

OK

São Paulo
2002

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

**ESTUDO DA DINÂMICA E CONTROLE DE UM SUBMERSÍVEL NÃO
TRIPULADO PARA USO NO AMBIENTE FLUVIAL**

LUIZ ALBERTO SORANI

**ESTUDO DA DINÂMICA E CONTROLE DE UM SUBMERSÍVEL NÃO
TRIPULADO PARA USO NO AMBIENTE FLUVIAL**

LUIZ ALBERTO SORANI

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Naval

Orientador:

Professor Doutor

Hélio Mito Morishita

São Paulo
2002

Aos meus pais, à minha esposa e especialmente
ao meu filho, grande razão de minha vida e
incentivo ao meu aperfeiçoamento.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Hélio Mitio Morishita pela confiança depositada e pela atenção com que me orientou.

Ao amigo Professor Doutor Antonio Eduardo Assis Amorim pela enorme dedicação.

Ao amigo Professor Mestre Sérgio Lukine, grande motivador para a realização deste Mestrado.

ERRATA

| PÁGINA | LINHA / EQUAÇÃO / FIGURA | ONDE SE LE | LEIA-SE |
|--------|--------------------------|---|---|
| 23 | linha 1 | Aplicando as equações de Kirchoff à equação de energia cinética, obtemos: | Aplicando as equações de Kirchoff à equação de energia cinética descrita por Fossem(1994), obtem-se: |
| 29 | Equação 2.15 | $\begin{bmatrix} F_{RX} \\ F_{RY} \\ F_{RZ} \\ F_{RK} \\ F_{RM} \\ F_{RN} \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W-B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} F_{RX} \\ F_{RY} \\ F_{RZ} \\ F_{RK} \\ F_{RM} \\ F_{RN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W-B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ |
| 33 | Equação 3.1 | $u[m-X^u] = -F_{RX} - 2k\delta x$ | $u[m-X^u] = F_{RX} - 2k\delta x$ |
| | Equação 3.2 | $v[m-Y^v] = -F_{RY} - 2k\delta y$ | $v[m-Y^v] = F_{RY} - 2k\delta y$ |
| | Equação 3.3 | $w[m-Z^w] = -F_{RZ} - 2k\delta z$ | $w[m-Z^w] = F_{RZ} - 2k\delta z$ |
| | Equação 3.4 | $\psi[L^z-N^z] = -F_{RN} - 2kL^2\delta\psi$ | $\psi[L^z-N^z] = F_{RN} - 2kL^2\delta\psi$ |
| | Figuras 13 a 24 | - | grandeza na ordenada: tempo (segundos). grandeza na abscissa: deslocamento (metros). |
| 62 | linha 1 | sistema de ordem 1 | sistema do tipo 1 |

SUMÁRIO

| | | |
|----|---|----|
| | LISTA DE FIGURAS | |
| | LISTA DE TABELAS | |
| | LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | |
| | LISTA DE SÍMBOLOS | |
| | RESUMO | |
| | ABSTRACT | |
| 01 | 1 INTRODUÇÃO | 01 |
| 01 | 1.1 Descrição do Problema | 01 |
| 03 | 1.2 Histórico do Submersível VSNT | 03 |
| 08 | 1.3 Revisão da Literatura | 08 |
| 08 | 1.3.1 Histórico da Exploração Submarina pelo Homem | 08 |
| 08 | 1.3.2 A Experiência Nacional no Desenvolvimento de Robôs | 08 |
| 09 | 1.3.3 Submersíveis para Pesquisa | 09 |
| 11 | 1.3.3 Os Atuais Robôs Submersíveis de Pesquisa | 11 |
| 12 | 1.3.4 A Classificação segundo o modo de operação | 12 |
| 15 | 1.3.5 O Estudo da Dinâmica dos Atuais Submersíveis de Pesquisa | 15 |
| 15 | 1.3.6 O Sistema de Controle | 15 |
| 17 | 1.4 Objetivo do Trabalho | 17 |
| 17 | 1.5 Estrutura da Dissertação | 17 |
| 19 | 2 MODELAMENTO MATEMÁTICO E NUMÉRICO | 19 |
| 20 | 2.1 A Equação de Movimento | 20 |
| 22 | 2.1.1 Forças Hidrodinâmicas | 22 |
| 25 | 2.1.2 Forças Ambientais | 25 |
| 26 | 2.1.3 Forças de Propulsão | 26 |
| 27 | 2.2 O Modelo Matemático para o Submersível VSNT Jati I | 27 |
| 30 | 3 OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DE DADOS | 30 |
| 30 | 3.1 A Obtenção Experimental de Massa Adicional e Amortecimento Viscoso | 30 |
| 34 | 3.2 A Análise do Amortecimento como Aproximação Linear | 34 |
| 41 | 3.3 A Análise do Amortecimento como Aproximação Quadrática | 41 |
| 47 | 3.4 A Análise do Amortecimento com a combinação das formas de aproximação Linear e Quadrática | 47 |
| 55 | 3.5 Comentários sobre os Resultados | 55 |
| 56 | 4 SISTEMA DE CONTROLE | 56 |
| 57 | 4.1 O Controle para o VSNT Jati I | 57 |
| 61 | 4.1.1 O Controle de Trajetória | 61 |
| 61 | 4.1.1.1 O Controle no plano horizontal | 61 |
| 62 | 4.1.1.2 O Controle no plano vertical | 62 |
| 62 | 4.1.2 Projeto do Controlador | 62 |
| 63 | 4.1.2.1 Projeto do Controlador para o plano horizontal | 63 |
| 65 | 4.1.2.2 Projeto do Controlador para o plano vertical | 65 |

APÊNDICES

APÊNDICE I - Relatório dos ensaios para obtenção dos valores de massa adicional e fator de amortecimento.

APÊNDICE II - Relatório do ensaio para obtenção do momento de inércia do modelo em escala reduzida do submersível VSNT - Jatã I.

APÊNDICE III - Dados da Análise de Massa Adicional e do amortecimento usando a aproximação linear.

APÊNDICE IV - Dados da Análise do Amortecimento usando a aproximação quadrática.

APÊNDICE V - Dados da Análise do Amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática.

APÊNDICE VI - Estudo dos Fatores de Conversão de escala para coeficientes de Massa e Amortecimento entre o modelo reduzido e o modelo real do submersível VSNT Jatã I.

4.1.3 Alocação de Empuxo 65

4.1.4 Seleção dos Parâmetros de Controle 67

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS 77

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 79

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Partes básicas do Submersível VSNT Jau I | 04 |
| Figura 2 - Aspecto geral do Submersível VSNT Jau I em 3 dimensões..... | 05 |
| Figura 3 - Vista de perfil do Submersível VSNT Jau I | 05 |
| Figura 4 - Vista superior do Submersível VSNT Jau I | 06 |
| Figura 5 - Vista inferior do Submersível VSNT Jau I | 06 |
| Figura 6 - Vista frontal do Submersível VSNT Jau I | 06 |
| Figura 7 - Vista de popa do Submersível VSNT Jau I | 07 |
| Figura 8 - Vista do Submersível VSNT Jau I em operação | 07 |
| na Eclusa de Barra Bonita-SP | 07 |
| Figura 9 - Diferentes modos de operação, desde o ROV até o AUV..... | 13 |
| Figura 10 - Sistema de Coordenadas Fixa e Móvel | 19 |
| Figura 11 - Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos lineares..... | 31 |
| Figura 12 - Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para o movimento de rotação em torno do eixo Z..... | 32 |
| Figura 13 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento linear na movimentação longitudinal, para o ensaio Solt6..... | 39 |
| Figura 14 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento linear na movimentação vertical, para o ensaio Sov3..... | 40 |
| Figura 15 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento linear na movimentação transversal, para o ensaio Solt2..... | 40 |
| Figura 16 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento linear na movimentação rotacional de rumo, para o ensaio Solt7..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 17 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático na movimentação longitudinal, para o ensaio Solt6 | 45 |
| Figura 18 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático na movimentação vertical, para o ensaio Sov3..... | 46 |
| Figura 19 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático na movimentação transversal, para o ensaio Solt2..... | 46 |
| Figura 20 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático na movimentação rotacional de rumo, para o ensaio Solt7.. | 47 |
| Figura 21 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação longitudinal, para o ensaio Solt6..... | 49 |
| Figura 22 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação transversal, para o ensaio Solt2..... | 50 |
| Figura 23 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação vertical, para o ensaio Sov3..... | 50 |
| Figura 24 - Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação rotacional de rumo, para o ensaio Solt7..... | 51 |
| Figura 25 - Estrutura de Controle para uma única direção..... | 61 |
| Figura 26 - Representação das coordenadas da trajetória prevista com as coordenadas do veículo..... | 63 |
| Figura 27 - Diagrama de blocos global do sistema de controle..... | 66 |
| Figura 28 - Lugar das Raízes para Movimentação Longitudinal (X)..... | 69 |
| Figura 29 - Resposta do Degrau Unitário para Movimentação Longitudinal (X)..... | 69 |
| Figura 30a-Trajétoria proposta para simulação..... | 70 |
| Figura 30b-Vista superior da trajetória proposta..... | 70 |
| Figura 30c-Vista da trajetória descendente..... | 71 |

| | |
|----|---|
| 70 | Figura 31 – Índice de erro para uma única direção..... |
| 73 | Figura 32a-Comportamento geral diante da trajetória proposta simulação..... |
| 73 | Figura 32b-Comportamento relativo a movimentação vertical..... |
| 74 | Figura 32c-Comportamento relativo a movimentação horizontal..... |
| 74 | Figura 32d-Comportamento relativo a movimentação na direção OX..... |
| 74 | Figura 32e-Comportamento relativo a movimentação na direção OY..... |
| 75 | Figura 32f-Comportamento relativo a movimentação de guinada..... |
| 76 | Figura 33a-Comportamento geral diante da trajetória circular proposta |
| 76 | Figura 33b-Comportamento relativo a movimentação na direção OX..... |
| 76 | Figura 33c-Comportamento relativo a movimentação na direção OY..... |

FIGURAS DOS APÊNDICES

| | |
|------|--|
| I-04 | Figura A1 - Dispositivo de Adaptação aos muros do Tanque de Provas..... |
| I-05 | Figura A2 - Foto do elemento de adaptação ao muro do Tanque de Provas..... |
| I-05 | Figura A3 - Vistas principais da haste de junta móvel..... |
| I-06 | Figura A4 - Foto do elemento elástico utilizado nos ensaios..... |
| I-08 | Figura A5 - Gráfico do comportamento elástico da mola (ensaio ascendente)..... |
| I-08 | Figura A6 - Gráfico do comportamento elástico da mola (ensaio descendente)..... |
| I-08 | Figura A7 - Gráfico do detalhe da faixa de trabalho da mola..... |
| I-09 | Figura A8 - Foto Célula de Carga utilizada nos ensaios..... |
| I-11 | Figura A9 - Foto dos equipamentos eletrônicos de Aquisição de Dados..... |
| I-12 | Figura A10 - Foto da disposição dos elementos de fixação do modelo..... |
| I-12 | Figura A11 - Foto da disposição dos elementos de fixação do modelo..... |
| I-13 | Figura A12 - Foto de detalhe de pontos de fixação de tirantes junto ao modelo..... |

| | |
|--|--|
| Figura A13 - Foto de detalhe de pontos de fixação de tirantes junto ao modelo ...I-13 | |
| Figura A14 - Foto de detalhe de pontos de fixação de tirantes junto ao modelo ...I-14 | |
| Figura A15 - Foto de detalhe de pontos de fixação diretamente do casco.....I-14 | |
| Figura A16 - Foto de detalhe de pontos de fixação diretamente do casco.....I-15 | |
| Figura A17 - Detalhe do posicionamento para produção do movimento inicial....I-17 | |
| Figura A18 - Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos lineares.....I-17 | |
| Figura A19 - Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos de rotação em torno do eixo Z.....I-18 | |
| Figura A20 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional.....I-19 | |
| Figura A21 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional.....I-19 | |
| Figura A22 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional.....I-19 | |
| Figura A23 - Quadro dos Ensaios realizados.....I-23 | |
| Figura A24 - Representação esquemática do ensaio para obtenção do Momento de inércia do modelo do VSNT – Jati I.....II-03 | |
| Figura A25 - Figura de um corpo sólido suspenso por um fio.....II-04 | |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Dados e resultados da análise para amortecimento linear..... | 38 |
| Tabela 2 - Valores médios dos resultados da análise do amortecimento linear..... | 38 |
| Tabela 3 - Coeficientes do termo quadrático do amortecimento..... | 43 |
| Tabela 4 - Valores médios dos dados de análise do amortecimento como aproximação quadrática..... | 44 |
| Tabela 5 - Valores dos amortecimentos puramente lineares e quadráticos, para cada movimento ensaiado..... | 48 |
| Tabela 6 - Valores médios dos amortecimentos puramente lineares e quadráticos, para cada movimento ensaiado..... | 48 |
| Tabela 7 - Resultados principais da análise combinatória dos amortecimentos lineares e quadráticos de cada movimento..... | 52 |
| Tabela 8 - Valores médios de massa adicional e amortecimentos lineares e quadráticos de cada movimento..... | 53 |
| Tabela 9 - Dados principais do submersível VSNT Jatú I..... | 54 |
| Tabela 10-Constantes do Controlador PD..... | 72 |

TABELAS DOS APÊNDICES

| | |
|---|------|
| Tabela A1 - Dados da calibração do elemento elástico..... | I-07 |
| Tabela A2 - Dados da calibração da célula de carga..... | I-10 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| AUV | <i>Autonomous Underwater Vehicles</i> |
| EPUSP | Escola Politécnica da Universidade de São Paulo |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo |
| ROV | <i>Remotely Operated Vehicles</i> |
| UUV | <i>Unmanned Underwater Vehicles</i> |
| VSNT | Veículo Submersível Não Tripulado |
| FATEC/JH | Faculdade de Tecnologia de Jahu |
| CPU | Unidade Central de Processamento |
| UF RJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro RJ |
| CTMSP | Centro Técnico da Marinha de São Paulo |

LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|-------------------|---|
| • Letras Romanas | |
| B | força empuxo |
| bL_i, bT_i | fator de amortecimento por unidade de massa adicional para os movimentos longitudinais e transversais |
| bV_i, bR_i | fator de amortecimento por unidade de massa adicional para os movimentos verticais e rotacionais |
| $c^#, d^{\#}$ | coeficientes de amortecimento |
| c^c | amortecimento crítico |
| C_B | centro de flutuação |
| C_G | centro de gravidade |
| e | erro |
| E | transformada de Laplace do erro |
| F_C | forças ambientais |
| F_F | força de amortecimento viscoso |
| F_T | força de propulsão |
| F_H | força (empuxo) do i-ésimo hélice |
| f_1, f_2 | força |
| G | Função de transferência |
| g | aceleração da gravidade |
| h | braço, distância entre o centro do propulsor e o eixo de rotação |
| $I_x, I_y, e I_z$ | momentos de inércia referidos respectivamente aos eixos OX, OY e OZ |
| I_{xz}, I_{zx} | produtos de inércia. |
| I_G | momento de inércia generalizado |
| I_{AD} | momento de inércia adicional ($-N_p$) |
| J | tajetória proposta para simulação do controle |
| K, M e N | momentos atuantes, respectivamente, em relação aos eixos OX, OY e OZ |
| K_A, M_A, N_A | momentos hidrodinâmicos atuantes respectivamente, em relação aos eixos OX, OY e OZ para o referencial móvel |
| K_p | ganho do controlador |
| k | constante elástica da mola |
| m | massa do veículo |
| M_{ADH} | massa adicional |
| M_G | massa generalizada |
| M_I | matriz de inércia adicional |
| O | origem do sistema de coordenadas, fixas ao modelo (sistema móvel) |
| O_0 | origem do sistema de coordenadas inercial |
| p, q e r | velocidades angulares do veículo relativos aos eixos OX, OY e OZ |

| | |
|--|--|
| p, q, e, r | acelerações angulares do veículo relativos aos eixos OX, OY e OZ |
| r_1, r_2 | razão da amplitude de dois picos de onda |
| s | operador de Laplace |
| T, t_1, t_2 | tempo |
| T_n | energia cinética |
| T_d | constante de tempo |
| u, v, e, w | projecção da velocidade do veículo respectivamente nos eixos OX, OY e OZ |
| u, v, e, w | projecção da aceleração linear do veículo respectivamente nos eixos OX, OY e OZ |
| V | velocidade do modelo |
| V^x, V^y, V^z | velocidade do modelo no sistema de referência fixo |
| W | força peso |
| w_d | frequência natural amortecida |
| w_n | frequência natural do sistema |
| x_B, y_B, z_B | coordenadas do centro de flutuação |
| x_G, y_G, z_G | coordenadas do centro de gravidade |
| x_0 | amplitude inicial do movimento de oscilação |
| X, Y, e, Z | forças atuantes respectivamente nas direções OX, OY e OZ ; |
| X^A, Y^A, Z^A | forças hidrodinâmicas atuantes respectivamente, nas direções OX, OY e OZ para o referencial móvel. |
| X^O, Y^O, Z^O | eixos ortogonais para o sistema de referencial fixo |
| X^1, Y^1, Z^1 | eixos ortogonais para o sistema de referencial móvel |
| • Letras gregas | |
| ϕ | ângulo de jogo, rotação sobre o eixo X |
| θ | ângulo de arragem, rotação sobre o eixo Y |
| ψ | ângulo de rumo, rotação sobre o eixo Z |
| $\delta x, \delta y, \delta z, \delta r$ | deformação da mola nas respectivas direções |
| α | ângulo de fase |
| ζ | fator de amortecimento |
| τ | variável de integração |

