,6270	10,5853	2,1525	1,040104	38017,36	0,624731
AY0017	0,900	20,49	0,020	0,116	1,111	40,98	1,2755	8,2984	6,7025	0,530116	29066,56	0,489763
AY0018	0,900	40,50	0,040	0,229	1,111	80,99	1,6783	10,9190	4,5361	1,047684	57450,27	0,644429
AY0019	1,200	20,16	0,020	0,152	0,833	40,32	1,3001	8,4585	2,6146	0,521578	38130,78	0,499209
AY0020	1,500	20,12	0,020	0,190	0,667	40,23	1,3122	8,5372	5,4391	0,520414	47561,22	0,503855
AY0021	0,600	80,15	0,080	0,302	1,666	160,30	2,1131	13,7478	1,1258	2,073636	75803,62	0,811383
AY0022	0,900	84,06	0,084	0,475	1,111	168,12	2,1825	14,1993	1,0351	2,174795	119256	0,838031
AY0023	1,200	39,86	0,040	0,301	0,833	79,71	1,6785	10,9203	1,8258	1,031126	75382,05	0,644506
AY0024	1,500	40,37	0,040	0,360	0,667	80,73	1,6950	11,0277	1,7162	1,044321	95428,76	0,650842
AY0025	1,500	31,03	0,031	0,292	0,667	62,06	1,5295	9,9509	7,6517	0,802845	73364,1	0,587294

Tabela A.3: Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo Y escala 1:70.