Neste trabalho é efetuado um estudo preliminar da dinâmica e controle de um submersível não tripulado para uso na navegação fluvial tendo como veículo típico o VSNT Jau I. Inicialmente é apresentado o modelo matemático e, posteriormente, é estudado o controle do veículo para traquear uma trajetória. O modelo matemático requer, entre outros parâmetros, os coeficientes de amortecimento e de massa adicional que são, para corpos de geometria complexa como no caso, difíceis de serem obtidas analiticamente. Neste trabalho estes coeficientes foram estimados experimentalmente, através de ensaios de decaimento, utilizando-se um modelo reduzido do VSNT Jau I. O estudo de controle do sistema envolve o acompanhamento de uma trajetória tridimensional definida ao longo do tempo. Os movimentos a serem controlados são o avanço, a deriva, o caturro e a guinada. Embora este sistema seja multivariável o controlador, que é baseado na teoria clássica, foi projetado admitindo-se a independência dos movimentos em cada um dos graus de liberdade. No entanto, o desempenho do sistema de controle é averiguado através de simulação dinâmica em computador digital envolvendo o modelo acoplado. Vale ressaltar que como não há propulsores laterais o sistema é sub-atuado. Os resultados obtidos com a simulação revelam que o controle clássico opera adequadamente para controlar a posição do submersível.

RESUMO

This work deals with the preliminary study of the dynamics and control of a unmanned remote operated submersible for inland water, considering VSNT Jau I as typical vehicle. At first the mathematical model is presented and then the control of the vehicle for trajectory tracking is studied. The mathematical model requires, among other parameters, the damping and additional mass coefficients that are, for bodies of complex geometry like submersible vehicle, difficult to be determined theoretically. In this work these coefficients were experimentally estimated by decaying test performing trials with a model of the VSNT Jau I. The positions to be controlled are the surge, sway, heave and yaw and four independent control laws were designed for each direction neglecting dynamics interaction among them. The control law is based on the classical control theory and the system performance is evaluated by dynamic simulation in a digital computer considering all interactions between the motions. It must be emphasized that, since there are not lateral propellers, the system is under-actuated. The results obtained by simulation reveals that the control law works properly to track a given trajectory.

ABSTRACT

Este trabalho é parte de um estudo que tem por objetivo tornar possível, técnica e economicamente, o desenvolvimento de um submersível comandado remotamente para operar no ambiente fluvial, em especial na captação de imagens.

O objeto de desenvolvimento é um submersível não tripulado, operado remotamente via cabo, pelo modo-"Theater", para ser utilizado no âmbito da hidrovia, mundo de um sistema de captação de imagens para que possa enviar imagens em tempo real para um monitor na superfície, permitindo inclusive a gravação das imagens geradas.

A finalidade deste equipamento é auxiliar atividades subaquáticas de análise e história de obras civis, tais como: estruturas de obras de barramento de rios, pilares de pontes, estruturas acostáveis de terminais de transbordo de carga, cabos submersos, obras vivas de embarcações, entre outros, em ambiente fluvial.

Outras aplicações poderão também ser consideradas como: analisar e historiar condições do leito do rio, permitir o apoio a pesquisas relacionadas ao meio ambiente, etc.

O equipamento em desenvolvimento será equipado apenas com sistema de captação de imagens, podendo outros equipamentos periféricos ser acrescidos variando a função ou missão a ser dada ao dispositivo.

1.1 Descrição do Problema

Embora seja constatada a crescente utilização destes equipamentos como instrumentos de apoio às atividades humanas, principalmente em ambientes marítimos em todas as partes do mundo, paradoxalmente, há a carência deste tipo de recurso em ambientes fluviais, especialmente no Brasil.

Um dos principais objetivos, também, é poder desenvolver um equipamento que possa ser viável economicamente, uma vez que, conforme é mostrado em Amorim et al (1997), equipamentos do gênero existem e operam por todo mundo, todavia com custo elevado, inviabilizando por vezes, seu uso para tarefas mais simples e em águas rasas.

Na Faculdade de Tecnologia de Jahu (FATEC-JH), entre 1995 e 1998, foi construída uma primeira versão de um veículo submersível não tripulado operado remotamente, via cabo, para ser operado na hidrovia. Esta versão conta apenas com dois motores, responsáveis pela propulsão e manobras, e tais motores são dotados de sistemas de controle linear de rotação e de reversão. Conta também com um sistema de lastro móvel e um equipamento de filmagens, o que lhe permite a execução da tarefa de inspeção visual. No desenvolvimento deste submersível, foram utilizados materiais de baixo custo e de fácil disponibilidade no mercado.

A forma de controle utilizada é manual, onde no console de comando, o operador dispõe de acionadores eletromecânicos das diversas funções como: da regulação de lastro para a movimentação vertical; dos controles de rotação e reversão dos dois propulsores de forma independente, além do controle de iluminação e de filmagens.

Ensaios, tanto em ambiente controlado como em ambiente real, mostraram a viabilidade da linha de concepção do projeto.

Apesar desta constatação foram observados alguns problemas na manobrabilidade do veículo, principalmente em função dos limitados recursos técnicos, de contar com apenas dois propulsores e, da complexidade do comportamento dinâmico do veículo, indicando um estudo mais aprofundado para o seu controle.

Para melhorar o projeto do sistema de controle é necessário o conhecimento da dinâmica do veículo, que envolve um estudo mais detalhado das forças hidrodinâmicas que atuam sobre ele. Neste caso, é importante a forma de interação entre o fluido e o corpo.

Em geral esse tipo de veículo tem forma geométrica complexa que impede o cálculo hidrodinâmico a partir das equações de mecânica dos fluidos. Em vista disso, alguns coeficientes do modelamento matemático serão obtidos experimentalmente.

Embora veículos submersíveis não tripulados venham sendo utilizados há bastante tempo, a operação destes veículos continua sendo tarefa difícil, longa e cansativa para o operador. A principal causa desta dificuldade é a complexidade do comportamento dinâmico do submersível. Em geral os graus de liberdade do aparelho são altamente interativos, fato que dificulta ao operador a coordenação do comando dos seis graus de liberdade do veículo (Cunha 2000).

Apesar do submersível VSNT Jau I ter sido projetado para operar comandado por um sistema de controle simples, a FATEC JH pretende explorar a utilização de veículos submersíveis operados autonomamente.

1.2 Histórico do Submersível VSNT

No final do ano de 1995, na Faculdade de Tecnologia de Jahu, por iniciativa do professor Luiz Alberto Sorani e de um grupo de alunos, foram iniciados estudos preliminares para o projeto e construção de um pequeno submersível de pesquisa, que pudesse tornar possível técnica e economicamente o desenvolvimento de um robô submersível comandado por controle remoto para operar no ambiente fluvial na captação de imagens.

No ano de 1997, a primeira versão deste equipamento foi construída, tratando-se de um veículo submersível de pequenas dimensões, com propulsão elétrica e que pode trabalhar em profundidades de até 30 metros, promovendo registro de imagens. O protótipo desenvolvido foi construído em fibra de vidro e equipado apenas com uma câmera de vídeo, recebendo a denominação de VSNT Jau I.

A estrutura do veículo divide-se em três partes principais: o corpo básico, a torre e a bolina. O corpo básico tem formato cilíndrico com extremidades de formato parabólico, com 1,315m de comprimento total e 0,406m de diâmetro, onde se abrigam os sistemas elétricos, eletrônicos, mecânicos e pneumáticos. Na proa deste corpo, situa-se a câmara de vídeo responsável pela captura de imagens e, na popa, as saídas dos eixos do sistema propulsor, uma vez que os motores também estão abrigados neste compartimento.

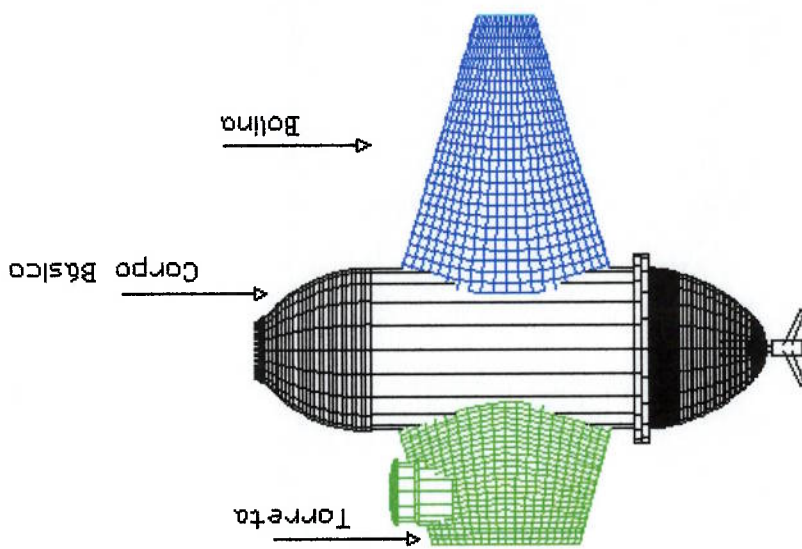


Fig. 1 - Partes básicas do submersível VSNT Jau I.

Sobre o corpo básico situa-se a torre. Na torre abriga-se o refletor, cuja função é a geração de luz artificial para auxiliar o registro de imagens. Nela, há também uma estrutura que possibilita o içamento e transporte do submersível, uma vez que o mesmo tem uma massa total de 164,14Kg.

A terceira parte, a bolina, que se localiza na parte inferior do corpo principal, é formada por dois semi-elipsóides com uma das bases menor que a outra e em seu interior abrigam-se os sistemas de lastro fixo e móvel.



Fig. 3 - Vista de perfil.

As figuras a seguir, apresentam fotografias do VSNT-Jaú I em diversas vistas.

Fig. 2 - Aspecto geral do submersível VSNT - Jaú I em 3 dimensões.

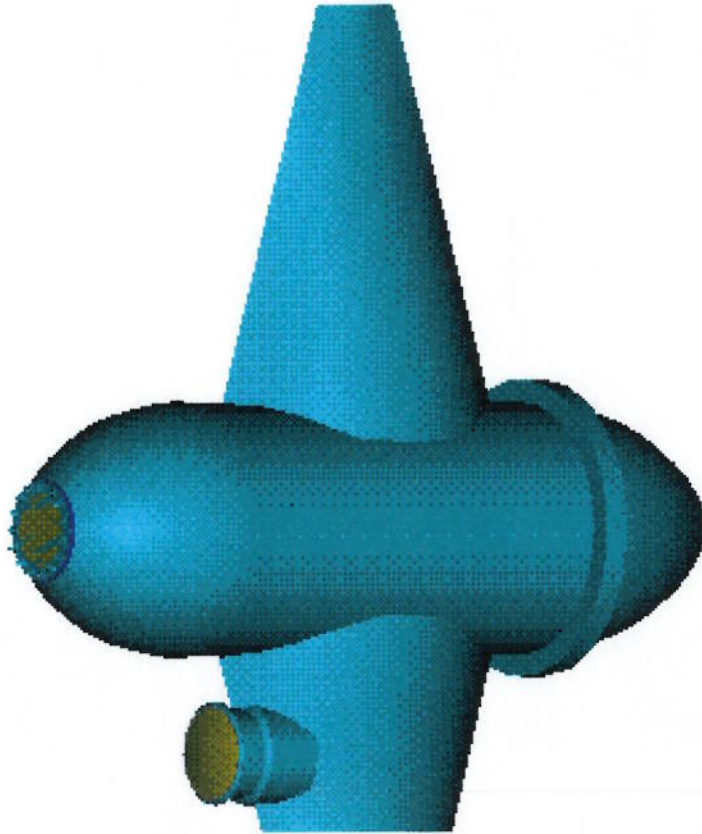


Fig. 6 - Vista frontal.



Fig. 5 - Vista inferior.

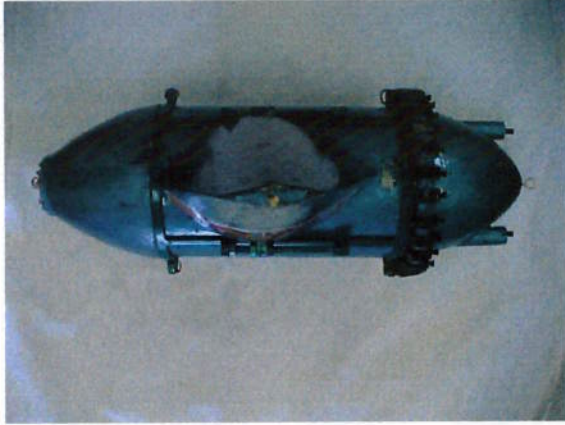


Fig. 4 - Vista superior.

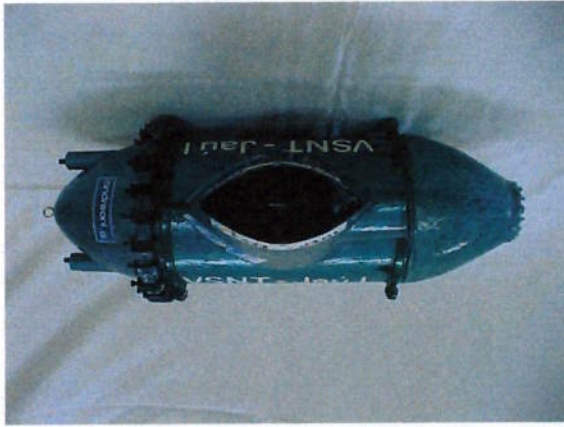
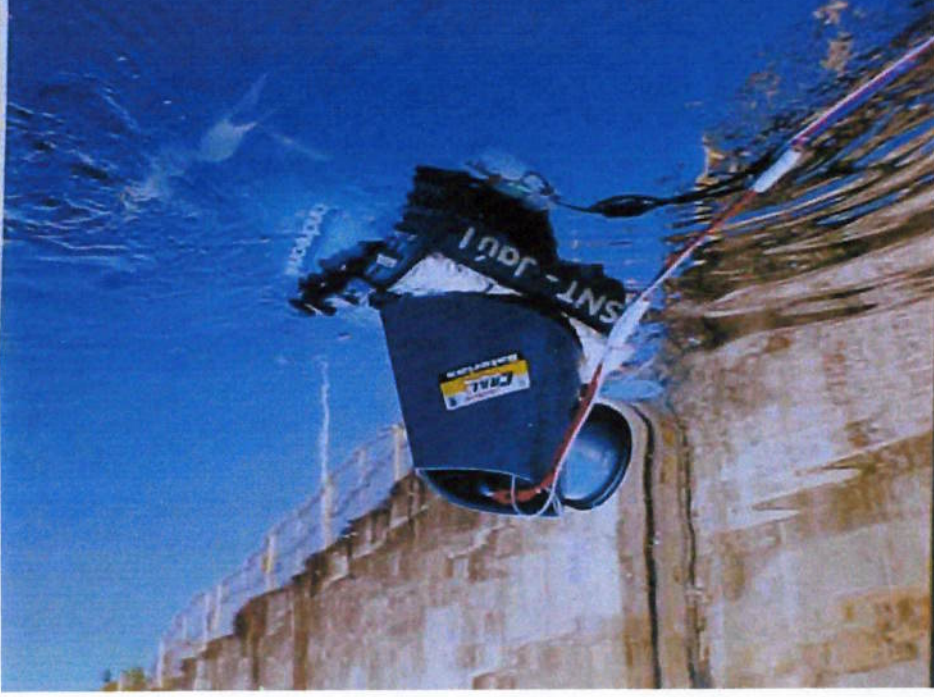


Fig. 8 - Foto do VSNT Jau I em operação na Eclusa de Barra Bonita-SP.



Esta versão realizou testes de mergulho na câmara da barragem de Barra Bonita-SP e, de modo geral, apresentou desempenho adequado, porém, no que tange a manobrabilidade, mostrou a necessidade de um aperfeiçoamento no sistema de controle e monitoramento.

Fig. 7 - Vista de popa.



1.3 Revisão da Literatura

1.3.1 Histórico da Exploração Submarina pelo Homem

A história da exploração submarina pelo homem, com a utilização de equipamentos de auxílio é bastante antiga e, segundo Stephens (1964) e Roscoe (1971) suas origens misturam-se e confundem-se com lendas, e relatos possivelmente distorcidos. Segundo estes autores a primeira referência à exploração submarina com auxílio de equipamento data de 322 a.C., quando Alexandre Magno submergiu em um tonel de material não especificado com a finalidade de observar a fauna submarina, ou para inspecionar as defesas submarinas em Tiro. Existem mais referências a outras experiências, ou apenas a esboços de estudos de equipamentos auxiliares a mergulhadores, que, assim como a primeira experiência acima narrada, carecem de comprovação. Ambos os autores citam esboços de um equipamento elaborado por Leonardo da Vinci, no século XVI, porém, segundo estes autores, o projeto não foi testado, nem detalhado, uma vez que este cientista acreditava que esta invenção seria utilizada com o objetivo de submergir outras embarcações, causando mortes.

No que se refere às atividades de pesquisa, segundo Gabler (1991), seu desenvolvimento começou de fato no século XX, onde se destacam o TRIESTE e o BATHYSCAPHE TRIESTE, projetados pelo professor Piccard e seu filho Jaques, concluídos respectivamente em 1953 e 1958, que chegaram a operar a uma profundidade máxima de aproximadamente 10000 metros. Contemporaneamente, os franceses desenvolvem veículos similares, batiscafos da série FNRS.

De acordo com Lawrie (1983) e ainda com Gabler (1991), a partir de então, foram construídos inúmeros pequenos veículos com finalidades variadas como a pesquisa (observação e resgate) e resgate de material militar. Outras possíveis utilizações deste tipo de veículo, os autores citam: observações e registros, busca e salvamento, utilização como veículo para mergulhadores, auxílio na construção e manutenção de tubulação e cabramento no fundo, verificação e inspeção de estruturas e tubulações submarinas.

Uma das utilizações clássicas de veículos submersíveis foram os trabalhos realizados em conjunto entre o Instituto Oceanográfico de Woods Hole e a Marinha dos Estados Unidos, na localização e observação dos escombros do transatlântico Titanic e do encouraçado Bismarck, conforme relata Amorim et al (1997).

A exploração mais detalhada foi realizada com os submersíveis Alvin e Jason Jr. O Alvin é um mini-submarino totalmente independente, tripulado por três pessoas, equipado com câmeras de vídeo, responsável pela aproximação ao Titanic e pelo transporte do Jason Jr. Este último um submersível não tripulado controlado via cabo (60 m), de pequeno porte, capaz de explorar o interior da embarcação, gerando e transmitindo as imagens (via cabo), através de uma câmara de vídeo móvel. Este veículo dotava 4 motores elétricos alimentados por baterias, dois deles posicionados na popa e os outros dois lateralmente. O Jason Jr. foi especialmente desenvolvido para esta missão, a um custo de 1 milhão de dólares, financiado pela Marinha dos Estados Unidos e construído pelo Instituto Oceanográfico de Woods Hole (Amorim et al 1997).

Diversos outros submersíveis de pesquisa têm sido desenvolvidos e utilizados pelo mundo todo, como o caso do "Marius", um submersível autônomo apresentado por Pascoal (1994), do submersível "Martin" desenvolvido especialmente para inspeção em tubulações, descrito por Egeskov (1995), o "Murs 300 Mark II", desenvolvido para inspeção visual de estruturas submersas apresentada por Ishidera (1996), Caccia (2000) descreve o submersível "Romeo" totalmente autônomo para aplicação em pesquisas científicas, Fujii (1993) descreve o submersível autônomo "Twin Burger 2" e muitos outros

1.3.2 A Experiência Nacional no Desenvolvimento de Robôs Submersíveis para Pesquisa

De acordo com Amorim (1997), na experiência nacional, pode-se citar o Batisp ou Minus, como o primeiro submersível construído no país, em 1980, pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), para resgate de instrumento de coleta de dados no

mar. Este submersível não tem propulsão própria, sendo rebocado por cabo a partir da superfície, em uma embarcação, e conta com tripulação de uma pessoa. Foi construído em aço, com visor acrílico, sensor de profundidade, sistema de lastro que controla sua movimentação vertical e profundidade de operação de 200 m. Nada consta, na pesquisa bibliográfica realizada que estes institutos tenham construído outras versões deste tipo de veículo.

Amorim et al (1997), relata também que na iniciativa privada nacional, há uma empresa - a Consub Equipamentos e Serviços Ltda., especializada na fabricação e operação de equipamentos e de veículos de exploração submarina. Esta empresa construiu os seguintes veículos:

- Mergus, com 600 kg, casco de alumínio, seis motores elétricos alimentados por baterias, profundidade de operação de 500 metros, velocidade a vante de 4 nós, dois metros de diâmetro, um tripulante, equipado com filmadora, máquinas fotográficas, sistema de iluminação e braço mecânico.

- Argos, submarino ST-100, veículo com a finalidade de realizar passeios de ecoturismo. Com 45 toneladas, sendo que seis delas são em baterias e motores elétricos. Possui autonomia de 8 horas, capacidade para 16 passageiros e 2 tripulantes, 11 metros de comprimento, 3,7 metros de largura e 5,5 metros de altura, e atinge a velocidade a vante de 3 nós.

Cunha et al (2000), da UFRJ, apresenta um sistema de posicionamento dinâmico testado no submersível "Tatu" também desenvolvido e construído pela Consub Equipamentos e Serviços Ltda.

A Consub Equipamentos e Serviços Ltda, empresa brasileira, que teve início de suas atividades em 1983, atuando na área de tecnologia subaquática, inclusive no desenvolvimento de equipamentos submersíveis, em 1996, uniu-se a NORSUL OFFSHORE S.A. Esta outra, atuante no segmento de operação de navios, criando a CONSUB S.A.. Em 1997 a empresa norueguesa DSND (*Det Sondertjelds Norske*

Dampskibsselskab) equivalente a Companhia Norueguesa de Barcos a Vapor de Sondenfeld, assume o controle acionário transformando a Consub S.A. em DSND Consub S.A. e, a subsidiária brasileira não mais se dedica ao desenvolvimento de robôs submarinos.

No Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, Heleno (1983) apresentou o desenvolvimento de uma modelagem matemática para submarinos, apresentando também os coeficientes das equações dinâmicas e exemplos de aplicação. Canhetti (1998) apresentou dissertação referente ao projeto do Modelo Livre desenvolvido pelo CTMSP, desenvolvendo uma modelagem do comportamento hidrodinâmico e o respectivo projeto de controle

1.3.3 Os Atuais Robôs Submarinos de Pesquisa

Seymour et al (1994) apresenta um relato elaborado por um grupo de cientistas de diversas instituições de diferentes países (WTEC - *World Technology Evaluation Center Panel*), que se reuniu com o objetivo de levantar o estado-da-arte da tecnologia em veículos submarinos e da tecnologia submarina nos países da comunidade Européia, fazendo uma análise comparativa entre os países do oeste Europeu e aqueles pertencentes à antiga União Soviética, tanto em meios acadêmicos como comerciais e militares. As conclusões apontadas por este grupo indicam que o final da Guerra Fria canalizou as inovações tecnológicas na área para aspectos mais comerciais, especialmente na prospecção e exploração de petróleo e gás, principalmente no mar do Norte.

Por este relato evidencia-se que, os países pertencentes à antiga União Soviética seguiram uma linha de desenvolvimento de veículos tripulados, com uma frota significativa em termos numéricos. Apresentam limitações, quando comparados com os demais países europeus, em recursos computacionais; porém, dispõem de recursos humanos altamente especializados em todas as etapas da tecnologia subaquática, além de instalações físicas apropriadas para testes, que estão subutilizadas.

Observa-se um esforço, ainda incipiente, na organização de empresas que exploram esta tecnologia para fins comerciais.

Ainda, segundo Seymour et al (1994) os países pertencentes ao oeste europeu (mais especificamente a Inglaterra e França) voltaram seus esforços na elaboração de veículos não tripulados, conhecidos como ROV (*Remotely Operated Vehicles*). Nestes países, a pesquisa recebe estímulo financeiro de indústrias ligadas a prospeção e exploração de plataformas *offshore* de petróleo e gás e da indústria pesqueira, com a crescente diminuição da participação das universidades no desenvolvimento de tecnologia em função de contêndes de despesas neste setor. Como nestes países a linha mestra é o desenvolvimento de ROVs, notam-se grandes avanços no desenvolvimento de sensores e amostradores. Observa-se também grande preocupação com a autonomia dos veículos, de forma que eles possam vencer grandes distâncias.

O mesmo autor cita como grandes empresas atuando na indústria de construção de submersíveis, as seguintes: Slingsby Engineering Ltda. e Deacon Laboratory Autosub, na Inglaterra, Perry Tritech nos EUA e International Submarine Engineering no Canadá.

1.3.4 A classificação segundo o modo de operação

Existem quatro modos diferentes de operação de um robô submersível, modos estes relacionados com o grau de liberdade ou autonomia, que vai do tradicional modo-ROV até o totalmente autônomo modo-AUV, com dois estágios intermediários, os modos "heter" e UVV, conforme Egeskov et al(1995)apresentados na Fig. 9.

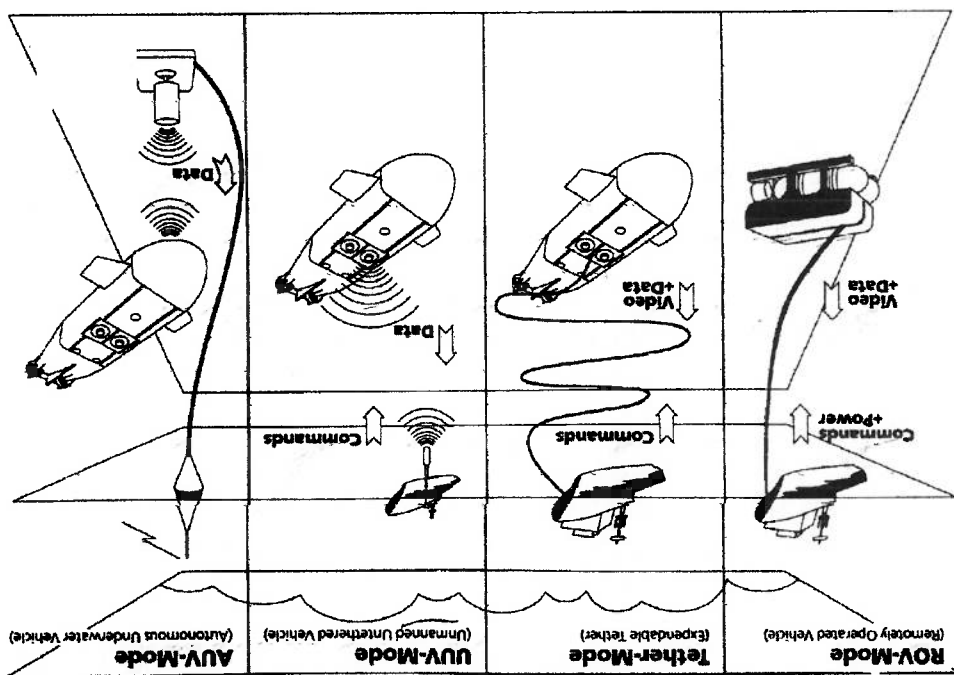
Um robô submersível operado no modo-ROV é conectado a uma embarcação de apoio ou plataforma, através de um cabo elétrico denominado umbilical, que transfere energia elétrica, sinais de comando, bem como o retorno dos sinais dos dados coletados, interligando fisicamente a estação de apoio ao submersível.

Em função de o umbilical possuir inúmeras vias de comunicação, inclusive de transferência de energia elétrica, apresenta diâmetro considerável e numa zona de ondas ou correntezas provoca arrasto significativo, de maneira que o modo-ROV é sensível às condições do ambiente e é indicado especialmente para águas calmas. Em tarefas que requerem uma embarcação de apoio, para inclusive fazer o suprimento de energia elétrica, este modo de operação pode se tornar dispendioso, em função dos custos da embarcação de apoio e do sistema de Posicionamento Dinâmico normalmente necessário e não propriamente ao submersível.

Um robô submersível operado no modo-ROV é conectado a uma embarcação de apoio ou plataforma, através de um cabo elétrico denominado umbilical, que transfere energia elétrica, sinais de comando, bem como o retorno dos sinais dos dados coletados, interligando fisicamente a estação de apoio ao submersível.

a) O modo-ROV

Fig. 9 - Diferentes modos de operação, desde o ROV até o AUV. Egeskov et al (1995).



b) O modo- "THEETER"

O robô submersível neste modo de operação também pode ser conectado a uma embarcação de apoio, plataforma, bem como numa estação fixa ou móvel. O que distingue este modo do modo-ROV é o cabo de conexão, que para este caso é um fino e longo cabo elétrico ou de fibra óptica, que transmite somente sinais de comando e controle. Através do modo- "Theeter" não se transmite energia elétrica de potência. Este modo também requer condições de águas relativamente calmas para operações de uma embarcação de apoio, mas o umbilical pode ser constituído de um cabo muito fino e leve com uma redução apreciável na força de arrasto. Igualmente ao modo-ROV, em tarefas que requerem uma embarcação de apoio, de onde são realizados os comandos, o modo- "Theeter" de operação pode ser tornar caro, em função dos custos da embarcação de apoio e do sistema de Posicionamento Dinâmico normalmente necessário, tornando muito barato caso haja possibilidade de dispensa deste tipo de equipamento de apoio.

c) O modo-UUV

Neste modo de operação UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*), há um contato acústico entre o robô e a embarcação de apoio ou plataforma. Os sinais de comando e controle são transmitidos através de um sinal acústico. A velocidade de transmissão de dados é da ordem de 1kbits/s, de modo que é possível promover um controle em tempo real de todo o sistema. A vantagem deste modo está em não haver contato físico entre o sistema de comando e o robô propriamente dito, e considerando este não contato físico é dispensável o sistema de Posicionamento Dinâmico que encarece esse tipo de missão.

O robô equipado com este tipo de sistema torna-se um tanto mais sofisticado e dispendioso comparado com aqueles dos modos ROV e "Theeter".

d) O modo-AUV

No modo-AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) é dispensável qualquer equipamento de apoio, tão somente aquele destinado ao seu lançamento no local a ser

O sistema de controle de um submersível, deve permitir a operação remota do veículo, nas mais variadas condições, desde o controle manual passando pelo controle de trajetória automática até, dependendo do caso, o controle de atitude do veículo, sendo que a missão do submersível é que define o tipo de controle a ser adotado para o mesmo (Domingues 1989).

1.3.6 O Sistema de Controle

Conforme Maki (1986) e Rossolini et al (2000), desde o modo-ROV até o modo mais autônomo AUV, o controle de manobras apresenta diversas dificuldades, devido a não linearidade da dinâmica, presença de distúrbios externos não mensuráveis, até o alto nível de incertezas nos modelos disponíveis.

A diversidade de modos de operação e as necessidades impostas às tarefas destes equipamentos, têm gerado o desenvolvimento de novas tecnologias especialmente nos campos da hidroacústica, microeletrônica e robótica, bem como o desenvolvimento de uma certa gama de estudos referentes ao comportamento dinâmico destes robôs submersíveis.

1.3.5 O Estudo da Dinâmica dos Atuais Submersíveis de Pesquisa

Neste modo não se necessita obrigatoriamente de embarcação de apoio, e depende das condições climáticas e da água, o que o torna bastante interessante.

Neste modo não há qualquer contato mecânico do submersível com a embarcação de apoio. Informações de comando e controle são transmitidas por um sinal acústico do robô até uma estação de comunicação submersa, esta última através de uma antena instalada sobre bóias na superfície; retransmitem-os ao satélite para comando a longa distância.