ESCALA	1:70	ρ				997,81 kg/m ³					Volume =	0,002123 m ³
		v				9,682E-07 m ² /s					M =	0,793 kg
		μ				9,661E-04 kg/m ² s						
Eixo Y	Filtro Passa Baixa: 10 Hz					Taxa Amostragem: 256 Hz						
ARQUIVO	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Amplitude (m)	Velocidade (m/s)	Período (s)	Ampl. Dupla(mm)	MA/M	MA	Famort. / (t12 * p * S) * V ²	KC	Rey	Ca
BY0002	0,300	5,03	0,005	0,009	3,336	10,06		0		0,260375	2377,351	0
BY0003	0,600	5,03	0,005	0,019	1,667	10,05		0		0,260065	4752,879	0
BY0004	0,300	10,07	0,010	0,019	3,333	20,14		0		0,520957	4760,873	0
BY0005	0,600	10,13	0,010	0,038	1,667	20,25	0,4847	0,38437	68,0883	0,52401	9576,683	0,18148
BY0006	0,900	5,01	0,005	0,028	1,111	10,01		0		0,259004	7100,666	0
BY0007	0,300	19,78	0,020	0,037	3,333	39,56		0		1,023365	9353,344	0
BY0008	0,600	19,99	0,020	0,075	1,667	39,99	3,9797	3,1559	23,6442	1,034515	18906,55	1,490065
BY0009	0,900	10,03	0,010	0,057	1,111	20,06	2,9222	2,3173	24,5952	0,519069	14229,13	1,09412
BY0010	1,200	5,00	0,005	0,038	0,833	10,00	1,4623	1,1596	20,4481	0,258593	9452,404	0,547509
BY0011	1,200	9,95	0,010	0,075	0,833	19,89	4,4397	3,52068	6,8177	0,514619	18810,99	1,662296
BY0012	1,500	4,87	0,005	0,046	0,667	9,73	3,2762	2,59803	9,2759	0,251799	11506,08	1,226663
BY0013	1,500	7,52	0,008	0,071	0,667	15,03	3,6007	2,85536	13,0045	0,388881	17770,14	1,348161
BY0014	1,500	10,10	0,010	0,095	0,667	20,20	4,8662	3,8589	3,9697	0,522665	23883,46	1,821985
BY0015	0,300	39,29	0,039	0,074	3,333	78,58	3,9422	3,12616	16,5246	2,033017	18578,57	1,476024
BY0016	0,300	81,24	0,081	0,153	3,333	162,48	4,4948	3,56438	2,1640	4,203673	38414,95	1,682927
BY0017	0,600	40,78	0,041	0,154	1,666	81,56	5,3557	4,24707	2,2029	2,110115	38568,58	2,005262
BY0018	0,900	19,93	0,020	0,113	1,111	39,85	4,8467	3,84343	6,5973	1,030097	28267,61	1,814684
BY0019	0,900	40,43	0,040	0,229	1,111	80,86	6,0037	4,76093	5,8698	2,092005	57352,9	2,247884
BY0020	1,200	20,05	0,020	0,151	0,833	40,10	5,4005	4,2826	3,2473	1,037568	37926,96	2,022036
BY0021	1,500	15,00	0,015	0,141	0,667	29,99	5,0990	4,04351	6,9450	0,775951	35453,27	1,909149
BY0022	1,500	20,00	0,020	0,189	0,667	40,00	5,6105	4,44913	2,5766	1,034826	47286,94	2,100663
BY0023	2,000	7,58	0,008	0,095	0,500	15,17	4,8770	3,86746	3,6064	0,392348	23903,91	1,826029
BY0024	2,000	14,97	0,015	0,188	0,500	29,93	5,4129	4,29243	3,1257	0,774373	47178,89	2,026678
BY0025	2,500	8,08	0,008	0,127	0,400	16,16	5,1081	4,05072	6,5271	0,418039	31834,34	1,912556
BY0026	2,500	15,24	0,015	0,239	0,400	30,47	5,5254	4,38164	3,9568	0,788344	60036,68	2,0688
BY0027	3,000	7,78	0,008	0,147	0,333	15,57	5,1697	4,09957	5,3673	0,402748	36804,87	1,93562
BY0028	0,600	85,21	0,085	0,321	1,667	170,42	6,4479	5,11318	1,1708	4,409096	80579,55	2,414199
BY0029	0,900	77,40	0,077	0,438	1,111	154,80	6,6686	5,2682	0,8905	4,004976	109797,5	2,496833
BY0030	1,200	40,16	0,040	0,303	0,833	80,32	6,1918	4,9101	3,4844	2,078034	75969,87	2,318311
BY0031	1,500	29,95	0,030	0,282	0,667	59,90	6,0602	4,80574	1,7368	1,549833	70820,46	2,269038
BY0032	1,500	40,51	0,041	0,382	0,667	81,02	6,2987	4,99487	2,1379	2,096093	95782,12	2,368336
BY0033	2,000	30,50	0,031	0,383	0,500	61,01	6,1457	4,87354	3,3868	1,578395	96164,16	2,301051
BY0034	2,501	30,63	0,031	0,481	0,400	61,27	6,1935	4,91145	2,5294	1,585044	120721,8	2,318948
BY0035	3,000	14,80	0,015	0,279	0,333	29,60	5,5697	4,41677	4,1268	0,765706	69973,47	2,085387
BY0036	3,000	28,68	0,029	0,541	0,333	57,35	6,134	4,86426	1,9606	1,483756	135591,9	2,29667

Tabela A.4: Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo Z escala 1:35.