De acordo com Ogata (1998), o primeiro importante trabalho no campo do controle automático foi o de James Watt, que construiu, no século XVIII, um controlador centrífugo para o controle de velocidade de uma máquina a vapor. Cita ainda que outros trabalhos importantes no início do desenvolvimento da teoria do controle se devem a Minorsky, Hazen e Nyquist, dentre outros.

Minorsky, em 1922 trabalhou em controladores automáticos para pilotar navios e mostrou como poderia determinar sua estabilidade a partir da representação do sistema através de equações diferenciais. Em 1932, Nyquist desenvolveu um procedimento relativamente simples para determinar a estabilidade de sistemas a malha fechada com base na resposta estacionária de sistemas a malha aberta a excitação senoidal. Em 1934, Hazen, que introduziu o termo "servomecanismos" para designar sistemas de controle de posição, discutiu o projeto de servomecanismos a relés capazes de seguir, de muito perto, uma excitação variável no tempo (Ogata 1998).

O controle automático recentemente, tem desenvolvido papel vital no avanço da engenharia e da ciência, e aplicações recentes da moderna teoria de controle incluem outras áreas além da engenharia tais como sistemas biológicos, biomédicos, econômicos e socioeconômicos.

No campo de controle de veículos submersíveis, existem diversas referências, das quais utilizou-se especialmente Fossen (1994) e Ogata (1998), que tratam do assunto com grande propriedade, abrangendo desde a modelagem matemática de veículos submersos, perturbações ambientais até estabilidade e controle.

Fossen (1994), apresenta diferentes tipos de controle para velocidade, rumo, trim e profundidade, utilizando controladores do tipo PID (Proporcional Integrativo Derivativo), controle deslizante, adaptativo e outros.

Diversos submersíveis têm sido desenvolvidos e equipados, baseados nas técnicas de controle automático, propiciando o desenvolvimento de submersíveis totalmente autônomos, como comentado no item 1.3.1.

O objetivo deste trabalho é efetuar um estudo preliminar da dinâmica e controle de um submarível não tripulado para uso na navegação interior operado autonomamente.

Para cumprir tal objetivo, inicialmente é definido o modelo matemático, sendo que alguns de seus coeficientes são obtidos experimentalmente. Posteriormente é estudado o sistema de controle de posição e traqueamento do submarível.

1.4 Objetivo do Trabalho

No primeiro capítulo deste trabalho, apresenta-se: uma descrição do problema, um histórico geral do Projeto VSNT Jau e uma revisão bibliográfica sobre o assunto, sendo apresentado também os objetivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

No capítulo seguinte, o capítulo 2, serão apresentados os esforços atuantes e expressões referentes à veículos submaríveis de operação remota, objetivando o modelamento matemático do submarível em estudo.

No capítulo 3 será apresentado o sistema desenvolvido para a obtenção experimental de coeficientes de forças hidrodinâmicas de difícil obtenção analítica e, ainda a aplicação numérica do modelo matemático, para alguns movimentos.

No capítulo 4, será apresentado o estudo para o sistema de controle de manobras, com vistas a tornar o submarível VSNT Jau I, um veículo autônomo. No capítulo 5, serão apresentadas as conclusões e os resultados .

Como apêndices, serão apresentados: o relatório dos ensaios realizados no tanque de provas para o levantamento dos coeficientes hidrodinâmicos do VSNT Jau I; o relatório do ensaio para obtenção do momento de inércia do modelo em escala reduzida; o relatório dos dados da análise de massa adicional usando a aproximação

linear, o relatório dos dados da análise de massa adicional usando a aproximação puramente quadrática, o relatório dos dados da análise de massa adicional usando a combinação de linear e quadrática e, o relatório do estudo de conversão de escala.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para desenvolver o modelo matemático de submersíveis é usual utilizar dois referenciais, conforme é mostrado na figura 10.

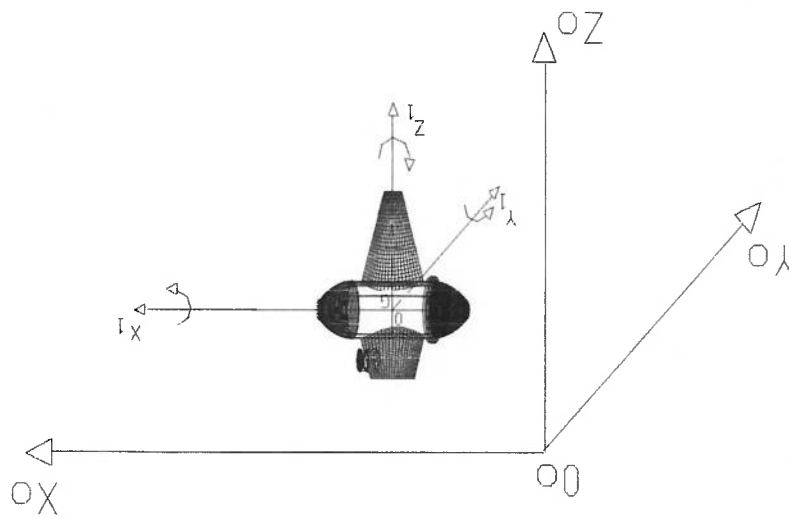


Fig. 10 - Sistema de Coordenadas Fixa e Móvel

O primeiro sistema de coordenadas, $O_1X_1Y_1Z_1$, é solidário ao veículo e o segundo, $O_0X_0Y_0Z_0$, é fixado na Terra, o qual é admitido como referencial inercial. O plano X_0Y_0 é paralelo à superfície da água. A modelagem matemática utiliza os dois referenciais, sendo que os movimentos do veículo são descritos em relação ao referencial móvel e as posições são calculadas para o referencial inercial. Esta abordagem é utilizada uma vez que os esforços hidrodinâmicos são determinados com menor dificuldade quando referidos ao próprio veículo. Para passar do sistema de referência móvel para o fixo são utilizados os ângulos de Euler.

Neste trabalho, em função das características do VSNNT Jau I, serão admitidas as seguintes hipóteses para desenvolver o modelamento matemático do submersível:

- o corpo é rígido;
- os pesos e suas distribuições no interior do veículo são constantes;
- o centro de gravidade está no plano de simetria longitudinal do modelo, $(y_G = 0)$;
- dois eixos principais de inércia estão contidos nesse plano de simetria;
- o eixo OX_1 coincide com o eixo longitudinal do modelo; e
- o modelo é simétrico apenas entre boreste e bombordo.

2.1 A Equação de Movimento

Com as hipóteses anteriormente apresentadas, para o referencial móvel tem-se que o movimento de um veículo submersível com a posição do centro de gravidade definida pelas coordenadas $(x_G, 0, z_G)$, é descrito pelas seguintes equações de movimento (Fossem, 1994):

$$\begin{aligned}
 X = m [\dot{n} - v_r + w q - x_G \dot{q}^2 + r^2 + z_G (\dot{p} r + \dot{q})] \\
 Y = m [\dot{v} - w d + n r + z_G (\dot{p} r + \dot{q})] \\
 Z = m [\dot{w} - n b + v d - d_z \dot{q}^2 + q^2 + x_G (\dot{r} - \dot{q})] \\
 K = I^x \dot{p}^x + (I^z - I^y) \dot{q}^y - \dot{r} (I^x p^y - I^y p^x) + \dot{r} (I^z b d + I^z q^2 + r^2) - z_G \dot{m} u - (v - w p + n r) \\
 M = I^y \dot{q}^y + (I^x - I^z) \dot{r}^z + d r^z + \dot{r}^z I^z (\dot{q} - d b) + x_G \dot{r}^z I^z (\dot{q} - d b) \\
 N = I^z \dot{r}^z + (I^y - I^x) \dot{p}^x - b \dot{d}^x - \dot{q} (I^x p^y - I^y p^x) + (I^z d r^z + b r^z - I^z \dot{p}^x + m x_G \dot{u} + v + r n - w d)
 \end{aligned}$$

(2.1)

onde: m é a massa do veículo;

n, v, w e $\dot{n}, \dot{v}, \dot{w}$ são, respectivamente, as projeções de velocidade e aceleração linear do veículo nos eixos OX_1, OY_1 e OZ_1 ;

Na equação (2.1), esforços externos no submersível devem-se às interações hidrodinâmicas (representadas pela força de massa e momento adicional,

sendo:
 ϕ o ângulo de jogo, rotação em torno do eixo X_1 ;
 θ o ângulo de arfagem, rotação em torno do eixo X_1 ;
 ψ o ângulo de rumo, rotação em torno do eixo Z_1 ;
 x, y, z as velocidades lineares do modelo no sistema de referência fixo nas respectivas direções X, Y, Z .

$$(2.3) \quad \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\phi \tan \theta & 0 \\ 0 & \cos \phi & \text{sen}\phi / \cos \theta \\ 0 & \cos \phi / \cos \theta & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Já as velocidades angulares são dadas por:

$$(2.2) \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\text{sen}\psi \cos \theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta + \text{sen}\phi \text{sen}\theta \text{sen}\psi & \cos \theta \text{sen}\phi \\ \cos \psi \text{sen}\theta + \text{sen}\psi \text{sen}\phi \cos \theta & -\text{sen}\psi \text{sen}\theta \text{sen}\phi & \cos \theta \text{sen}\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

segundo Fossem (1994) são calculadas através da relação:
 As velocidades lineares, do referencial móvel para o referencial fixo,

x_G, z_G coordenadas do centro de gravidade;
 I_{XZ}, I_{YZ} são os produtos de inércia;
 $OX_1, OY_1 e OZ_1$ são os produtos de inércia;
 $I^x, I^y e I^z$ são respectivamente, os momentos de inércia referidos aos eixos $OX_1, OY_1 e OZ_1$;
 $K, M e N$ são, os momentos atuantes, respectivamente, em relação aos eixos $X, Y e Z$ são, respectivamente, as forças atuantes nas direções $OX_1, OY_1 e OZ_1$;
 veículo relativos aos eixos $OX_1, OY_1 e OZ_1$;
 $p, q, r e \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ são, respectivamente, as velocidades e acelerações angulares do

amortecimento viscoso e restauração), agentes ambientais (representados pela correnteza da água), e propulsores.

2.1.1 Forças Hidrodinâmicas

a) Massas e Momentos Adicionais

Massa adicional, normalmente, tem sido interpretada como a parcela da massa do fluido que é arrastada pelo movimento do corpo e somado a esta. No entanto, segundo Fossem (1994), deve ser compreendida como esforços induzidos pela pressão devido ao movimento harmônico forçado de um corpo.

Uma forma de tratar o problema é considerar que o movimento do submersível desloca o fluido, havendo portanto dissipação de energia. Este tipo de tratamento é feito analisando a energia cinética do fluido T_A que é dada por:

$$T_A = \frac{1}{2} V^T M_A V \quad (2.4)$$

onde: $V = [u, v, w, d, b, r]^T$ (2.5)

$$M_A = \begin{bmatrix} X'' & X' & X'' & X' & X'' & X' \\ X'' & Y' & Y'' & Y' & Y'' & Y' \\ X'' & Z' & Z'' & Z' & Z'' & Z' \\ K'' & K' & K'' & K' & K'' & K' \\ M'' & M' & M'' & M' & M'' & M' \\ N'' & N' & N'' & N' & N'' & N' \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$-X''$ é termo de massa adicional, dado por $X'' = \frac{\partial X}{\partial u}$ e, assim por diante, seguindo a notação do SNAME(1950).

b) Amortecimento Viscoso

Na movimentação de um corpo sólido através de um fluido viscoso, forças fricionais estarão presentes, reagindo contra a movimentação deste corpo. No caso de um submersível esta reação, também conhecida por força de amortecimento viscoso, exerce grande influência na movimentação do aparelho.

Como já destacado no capítulo anterior, a forma exata deste esforço é desconhecida. Este amortecimento é função, principalmente, da geometria do submersível e, seus coeficientes são obtidos usualmente a partir de testes em tanque de prova a túnel de vento (Cunha et al 2000).

Os esforços viscosos de maneira geral envolvem um termo linear e/ou outro termo quadrático. Levando isso em consideração, este esforço de amortecimento viscoso F_p , para cada direção pode ser modelada por:

$$(2.8) \quad \begin{bmatrix} F_{FX} \\ F_{FY} \\ F_{FZ} \\ F_{FK} \\ F_{FM} \\ F_{FN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ v \\ w \\ d \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ v \\ w \\ d \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

onde: c_{ii} e d_{ii} são coeficientes de amortecimento.

A equação (2.8) expressa a combinação dos amortecimentos linear e quadrático. Para o amortecimento linear, todos os elementos d_{ii} são nulos, e para o amortecimento quadrático puro, todos os elementos c_{ii} e que são nulos.

c) Esforços de Restauração

Na terminologia hidrodinâmica, os esforços de flutuação e de gravidade, que competem entre si, são chamadas de esforços de restauração, aqui denotadas por \underline{F}_R . O centro de gravidade da força peso é definido por $C_G = [x_G, 0, z_G]^T$. Similarmente, o ponto de aplicação da força empuxo é dado por $C_B = [x_B, y_B, z_B]^T$.

O termo \underline{F}_R dado por Fossem (1994), fica assim descrito:

$$(2.9) \quad \begin{bmatrix} F_{Rx} \\ F_{Ry} \\ F_{Rz} \\ F_{RK} \\ F_{RM} \\ F_{RN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (W - B) \text{sen} \theta \\ -(W - B) \text{sen} \theta \cos \theta \\ -(W - B) \cos \phi \cos \theta \\ (y^B B) \cos \theta \cos \phi + (z^G W - z^B B) \cos \theta \text{sen} \phi \\ (z^G W - z^B B) \text{sen} \theta + (x^G W - x^B B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x^G W - x^B B) \cos \theta \text{sen} \phi + (y^B B) \text{sen} \theta \end{bmatrix}$$

onde W = peso;

B = empuxo;

2.1.2 Forças Ambientais

Esforços relacionados a correnteza das águas, a ondas e a ventos são consideradas forças ambientais \underline{F}_C , que influenciam na dinâmica de um veículo. Como no caso, trata-se do estudo de um veículo submersível para operação em navegação interior, isto é, em ambientes fechados e de águas calmas, como é o caso de câmara de eclusas, lagos e represas, todas essas forças serão desconsideradas para o presente estudo.

2.1.3 Forças Propulsoras

No caso de submersível a sua movimentação é garantida em geral, através de forças geradas por propulsores. A quantidade e localização destes propulsores dependem da forma do veículo e dos requisitos de operação.

Admitindo que o veículo tenha n_x, n_y e n_z propulsores nas superfícies paralelas aos planos X_1Y_1, Z_1Y_1 e X_1Z_1 respectivamente, tem-se que os esforços devido aos propulsores podem ser dados por:

$$(2.10) \quad \begin{bmatrix} F_{TX} \\ F_{TY} \\ F_{TZ} \\ F_{TK} \\ F_{TM} \\ F_{TN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n_x}^1 F_{T_x} & \sum_{n_y}^1 F_{T_y} & \sum_{n_z}^1 F_{T_z} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{Y_x} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{Z_x} \\ \sum_{n_x}^1 F_{T_x} & \sum_{n_y}^1 F_{T_y} & \sum_{n_z}^1 F_{T_z} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_y} & \sum_{n_y}^1 F_{T_y} h_{Y_y} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{Z_y} \\ \sum_{n_x}^1 F_{T_x} & \sum_{n_y}^1 F_{T_y} & \sum_{n_z}^1 F_{T_z} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_z} & \sum_{n_y}^1 F_{T_y} h_{Y_z} & \sum_{n_z}^1 F_{T_z} h_{Z_z} \\ \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_y} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_z} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x}^2 & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} h_{Y_x} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} h_{Z_x} \\ \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{Y_x} & \sum_{n_y}^1 F_{T_y} h_{Y_y} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{Z_y} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} h_{Y_x} & \sum_{n_y}^1 F_{T_y} h_{Y_y}^2 & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} h_{Z_y} \\ \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{Z_x} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{Z_y} & \sum_{n_z}^1 F_{T_z} h_{Z_z} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} h_{Z_x} & \sum_{n_x}^1 F_{T_x} h_{X_x} h_{Z_y} & \sum_{n_z}^1 F_{T_z} h_{Z_z}^2 \end{bmatrix}$$

onde: $F_{X_i}^{T_i}$ é o empuxo do i -ésimo propulsor com empuxo na direção X ; $h_{X_i}^{Z_i}$ é a distância do propulsor $F_{X_i}^{T_i}$ em relação ao eixo X .

2.2 O Modelo Matemático para o Submersível VSNT-Jatú I

O movimento de avanço do submersível VSNT Jatú I é obtido através de dois propulsores instalados lado a lado na popa do aparelho, conforme pode ser observado pelas figuras 1 e 8 do capítulo anterior, e, alternando as suas intensidades relativas pode-se atuar na guinada do veículo.

A movimentação vertical é realizada utilizando-se um sistema de lastro móvel localizado em um compartimento anexo ao corpo básico do submersível (bolina) que é alagável e que internamente a este compartimento alagável existe um tanque flexível de ar que, quando inflado expulsa a água ali existente, aumentando o empuxo, levando a emergência, e no sentido contrário, quanto tal tanque flexível é levado ao esvaziamento, permite que o compartimento seja alagado, levando-o agora a imersão.

Neste trabalho será estudado o controle do veículo nos movimentos de avanço, deriva, guinada e caturro. Para estudar o controle serão desprezados os movimentos de jogo e de arfagem, mesmo porque o veículo VSNT Jatú I foi projetado para minimizar estes movimentos.

Observando esta especificação, ou seja, que não serão considerados os movimentos de jogo e arfagem ($p = \dot{p} = q = \dot{q} = 0$), a equação de movimento (2.1), pode ser simplificada como:

$$\begin{aligned} X &= m(\dot{u} - vr + x^D r^2) \\ Y &= m(\dot{v} + ur + x^D r) \\ Z &= m(\dot{w}) \\ N &= I_z \dot{r} + m[x^G(v + ru)] \end{aligned} \quad (2.11)$$

Ainda, esta hipótese permite simplificar a equação (2.7) para:

O movimento vertical, no caso do VSNT Jau I é feito por controle de lastro, variando a flutuabilidade do veículo. Como os movimentos de jogo e arfagem são

$$\begin{aligned}
 X &= m(\ddot{u} - v\dot{r} + x_G r^2) = X^A + F^{FX} + F^{RX} + F^{CX} + F^{TX} \\
 Y &= m(\ddot{v} + ur + x_G r) = Y^A + F^{FY} + F^{RY} + F^{CY} + F^{TY} \\
 Z &= m(\ddot{w}) = Z^A + F^{FZ} + F^{RZ} + F^{CZ} + F^{TZ} \\
 N &= I_z \dot{r} + m[x_G(v) + r\dot{u}] = N^A + F^{FN} + F^{RN} + F^{CN} + F^{TN}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Como descrito anteriormente, os esforços externos presentes na equação de movimento, devem-se aos fatores de massa adicional, amortecimento viscoso, forças de restauração, dos agentes ambientais e dos propulsores, de maneira que o modelo matemático específico para o submersível VSNT Jau I pode ser assim expresso:

$$\begin{aligned}
 X^A &= X^A \ddot{u} - Y^A v\dot{r} \\
 Y^A &= Y^A \dot{v} + X^A ur \\
 Z^A &= Z^A \ddot{w} \\
 N^A &= N^A \dot{r} - (X^A r^2 - Y^A r)\dot{u}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Admitindo-se também, a hipótese de que o veículo tem movimentos lentos, segundo Fossem (1994), os termos cruzados da matriz de massa adicional apresentada em (2.12) são desprezíveis, podendo ser assim expressa:

$$\begin{aligned}
 X^A &= X^A \ddot{u} + X^A w \\
 Y^A &= X^A \dot{u} + Y^A w \\
 &\quad - X^A ur - Y^A vr \\
 &\quad + X^A \dot{v} + Y^A \dot{r} + X^A vr + X^A r^2 \\
 &\quad - X^A (-wr) + X^A ur \\
 Z^A &= X^A \ddot{u} + Z^A w \\
 &\quad + Y^A \dot{v} + Z^A \dot{r} \\
 N^A &= X^A \dot{u} + Z^A w + X^A r^2 + Y^A w \\
 &\quad + Y^A \dot{v} + N^A \dot{r} - X^A v\dot{r}^2 - X^A vr \\
 &\quad - (X^A r^2 - Y^A r)\dot{u} - X^A wv + Y^A ur
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Nas equações (2.16) os termos de massa adicional e os coeficientes de amortecimento não podem ser obtidos facilmente, devido à complexidade geométrica do veículo. Desta forma, neste trabalho, estes parâmetros foram obtidos experimentalmente, conforme é apresentado na sequência.

$$\begin{aligned}
 \dot{u}(m - X_n) + m(x_G r^2 - vr) &= -Y_v v r + F_{FvX} + F_{FvY} \\
 \dot{v}(m - Y_v) + m(ur + x_G r) &= X_n u r + F_{FvY} + F_{FvX} \\
 \dot{w}(m - Z_w) + g(W - B) + F_{FvZ} &= F_{FvZ} + g(W - B) + F_{FvZ} \\
 \dot{r}(I_z - N_r) + mx_G(v + ru) &= -(X_n - Y_v)uv + F_{FvN} + F_{FvT}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Assim, com as considerações feitas, a equação dinâmica do submersível VSNT Jati I é dada por:

Conforme justificado no item 2.1.2., as forças ambientais serão desprezadas, sendo portanto $F_c = 0$.

$$\begin{bmatrix} F_{RN} \\ F_{RM} \\ F_{RK} \\ F_{RZ} \\ F_{RY} \\ F_{RX} \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} W - B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \tag{2.15}$$

expressa:

desprezados ($\theta = \phi = 0$, $x_G = x_B$ e $y_G = y_B = 0$), a equação (2.9) pode ser assim

3 OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

3.1 A Obtenção Experimental de Massa Adicional e Amortecimento Viscoso

A equação dinâmica do submersível VSNT Jau I é dada pela equação (2.16), onde as massas e momentos adicionais são parâmetros do modelo que usualmente são determinados experimentalmente em testes de tanque de provas.

A forma de obtenção de tais parâmetros para veículos submersíveis, não tem sido apresentada suficientemente na literatura. Deste modo, o presente capítulo trata a maneira de se obter essas grandezas de forma simples e economicamente viável, baseado no movimento oscilatório amortecido do modelo reduzido do submersível com flutuabilidade indiferente ($W=B$).

Os ensaios para a obtenção dos coeficientes de massa adicional e amortecimento viscoso, foram realizados no tanque de provas do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP. O modelo é uma réplica em escala 1:2,5 do VSNT Jau I, modelo que inclusive em outra oportunidade foi utilizado como corpo de provas em teste de resistência ao reboque, realizado no Tanque de Provas do Laboratório de Hidrodinâmica da Divisão de Tecnologia de Transportes - Agrupamentos de Engenharia Naval e Oceânica do IPT.

Os dados desejados foram adquiridos a partir de ensaios de oscilação livre do modelo, sendo que a restauração foi obtida através de um sistema de molas.

No caso dos movimentos lineares, o modelo foi fixado no tanque conforme representa a figura 11. Já para o movimento angular, o modelo foi fixado conforme a figura 12.

Em ambos os casos, o modelo foi deslocado da sua posição de equilíbrio e registrado o seu deslocamento pela utilização de uma célula de carga.

Para a determinação dos coeficientes desconhecidos do modelo matemático, cada um dos quatro graus de liberdade do submersível foi ensaiado separadamente, de maneira que para cada um, o corpo de provas recebeu uma maneira específica de fixação.

O corpo de provas, foi então colocado a movimentar-se, estirado lado a lado por um sistema de molas como mostram as figuras a seguir:

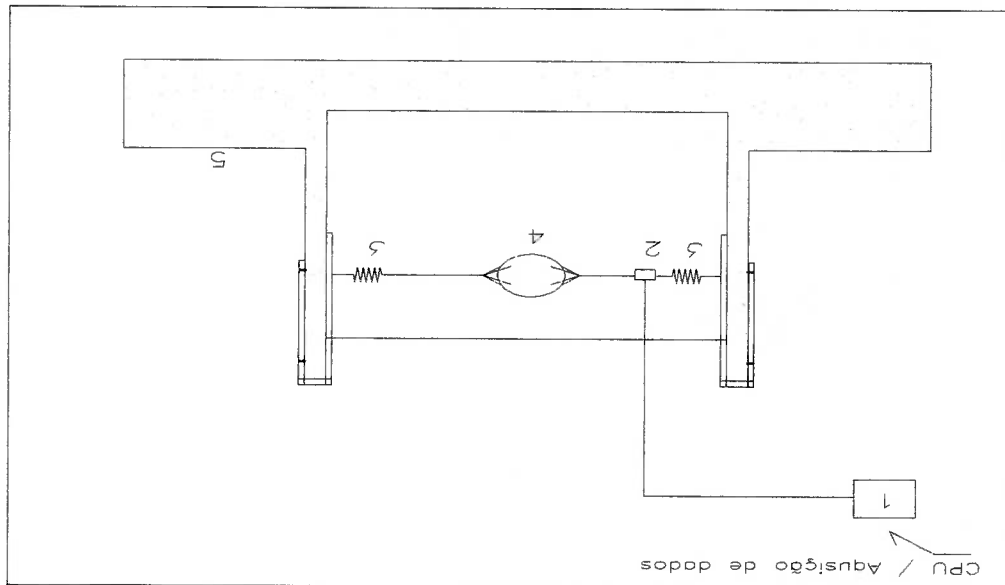


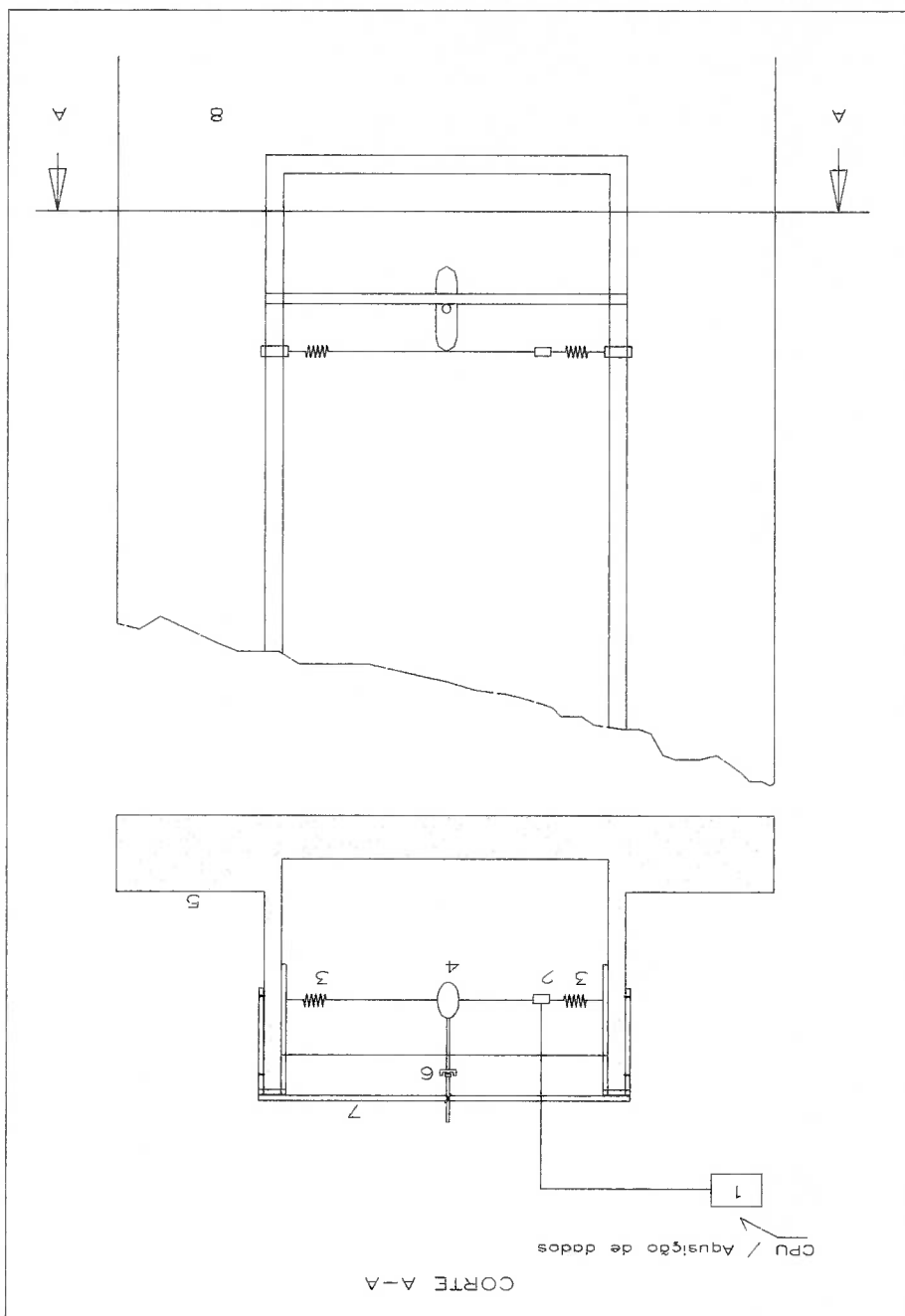
Fig. 11 - Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos lineares.
 (1) sistema eletrônico de aquisição de dados; (2) célula de cargas; (3) molas; (4) corpo em ensaio; (5) vista em corte do tanque de provas.

Com referência ao termo \vec{F}_T , que representa a força propulsora, neste estudo, será simulado através de um sistema de molas, de maneira que a força

tanque e experimento

(1),(2),(3),(4) e (5) identificados na figura 11; (6) haste com junta móvel; (7) viga metálica disposta transversalmente ao tanque; (8) vista superior ou em planta do movimentos de rotação em torno do eixo Z.

Fig. 12- Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os



propulsora passa a ser representada pela força elástica devido a mola, como pode ser observado nas figuras 11 e 12, de modo que $F_T = 2k\delta x$, onde k é a constante elástica da mola e $\delta x, \delta y, \delta z$ e $\delta\psi$ as deformações da mola nas direções respectivas

Considerando movimentos independentes nas direções ortogonais X, Y, Z e apenas liberdade de rotação no sentido do ângulo de rumo N , e que cada grau de liberdade será ensaiado separadamente, tem-se a partir da equação (2.16) para cada movimento as seguintes expressões:

a) Para o movimento de translação no sentido longitudinal, a equação será:

$$u[m - X_n] = -F_{Tx} - 2k\delta x \quad (3.1)$$

b) Para o movimento de translação no sentido transversal do modelo, a equação será:

$$v[m - Y_s] = -F_{Ty} - 2k\delta y \quad (3.2)$$

c) Para o movimento de translação no sentido vertical, a equação do modelo ficará:

$$w[m - Z_w] = -F_{Tz} - 2k\delta z \quad (3.3)$$

d) Para o movimento de rotação no sentido de rumo, a equação será:

$$r[L_z - N_r] = -F_{T\psi} - 2kL^2\delta\psi \quad (3.4)$$

onde L é o braço da força aplicada pela mola em relação ao eixo

Foram realizadas quatro situações de ensaio:

1. Deslocamento longitudinal do modelo;
2. Deslocamento transversal do modelo;

3. Deslocamento vertical do modelo e,
4. Deslocamento rotacional do modelo em ângulo de rumo.

O relatório completo destes ensaios encontra-se no Apêndice I.

Como também observado no item 2.1.1, o amortecimento viscoso F_p pode ser considerado sobre três formas: linear, quadrático e uma combinação das duas formas anteriores.

3.2 A Análise do Amortecimento como Aproximação Linear

Admitindo que o amortecimento seja linear, pode-se mostrar que as equações (3.1), (3.2) e (3.3) que representam movimentos de translação, podem ser expressas por uma equação diferencial de um sistema massa-mola-amortecedor, do tipo:

$$M^G \ddot{x} + c\dot{x} + 2kx = 0 \quad (3.5)$$

com $x(0) = x_0$ e $\dot{x}(0) = 0$

$$\text{onde: } M^G = m + M^{AD} \quad (3.6)$$

m representa a massa do modelo

M^{AD} a massa adicional relativa ao movimento considerado. Sendo o

movimento na direção X por exemplo, $M^{AD} = -X''$

A equação (3.5) pode ser re-escrita como:

$$\ddot{x} + \frac{M^G}{c} \dot{x} + \frac{2k}{M^G} x = 0 \quad (3.7)$$

adotando:

$$w_n = \sqrt{\frac{2k}{M^G}} \quad (3.8)$$

$\zeta = \frac{c}{c_c}$, o fator de amortecimento

(3.10) $c_c = 2w_n M_G$, o amortecimento crítico

tem-se que a equação (3.7) é expressa por:

$$(3.11) \quad \ddot{x} + 2\zeta w_n \dot{x} + w_n^2 x = 0$$

A solução da equação (3.11) é:

$$(3.12) \quad x(t) = \frac{x_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta w_n t} \operatorname{sen}(w_n t + \alpha)$$

onde: x_0 é a amplitude inicial do movimento de oscilação;

(3.13) $w_n = \sqrt{1-\zeta^2} w_n$, é a frequência natural amortecida

(3.14) $\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)$, é o ângulo de fase

Com isso, a equação (3.11) representa o modelo matemático de um sistema linear de 2ª. Ordem. Dessa forma, considerando que o amortecimento seja proporcional à velocidade, tanto os movimentos longitudinal e vertical como o transversal pode ser representado pela equação (3.11), consequentemente, a solução é dada pela equação (3.12).