ENSAIO DE OSCILAÇÃO FORÇADA												
ESCALA	1:35	ρ			997,81	kg/m ³				M =	6,506	kg
		v			9,682E-07	m ² /s				Volume =	0,016981	m ³
		μ			9,661E-04	kg/m ² s						
Eixo Z	Filtro Passa Baixa: 10 Hz					Taxa Amostragem: 256 Hz						
ARQUIVO	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Amplitude (m)	Velocidade (m/s)	Período (s)	Ampl. Dupla(mm)	MA/M	MA	Famort. / (1/2 * ρ * S) * V ²	KC	Rey	Ca
AZ0028	0,300	5,00	0,005	0,009	3,333	10,00	3,3522	21,80941	8,3926	0,213548	1432,059	1,287169
AZ0029	0,600	5,00	0,005	0,019	1,666	10,00	3,5851	23,32456	7,4483	0,213548	2864,118	1,376592
AZ0030	0,300	10,00	0,010	0,019	3,333	20,10	3,7081	24,12465	8,8211	0,427096	2864,118	1,423812
AZ0031	0,600	10,10	0,010	0,038	1,666	20,20	4,0855	26,58041	5,5457	0,431366	5795,518	1,568748
AZ0032	0,900	5,00	0,005	0,028	1,111	10,00	3,9468	25,67788	5,9290	0,213548	4296,177	1,515482
AZ0033	0,300	20,00	0,020	0,038	3,333	40,00	4,2904	27,91334	10,7924	0,854191	5728,236	1,647417
AZ0034	0,600	20,10	0,020	0,076	1,667	40,20	4,5778	29,78317	2,1114	0,858462	11513,75	1,757772
AZ0035	0,900	10,00	0,010	0,057	1,111	20,00	4,3658	28,40389	6,0259	0,427096	8592,354	1,676369
AZ0036	0,900	10,00	0,010	0,057	1,111	19,90	4,4041	28,65291	3,6588	0,427096	8592,354	1,691065
AZ0037	1,200	5,00	0,005	0,038	0,833	10,00	4,2235	27,47797	6,8599	0,213548	5728,236	1,621721
AZ0038	1,502	5,00	0,005	0,047	0,666	10,00	4,4725	29,09815	8,3901	0,213548	7169,842	1,717343
AZ0039	1,502	10,10	0,010	0,095	0,666	20,10	4,7382	30,82664	3,1417	0,431366	14483,08	1,819357
AZ0040	1,200	10,00	0,010	0,075	0,833	20,10	4,5927	29,88002	3,3834	0,427096	11456,47	1,763499
AZ0041	0,300	39,60	0,040	0,075	3,333	79,30	4,5927	29,87993	1,7037	1,691298	11341,91	1,763483
AZ0042	0,300	85,10	0,085	0,160	3,333	170,20	5,6236	36,58714	1,1612	3,634583	24373,64	2,159336
AZ0043	0,600	40,20	0,040	0,152	1,666	80,30	3,9985	26,01424	0,8578	1,716924	23027,51	1,535334
AZ0044	0,900	19,80	0,020	0,112	1,111	39,70	4,7142	30,67059	2,1984	0,845649	17012,86	1,810146
AZ0045	0,900	40,00	0,040	0,226	1,111	79,90	5,1446	33,47077	1,1861	1,708382	34369,41	1,97541
AZ0046	1,200	19,90	0,020	0,150	0,833	39,80	4,8416	31,49945	3,8467	0,84992	22798,38	1,869065
AZ0047	1,500	19,90	0,020	0,188	0,667	39,70	4,9391	32,13378	2,6016	0,84992	28497,97	1,896603
AZ0048	0,600	39,80	0,040	0,150	1,667	79,60	5,0353	32,75966	4,4544	1,69984	22798,38	1,933442
AZ0049	0,600	81,90	0,082	0,309	1,666	163,80	5,6241	36,59039	0,7610	3,497912	46914,25	2,159528
AZ0050	0,900	82,00	0,082	0,464	1,111	163,90	5,6973	37,06663	1,5474	3,502183	70457,3	2,187635
AZ0051	1,200	38,70	0,039	0,292	0,833	77,50	5,1950	33,79867	2,2134	1,65286	44336,55	1,994763

Tabela A.5: Dados dos ensaios de oscilação forçada para o eixo X, escala 1:70.