Se considerarmos os instantes t_1 e t_2 , onde ocorreram dois picos consecutivos temos que:

$$(3.15) \quad x(t_1) = \frac{x_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta w_n t_1} \operatorname{sen}(w_n t_1 + \alpha)$$

enquanto que:

$$x(t_2) = x(t_1 + T) = \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n (t_1 + T)} \text{sen}[\omega_p (t_1 + T) + \alpha] \quad (3.16)$$

onde T é o período e está relacionado com a frequência natural amortecida, através

de:

$$\omega_p = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (3.17)$$

Utilizando a equação (3.15) e (3.16) pode-se mostrar que a razão entre os

picos é dada por:

$$\frac{x(t_2)}{x(t_1)} = e^{-\zeta \omega_n T} \quad (3.18)$$

Considerando-se as equações (3.17) e (3.18) tem-se:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (3.19)$$

Substituindo (3.19) em (3.18) obtêm-se a expressão para o cálculo do

amortecimento, dada por:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(\ln r_{12})^2}{4\pi^2}}} \quad (3.20)$$

onde:

$$r_{12} = \frac{x(t_2)}{x(t_1)} \quad (3.21)$$

Assim, com os valores das amplitudes de picos consecutivos determinamos, experimentalmente, os valores do fator de amortecimento ζ e do ângulo de fase α e, medindo o período entre os picos ($t_2 - t_1$), encontramos a frequência natural amortecida (w_d). Com o valor desta frequência e do amortecimento, é obtido finalmente a frequência natural (w_n) e re-arranjando a equação (3.8) temos que a Massa Generalizada é:

$$M_G = \frac{2k}{w_n^2}, \quad (3.22)$$

Com as equação (3.6) e (3.22) obtêm-se os valores de massa adicional (M_{AD}).

Para o caso do movimento de rotação, a equação (3.5) pode ser expressa pela seguinte equação diferencial:

$$I_G \ddot{\psi} + c\dot{\psi} + 2kL^2\psi = 0 \quad (3.23)$$

$$\text{com } \psi(0) = \psi_0 \quad \text{e} \quad \dot{\psi}(0) = 0$$

$$\text{onde: } I_G = I_z + I_{AD} \quad (3.24)$$

I_z é momento de inércia do modelo

I_{AD} é momento de inércia adicional ($-N_r$)

A análise é similar à efetuada para o caso de movimentos de translação vistos anteriormente, de forma que o Momento de Inércia Generalizado é dado por:

$$I_G = \frac{2kL^2}{w_n^2}, \quad (3.25)$$

E o momento de inércia adicional (I_{AD}) é obtido pela aplicação da equação

(3.24).

A seguir são mostradas algumas comparações de resultados experimentais com os obtidos teoricamente na análise com aproximação linear.

A figura 13 a seguir, mostra a sobreposição dos dados experimentais e resultados teóricos para o caso de uma força de amortecimento linear para a movimentação longitudinal do ensaio Solt6.

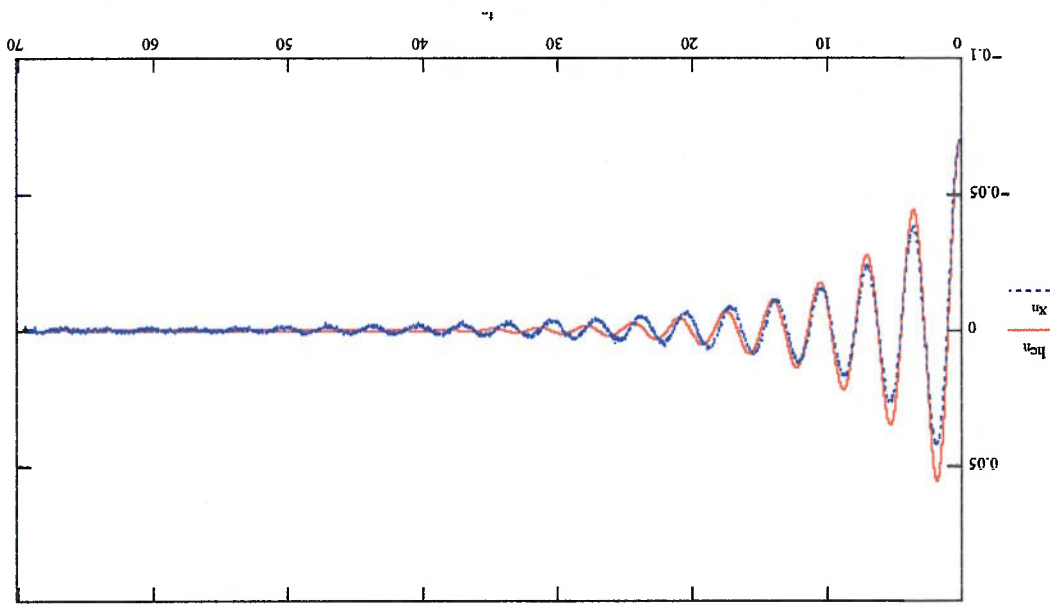


Fig. 13 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de amortecimento linear na movimentação longitudinal, para o ensaio Solt6.

onde a curva azul representa os dados experimentais e a curva vermelha representa o resultado numérico.

As figuras 14, 15 e 16 a seguir, apresentam as curvas sobrepostas referentes aos dados experimentais e numéricos para o amortecimento linear nos movimentos vertical e transversal e rotacional de rumo, ensaios Sov3, Solt2 e Solt7 respectivamente.

Fig. 15 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de amortecimento linear na movimentação transversal, para o ensaio Sott2.

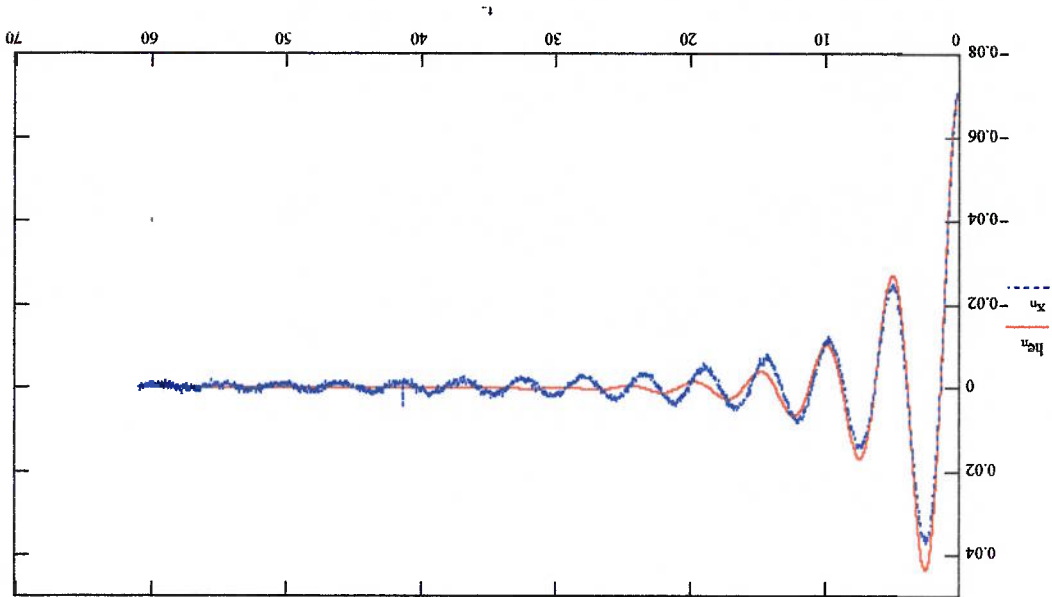
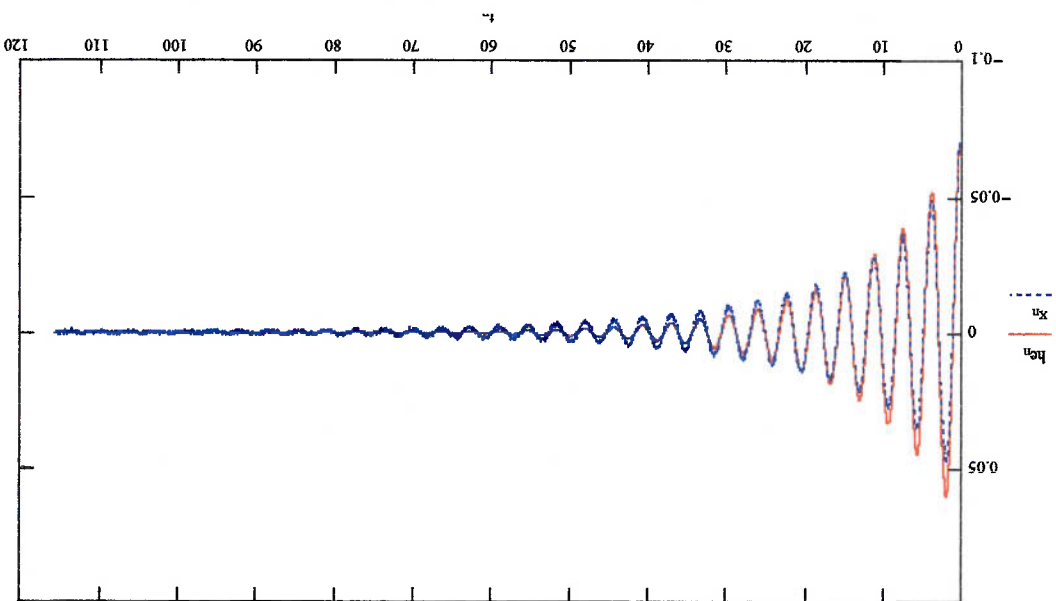


Fig. 14 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de amortecimento linear na movimentação vertical, para o ensaio Sov3.



$$M^G \ddot{x} + F(\dot{x}) + 2kx = 0 \quad (3.26)$$

Seja a equação:

onde as energias dissipadas em um ciclo são similares.

Dessa maneira, a equação pode ser re-escrita como uma equação "linear",

abordagem onde é admitido um pequeno amortecimento.

Para o caso do amortecimento não linear, Aranha (1999) propõe uma

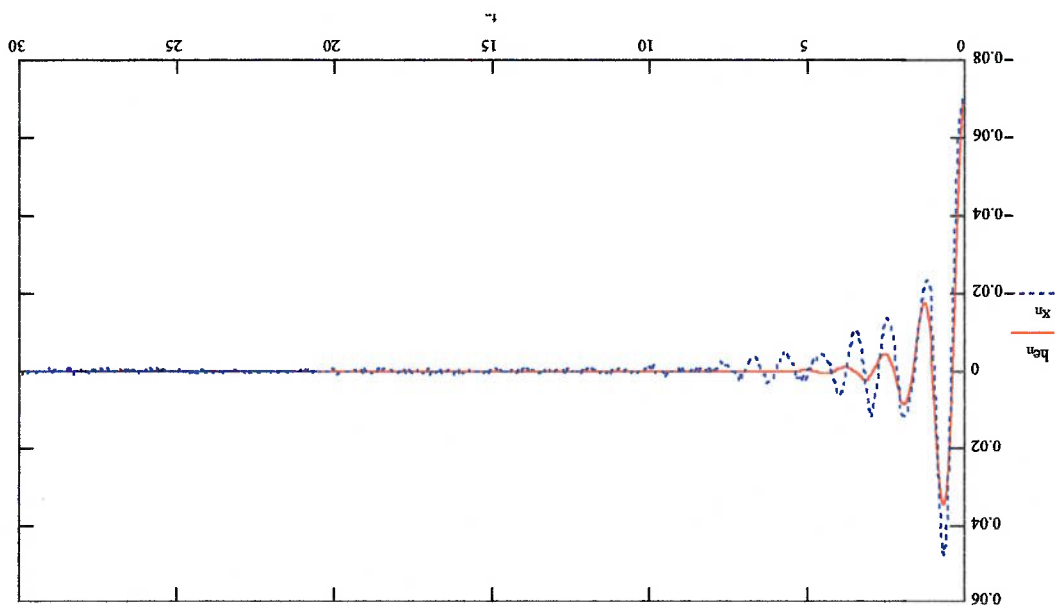
3.3 A Análise do Amortecimento como Aproximação Quadrática

encontrados no Apêndice III.

Dados completos desta análise usando a aproximação linear podem ser

rumo, para o ensaio Sort7.

Fig. 16 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de amortecimento linear na movimentação rotacional de



Definindo o coeficiente

$$\zeta(A) = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} F(x) \dot{x} dt = \frac{m w_n^3 A^3}{2\pi} \gg 1; \quad T_n = \frac{2\pi}{w_n} \quad (3.27)$$

temos que a equação "linear" se escreve

$$M_G \ddot{x} + 2\zeta(A) w_n \dot{x} + w_n^2 x = 0, \quad (3.28)$$

$$\text{onde } w_n = \sqrt{\frac{2k}{M_G}}.$$

Considerando a solução

$$x(t) = A(T) \cos(\omega_n t), \quad (3.29)$$

com $T = t\varepsilon$, onde $\varepsilon \equiv O(\zeta(A)) \ll 1$. Substituindo a equação (3.29) na equação (3.28) e desprezando termos da ordem de ε^2 , encontramos uma relação de decaimento para um amortecimento não linear:

$$\int_0^{A(t)} \frac{dA}{A} \zeta(A) A(T) = -\omega_n t. \quad (3.30)$$

Para o caso quadrático,

$$F(x) = d|x|\dot{x},$$

temos que:

$$\zeta(A) = \frac{4dA}{3\pi M_G}. \quad (3.31)$$

Substituindo este resultado na equação (3.30), temos

Com o conhecimento da relação d/M_G , com os valores de massa e momento de inércia do modelo conhecidos, e aplicando-se as equações (3.22) e (3.23) respectivamente, para cada ensaio teremos o valor da massa generalizada (M_G) e momento de inércia generalizada (I_G) onde por consequência encontramos os valores de amortecimento (d).

Tomando como princípio de que o valor de massa adicional (M_{AD}) é uma constante do modelo e, que seu valor varia apenas pelo tipo de movimentação, toma-se os valores obtidos no item 3.2 para valores de massa adicional.

Tabela 3 - Coeficientes do termo quadrático do amortecimento

| | F_0 [kgf] | F_1 [kgf] | d/M_G [m^{-1}] | d/M_G [m^{-1}] |
|--------|-------------|-------------|----------------------|----------------------|
| Solt4q | 0,237 | 0,124 | 4,78 | 4,71±0,17 |
| Solt5q | 0,216 | 0,113 | 4,87 | |
| Solt6q | 0,215 | 0,118 | 4,47 | |
| Sov1q | 0,169 | 0,107 | 3,09 | 2,66±0,31 |
| Sov2q | 0,180 | 0,122 | 2,52 | |
| Sov3q | 0,189 | 0,131 | 2,39 | |
| Solt1q | 0,202 | 0,069 | 10,40 | 10,14±0,22 |
| Solt2q | 0,202 | 0,071 | 9,86 | |
| Solt3q | 0,208 | 0,072 | 10,15 | |
| Sor6q | 0,234 | 0,077 | 10,95 | 11,21±0,37 |
| Sor7q | 0,235 | 0,077 | 10,95 | |
| Sor8q | 0,233 | 0,073 | 11,74 | |

A tabela a seguir, apresenta os coeficientes do termo quadrático do amortecimento, bem como os dados médios e respectivos desvios-padrão para cada grupo de ensaios.

onde A_1 é a amplitude da onda, tomada pelo lado negativo

$$\frac{d}{M_G} = \frac{3}{8n} \left[\frac{1}{1} A_n - \frac{1}{1} A_o \right] \quad (3.32)$$

A tabela 4, a seguir, apresenta os valores analíticos médios do amortecimento como aproximação quadrática, para cada ensaio.

| M_{AD} | m | M_G | d/M_G | d/M_G | d | \underline{d} |
|----------|--------|--------|------------|------------|----------|-----------------|
| [kg] | [kg] | [kg] | $[m^{-1}]$ | $[m^{-1}]$ | $[kg/m]$ | $[kg/m]$ |
| Solt4g | 8,7 | 19,20 | 4,78 | 4,71±0,17 | 91,77 | 82,73±9,53 |
| Solt5g | 7,3 | 17,84 | 4,87 | 4,71±0,17 | 86,88 | 82,73±9,53 |
| Solt6g | 8,1 | 18,56 | 4,47 | 4,71±0,17 | 69,55 | 82,73±9,53 |
| Sov1g | 5,9 | 16,45 | 3,09 | 2,66±0,31 | 50,83 | 46,02±3,40 |
| Sov2g | 6,8 | 17,35 | 2,52 | 2,66±0,31 | 43,72 | 46,02±3,40 |
| Sov3g | 7,7 | 18,21 | 2,39 | 2,66±0,31 | 43,52 | 46,02±3,40 |
| Solt1g | 22,6 | 33,15 | 10,40 | 10,14±0,22 | 344,76 | 338,99±7,89 |
| Solt2g | 22,7 | 33,25 | 9,86 | 10,14±0,22 | 327,84 | 338,99±7,89 |
| Solt3g | 23,4 | 33,93 | 10,15 | 10,14±0,22 | 344,39 | 338,99±7,89 |
| I_{AD} | I | I_G | d/I_G | d/I_G | d | \underline{d} |
| Sor6g | 0,060* | 0,169* | 10,95 | 11,21±0,37 | 1,85 | 1,90±0,04 |
| Sor7g | 0,065* | 0,174* | 10,95 | 11,21±0,37 | 1,90 | 1,90±0,04 |
| Sor8g | 0,057* | 0,166* | 11,74 | 11,21±0,37 | 1,95 | 1,90±0,04 |

Tabela 4 - Valores médios dos dados da análise do amortecimento como aproximação quadrática.

A seguir são mostradas algumas comparações de resultados experimentais com resultados numéricos obtidos com os valores da tabela 4.

A figura 17 a seguir, mostra a sobreposição dos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de uma força de amortecimento puramente quadrática na movimentação longitudinal do ensaio Solt6.

As figuras 18, 19 e 20 a seguir, apresentam as curvas sobrepostas referentes aos dados experimentais e soluções numéricas baseadas em resultados analíticos para o amortecimento quadrático nos movimentos vertical e transversal e rotacional de rumo, ensaios Sov3, Sott2 e Sott7 respectivamente.

onde a curva azul representa os dados experimentais e a curva vermelha representa o resultado analítico.

na movimentação longitudinal, para o ensaio Sott6. numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático

Fig. 17 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução

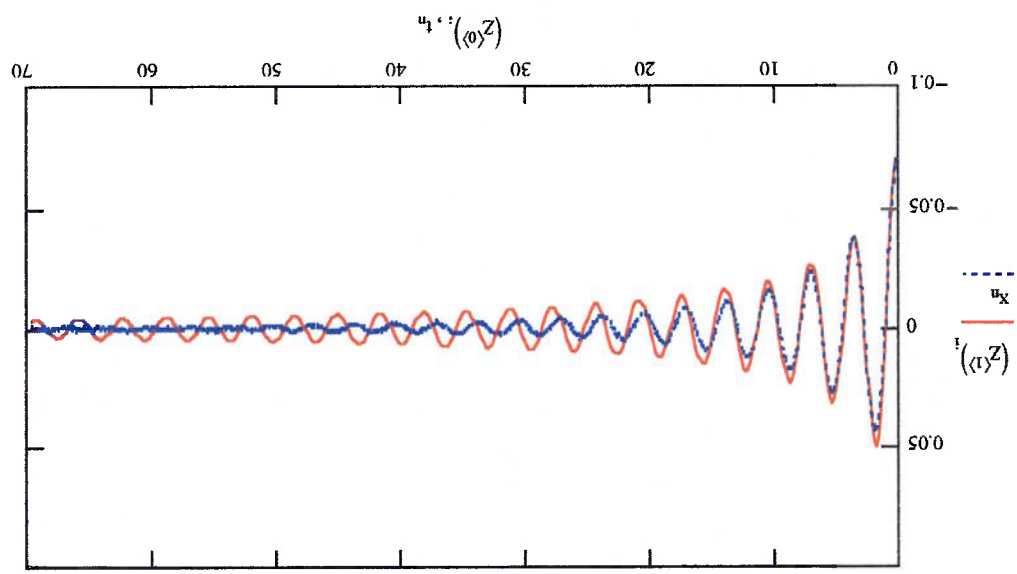


Fig. 19 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático na movimentação transversal, para o ensaio Sott2.

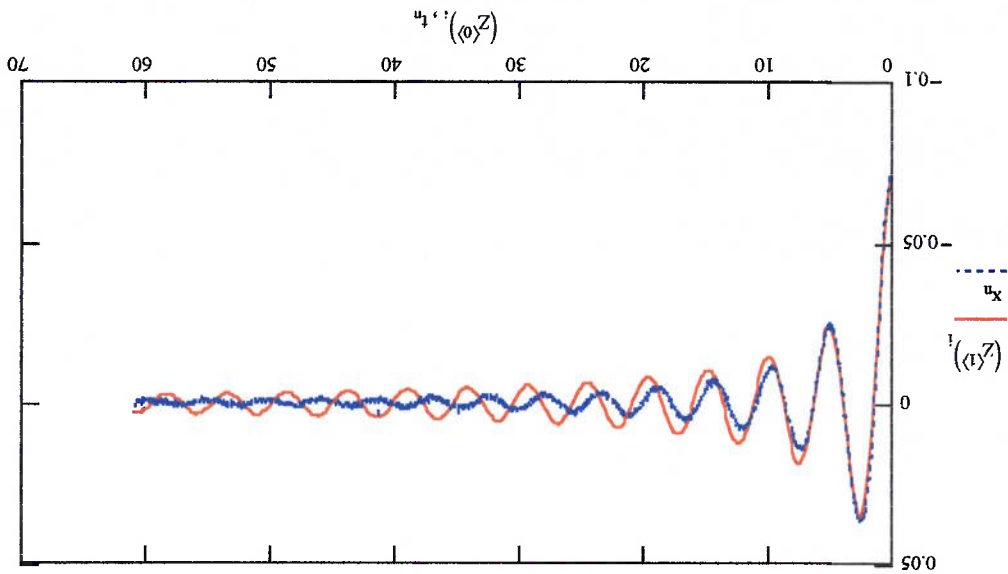
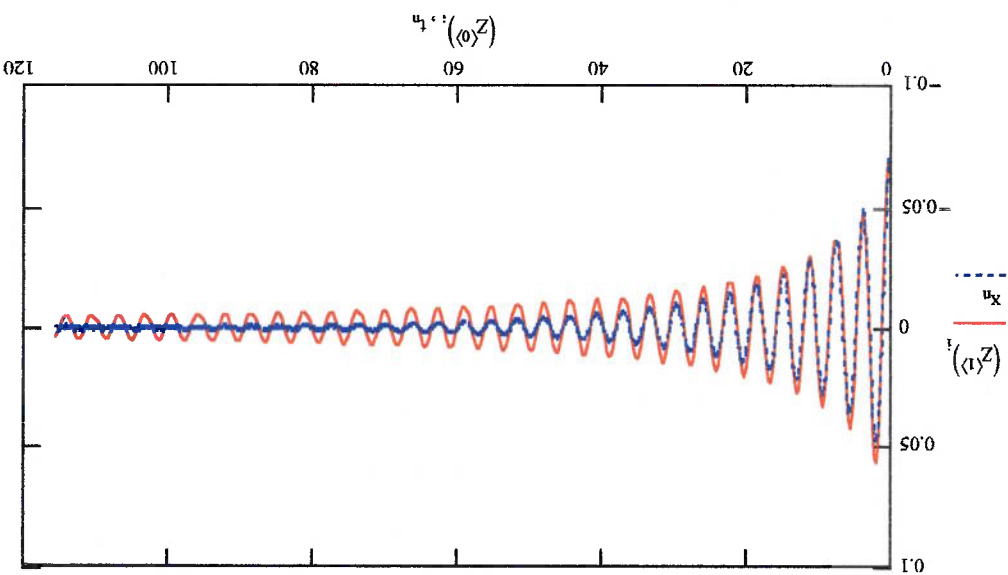


Fig. 18 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático na movimentação vertical, para o ensaio Sov3.

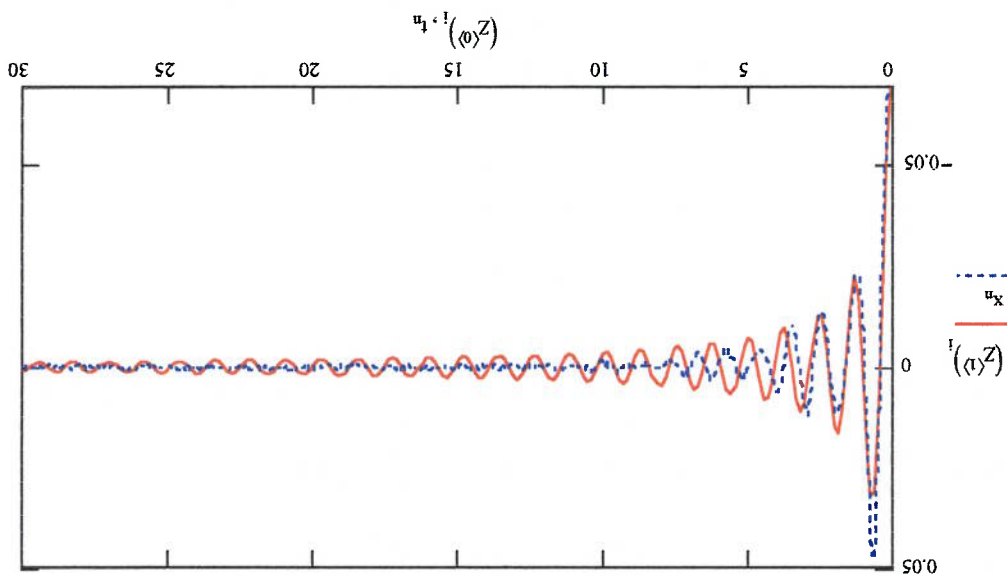


Pelo que se pode observar das formas anteriores de análise, puramente linear e, puramente quadrática é que ambas reproduzem de forma aproximada o comportamento real do amortecimento, todavia com certo grau de imprecisão. Uma outra maneira de abordar a relação do amortecimento viscoso é pela combinação das formas linear e quadrática, analisadas individualmente nos itens anteriores.

3.4 A Análise do Amortecimento com a combinação das formas de aproximação Linear com Quadrática.

Dados completos desta análise usando a aproximação quadrática podem ser encontrados no Apêndice IV.

Fig. 20 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e solução numérica baseada em resultados analíticos para o caso de amortecimento quadrático na movimentação rotacional de rumo, para o ensaio SORT7.



Nesta forma de abordagem combinatória, considera-se inicialmente que os valores estão obtidos, sejam tomados como parâmetros para esta nova análise.

Os valores de amortecimento puramente linear e puramente quadrático para cada ensaio de movimento, apresentados anteriormente nas tabelas 2 e 4, estão agrupados na tabela a seguir:

| MOVIMENTOS | c [kg/s] | c/M_g [s ⁻¹] | d [kg/m] | d/M_g [m ⁻¹] | Quadrático | |
|--------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|------------|
| | | | | | Linear | Quadrático |
| Longitudinal | Solt4 | 5,34 | 0,28 | 91,77 | 4,78 | |
| | Solt5 | 4,84 | 0,27 | 86,88 | 4,87 | |
| | Solt6 | 4,96 | 0,27 | 69,55 | 4,47 | |
| Vertical | Sov1 | 2,54 | 0,15 | 50,83 | 3,09 | |
| | Sov2 | 2,91 | 0,17 | 43,72 | 2,52 | |
| | Sov3 | 2,93 | 0,16 | 43,52 | 2,39 | |
| Transversal | Solt1 | 13,28 | 0,40 | 344,76 | 10,40 | |
| | Solt2 | 12,95 | 0,39 | 327,84 | 9,86 | |
| | Solt3 | 13,09 | 0,39 | 344,39 | 10,15 | |
| Rotacional | Sor6 | 0,32 | 1,89 | 1,85 | 10,95 | |
| | Sor7 | 0,38 | 2,21 | 1,90 | 10,95 | |
| | Sor8 | 0,37 | 2,21 | 1,95 | 11,74 | |

Tabela 5 – Valores dos amortecimentos puramente linear e quadrático para cada movimento ensaiado

Na sequência, são apresentados os valores médios dos dados apresentados

anteriormente,

| Movimento | c [kg/s] | c/M_g [s ⁻¹] | d [kg/m] | d/M_g [m ⁻¹] | Quadrático | |
|---------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|------------|
| | | | | | Linear | Quadrático |
| Longitudinal (Solt) | 5,05±0,21 | 0,27±0,01 | 82,73±9,53 | 4,71 ± 0,17 | | |
| Vertical (Sov) | 2,79±0,18 | 0,16±0,01 | 46,02±3,40 | 2,66 ± 0,31 | | |
| Transversal (Solt) | 13,11±0,13 | 0,39±0,01 | 338,99±7,89 | 10,14 ± 0,22 | | |
| Rotacional (Sorr) | 0,36±0,02 | 2,10±0,15 | 1,90±0,04 | 11,21 ± 0,37 | | |

Tabela 6 – Valores médios dos amortecimentos puramente lineares e quadráticos de cada movimento.

cada movimento.

Na continuidade são apresentadas algumas comparações de resultados experimentais com os obtidos numericamente desta abordagem combinatória, cuja análise completa pode ser observada no Apêndice V.

A figura 21 a seguir, mostra a sobreposição das curvas referentes aos resultados numéricos, para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação longitudinal, para o ensaio Solt6.

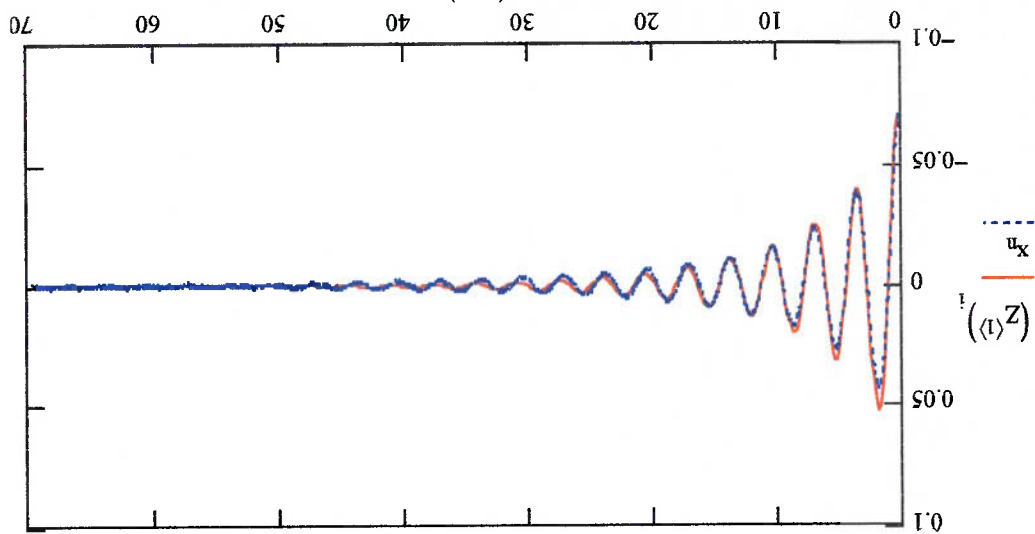


Fig. 21 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação longitudinal, para o ensaio Solt6.

I onde a curva vermelha representa a solução numérica e a curva azul representa os dados experimentais do movimento do modelo reduzido do submersível VSNT-JATU

A solução numérica conforme apresentado na tabela seguinte foi obtida usando os seguintes valores: $c/M_G = 0,21$, $d/M_G = 1,40$, de maneira que os fatores de amortecimento alcançados respectivamente são: $c_{11} = 3,90$ e $d_{11} = 25,98$.