ESCALA	1:70	ρ			997,81	kg/m ³				M =	0,793	kg
		v			9,682E-07	m ² /s				Volume =	0,002123	m ³
		μ			9,661E-04	kg/m ² s						
Eixo Z	Filtro Passa Baixa: 10 Hz					Taxa Amostragem: 256 Hz						
ARQUIVO	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Amplitude (m)	Velocidade (m/s)	Período (s)	Ampl. Dupla(mm)	MA/M	MA	Famort. / (1/2 * ρ * S) * V ²	KC	Rey	Ca
BZ0005	0,600	10,04	0,010	0,038	1,667	20,07	6,2848	4,9838	6,7893	0,857266	2874,371	2,363132
BZ0006	0,901	4,94	0,005	0,028	1,110	9,88	3,4557	2,7404	12,4067	0,422005	2124,608	1,293871
BZ0007	0,300	19,85	0,020	0,037	3,328	39,71	6,3316	5,0210	18,4825	1,695783	2847,466	2,370665
BZ0008	0,600	19,73	0,020	0,074	1,665	39,46	8,3015	6,5831	4,0366	1,685105	5654,486	3,108218
BZ0009	0,901	10,17	0,010	0,058	1,110	20,33	7,4760	5,9285	5,1654	0,868328	4370,469	2,799137
BZ0010	1,202	4,94	0,005	0,037	0,832	9,88	5,3466	4,2399	16,7410	0,422103	2834,866	2,001855
BZ0011	1,202	10,03	0,010	0,076	0,832	20,06	7,9211	6,2814	3,5495	0,856554	5752,571	2,96579
BZ0012	1,501	4,83	0,005	0,046	0,666	9,65	6,4508	5,1155	18,0049	0,412147	3457,366	2,415285
BZ0013	1,500	9,95	0,010	0,094	0,667	19,89	8,1616	6,4721	2,3678	0,849493	7120,878	3,055837
BZ0014	0,300	40,29	0,040	0,076	3,333	80,57	7,7170	6,1196	3,2175	3,441109	5769,626	2,889371
BZ0015	0,300	77,80	0,078	0,147	3,333	155,59	8,0125	6,3539	1,0119	6,645179	11141,82	3,000011
BZ0016	0,600	40,15	0,040	0,151	1,667	80,30	8,8036	6,9813	2,4262	3,429406	11499,32	3,296212
BZ0017	0,900	19,78	0,020	0,112	1,111	39,56	8,3789	6,6445	1,8469	1,689376	8497,614	3,137197
BZ0018	0,900	39,43	0,039	0,223	1,111	78,86	9,1342	7,2434	2,0481	3,367862	16941,97	3,419994
BZ0019	1,200	19,79	0,020	0,149	0,833	39,58	8,5358	6,7689	4,4692	1,690444	11338,81	3,195943
BZ0020	1,500	19,85	0,020	0,187	0,667	39,70	8,6372	6,8493	1,3026	1,695569	14215,67	3,233909
BZ0021	1,500	7,58	0,008	0,071	0,667	15,16	8,5816	6,8052	4,9977	0,647349	5426,972	3,213082
BZ0022	1,500	15,57	0,016	0,147	0,667	31,14	8,5899	6,8118	3,9765	1,329975	11150,53	3,216199
BZ0023	2,000	7,51	0,008	0,094	0,500	15,02	8,4834	6,7273	2,8669	0,641497	7170,846	3,176324
BZ0024	2,000	15,19	0,015	0,191	0,500	30,37	8,6331	6,8460	1,6123	1,297089	14499,24	3,232374
BZ0025	2,500	7,45	0,007	0,117	0,400	14,91	8,4531	6,7033	3,7226	0,636629	8894,368	3,164979
BZ0026	2,500	15,19	0,015	0,239	0,400	30,38	8,6817	6,8846	1,3434	1,297516	18128,84	3,250571
BZ0027	3,000	7,64	0,008	0,144	0,333	15,28	8,4701	6,7168	2,4175	0,652602	10942,02	3,171344
BZ0028	0,600	77,29	0,077	0,291	1,666	154,57	9,2523	7,3371	0,7420	6,601616	22138,88	3,464213
BZ0029	0,900	81,05	0,081	0,458	1,111	162,10	9,5635	7,5839	2,0906	6,923218	34827,13	3,580731
BZ0030	1,200	39,98	0,040	0,301	0,833	79,95	9,1977	7,2938	1,4904	3,414629	22900,64	3,443769
BZ0031	1,500	29,73	0,030	0,280	0,667	59,46	9,0258	7,1575	1,3686	2,53951	21288,41	3,379407
BZ0032	1,500	39,78	0,040	0,375	0,667	79,56	9,2784	7,3578	0,9567	3,397972	28488,64	3,473985
BZ0033	2,000	30,34	0,030	0,381	0,500	60,67	9,0939	7,2115	0,9773	2,591189	28965,06	3,404905
BZ0034	2,500	29,88	0,030	0,469	0,400	59,75	9,1040	7,2195	1,0096	2,551896	36654,98	3,408687
BZ0035	3,000	14,95	0,015	0,282	0,333	29,89	8,8968	6,8966	1,4913	1,276589	21404,26	3,256224
BZ0036	3,001	26,92	0,027	0,508	0,333	53,84	9,0101	7,1450	1,0898	2,299482	38559,51	3,373529

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](#)