A figura a seguir, mostra a sobreposição da onda gerada na prática laboratorial com a onda gerada numericamente, para a movimentação transversal ensaio Sott2:

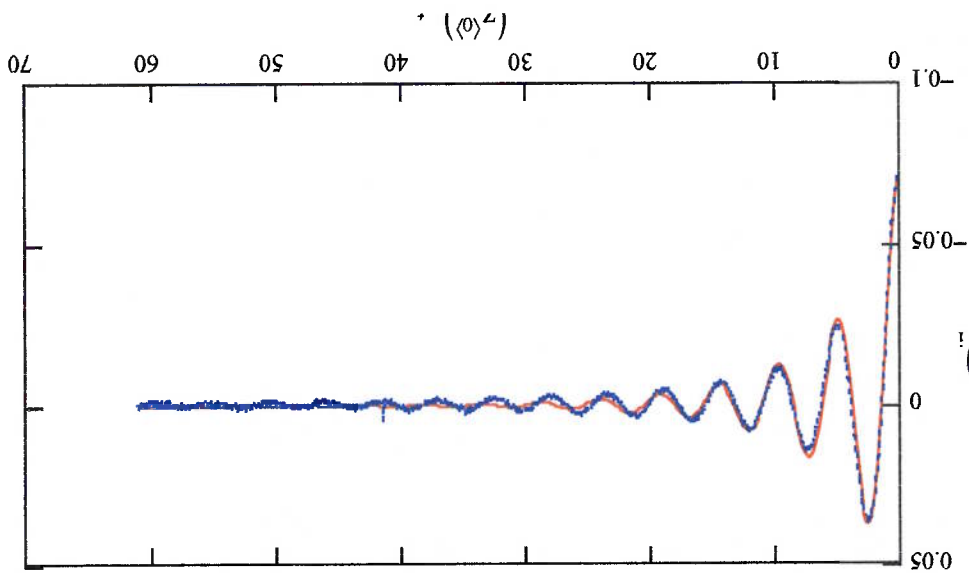


Fig. 22 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação transversal, para o ensaio Sott2.

Para o movimento no sentido vertical (Sov3), temos a seguinte figura:

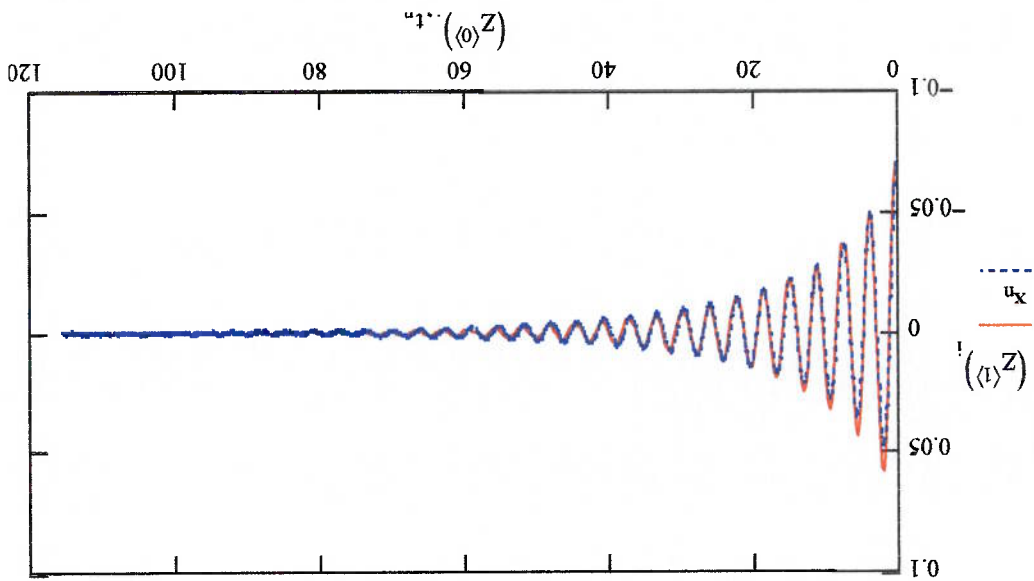
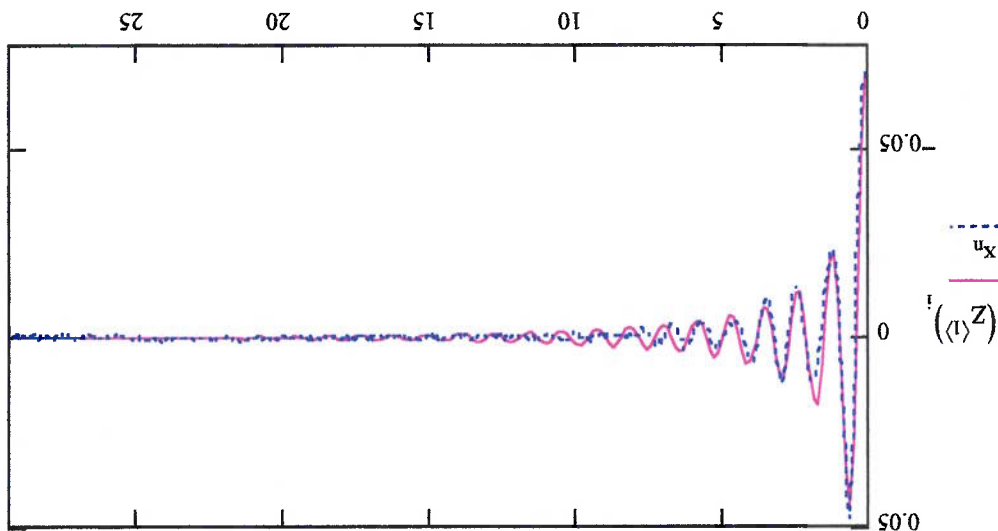


Fig. 23 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação vertical, para o ensaio Sov3.



Para o movimento rotacional (Sorr7), temos a seguinte figura

Fig. 24 Sobreposição das curvas referentes aos dados experimentais e resultados numéricos para o caso de um amortecimento combinatório linear e quadrático na movimentação rotacional de rumo, para o ensaio Sorr7.

Como resultados gerais, pode-se concluir que a combinação das formas linear e quadrática melhora sobremaneira a relação de equivalência entre os resultados numéricos com os laboratoriais, devendo ser portanto a forma que será utilizada para estudos complementares.

A tabela a seguir apresenta os valores para cada tipo de movimento, ensaiados na combinação linear e quadrática, obtidos numericamente onde observa-se que nesta análise conjunta, os parâmetros numéricos ora ajustados são inferiores aos obtidos nas análises individuais puramente linear e puramente quadrática.

numericamente utilizando o software MATHCAD. A determinação dos parâmetros obtidos neste capítulo, foi realizada vista em (2.16), como ressaltado por Maki (1986) e Rossolini (2000).

Estas incertezas acabam interferindo na solução da equação hidrodinâmica Ressalta-se por outro lado, que os valores para os parâmetros não são únicos, podendo ter outros conjuntos que também satisfaçam numericamente o resultado experimental. Verifica-se ainda, que não existe uma prescrição para o ajuste dos parâmetros da teoria, exceto o fato de que os valores obtidos das análises puramente linear e quadrática, devem ser tomados como limites máximos para tal ajuste.

Tabela 7 – Resultados principais da análise conjunta dos amortecimentos lineares com quadráticos de cada movimento.

| Amortecimentos | | | | ensaios |
|---------------------------|------------|---------------------------|------------|---------|
| c/Mg [s ⁻¹] | c [kg/s] | d/Mg [m ⁻¹] | d [kg/m] | |
| Solt4 | 0,22 | 4,22 | 1,40 | 26,88 |
| Solt5 | 0,22 | 3,92 | 1,50 | 26,76 |
| Solt6 | 0,21 | 3,90 | 1,40 | 25,98 |
| Sov1 | 0,12 | 1,97 | 1,19 | 19,58 |
| Sov2 | 0,12 | 2,08 | 0,95 | 16,48 |
| Sov3 | 0,11 | 2,00 | 0,83 | 15,11 |
| Solt1 | 0,24 | 7,96 | 3,50 | 116,02 |
| Solt2 | 0,32 | 10,64 | 3,40 | 113,05 |
| Solt3 | 0,15 | 5,09 | 6,50 | 220,54 |
| | c/I_G | c | d/I_G | d |
| Solt6 | 0,75 | 0,127 | 7,90 | 1,335 |
| Solt7 | 0,75 | 0,131 | 3,20 | 0,557 |
| Solt8 | 0,75 | 0,125 | 4,00 | 0,664 |

A tabela seguinte, reapresenta os valores médios de massa adicional para cada movimento anteriormente apresentados na tabela 2 e, apresenta também os valores médios dos coeficientes de amortecimento da combinação linear com quadrático, obtidos a partir da tabela 7.

| | \bar{M}_{AD} [kg] | \bar{c} [kg / s] | \bar{d} [kg / m] |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Longitudinal | 8,03±0,57 | 4,01±0,15 | 26,54±0,40 |
| Transversal | 22,90±0,35 | 7,90±2,27 | 149,87±49,99 |
| Vertical | 6,80±0,73 | 2,02±0,05 | 17,06±1,87 |
| Rotacional | 0,061±0,003* | 0,128±0,002 | 0,852±0,344 |
| | \bar{I}_{AD} | | |

Tabela 8 – Valores médios de massa adicional e amortecimentos lineares

e quadráticos de cada movimento

Os experimentos e estudos desenvolvidos até então, foram realizados com base num modelo em escala reduzida do submersível VSNT - Jati I.

Para os próximos passos, como o caso do estudo do controle, necessita-se das informações referentes ao modelo em escala real. Para tanto a tabela 9 a seguir apresenta os dados principais tanto do modelo em escala reduzida, como do submersível em escala real.

O estudo referente ao fator de escala é apresentado no Apêndice VI.

Tabela 9 – Dados principais do submersível VSNT Jau I

| DADOS | | | | Modelo | Fator | Modelo | Uni | Dade |
|-------|--------------------------------------|--|--|-------------|------------------|-----------|----------------------|------|
| | | | | em Escala | de | em Escala | | |
| | | | | Reduzida | Escala | Real | | |
| | | | | 1:2,5 | N=2,5 | 1:1 | | |
| 1 | DIMENSÕES PRINCIPAIS | | | 0,526 | N | 1,315 | m | |
| | Comprimento | | | 0,162 | N | 0,406 | m | |
| | Largura | | | 0,534 | N | 1,335 | m | |
| 2 | MASSA TOTAL E MOMENTO DE INÉRCIA | | | 10,505 | N ³ | 164,14 | kg | |
| | Massa total | | | 0,109 | N ⁵ | 10,64 | kg.m ² | |
| 3 | MASSAS ADICIONAIS | | | 8,03 | N ³ | 125,47 | kg | |
| | Sentido longitudinal | | | m11 | | | | |
| | Sentido transversal | | | m22 | | | | |
| | Sentido vertical | | | m33 | | | | |
| | Sentido rotacional (rumo) | | | m66 | | | | |
| 4 | AMORTECIMENTOS VISCOZOS | | | 4,01 | N ^{2,5} | 39,63 | kg/s | |
| | Sentido longitudinal (lineares) | | | 7,90 | N ^{2,5} | 78,07 | kg/s | |
| | Sentido transversal | | | 2,02 | N ^{2,5} | 19,96 | kg/s | |
| | Sentido vertical | | | 0,128 | N ^{4,5} | 7,906 | kg.m ² /s | |
| | Sentido rotacional (rumo) | | | d | | | | |
| | Sentido longitudinal (quadráticos) | | | 26,54 | N ² | 165,87 | kg/m | |
| | Sentido longitudinal | | | X | | | | |
| | Sentido transversal | | | Y | | | | |
| | Sentido vertical | | | Z | | | | |
| | Sentido rotacional (rumo) | | | R | | | | |
| 5 | PROPULSÃO | | | | | | | |
| | Número de Hélices | | | 2 | | | | |
| | Configuração | | | longitudina | | | | |
| | Distância entre propulsores | | | 0,265 | | | | |
| | Série | | | B-Trust | | | | |
| | Número de Pás | | | 4 | | | | |
| | Diâmetro dos hélices | | | 0,236 | | | | |
| | Relação P/D | | | 1,30 | | | | |
| | Relação Ae/Ao | | | 0,70 | | | | |
| | Relação máxima em vazio | | | 1020 | | | | |
| | Velocidade máxima de projeto (vante) | | | 0,30 | | | | |
| | Velocidade máxima de projeto (ré) | | | 0,19 | | | | |
| | Tração Estática total | | | 25 | | | | |

3.5 Comentários sobre os Resultados

Com o intuito de verificar a consistência dos coeficientes de amortecimento obtidos e apresentados neste capítulo é efetuado a seguir uma comparação com os dados do propulsor apresentados na Tab. 9, em especial referente a tração estática.

A referida tabela, apresenta que a velocidade máxima atingida foi de 0,30 m/s. Os coeficientes de amortecimentos apresentados na mesma tabela (item 4) são: de 39,63 e 165,87 respectivamente para amortecimento linear e amortecimento quadrático, portanto o empuxo requerido nesta velocidade pode ser dado por:

$$F_{TA} = cu + du^2$$
$$F_{TA} = 26,8N$$

A tabela 9, item 5 indica que a tração estática é de 25N. Portanto esses dados revelam que como as forças envolvidas são da mesma ordem de grandeza, revelando que o procedimento adotado foi pertinente.

De acordo com Pascoal e Encarnação (2001), nos últimos anos tem havido considerável interesse no desenvolvimento de projetos de sistemas avançados para controle de movimentos de veículos autônomos. O referido autor cita ainda que o problema de controle de movimentos mencionados na literatura pode ser genericamente classificado dentro de três grupos:

- Estabilização Pontual, onde o objetivo é estabilizar o veículo num determinado ponto alvo com uma orientação desejada,
- Traqueamento da Trajetória, onde se requer que o veículo trilhe uma referência parametrizada no tempo e,
- Acompanhamento de Rota, onde se requer que o veículo convirja e siga um caminho desejado, sem qualquer especificação temporal.

O sistema de controle de um submersível, como descrito por Domingues (1989), deve permitir a operação do veículo, nas mais variadas condições, desde o controle manual passando pelo controle de trajetória automático até, se for o caso, o controle de atitude. É de se ressaltar que o tipo de missão a que se destina o submersível é quem define o nível de sofisticação do controle a ser desenvolvido.

Dentre as diversas possibilidades de missões de um veículo submersível para operação no ambiente fluvial, como no caso do VSNT Jati I, destaca-se a história de estruturas de barragens de rios, onde o submersível é colocado para rastrear determinada região da parede da barragem, coletando imagens e referenciando-as num sistema de coordenadas fixas, de maneira possibilitar em outra oportunidade, continuidade ou aprofundamento da análise.

Neste tipo de missão, no início é requerida uma operação manual, para posicionar o veículo no ponto de partida do rastreamento junto à parede da barragem, na sequência transfere-se o comando para o sistema de controle autônomo que, leva o veículo a perseguir uma trajetória definida no domínio do tempo.

Para executar este tipo de missão é necessário informar o controlador sobre a posição do veículo. Uma alternativa é a utilização de ondas acústicas. Uma outra possibilidade é através do sistema de visão que está sendo desenvolvido por Buscariollo (2002), cujo estudo é parte integrante da segunda versão do VSNT.

Neste trabalho, por ser uma investigação preliminar, o controle do VSNT será estudado utilizando-se a teoria clássica com a lei do tipo Proporcional+Integral+Derivativo (PID) ou suas variantes (P, PI ou PD) que se destacam pela simplicidade de implementação e robustez. Caso haja verificação de problemas após a implementação, deverão ser estudadas outras formas de controle tais como controle deslizante, adaptativo, nebuloso ou redes neurais conforme sugerem Fossen (1994) e Farbrother e Stacey (1993).

É de se ressaltar que o sistema de controle é multivariável, mas sub-atuado na medida em só há atuadores nas direções de avanço, caturo e guinada sendo impossível atuar diretamente na direção de deriva do veículo.

A rigor deve-se projetar um sistema de controle multivariável de controle para o VNST pois, conforme mostram as equações (2.16) há acoplamento entre os movimentos. No entanto, neste trabalho, por simplicidade será admitido, que os movimentos são desacoplados e os controladores serão projetados independentemente. Esta abordagem é relativamente comum na área de engenharia naval e oceânica (Hsu 1991).

4.1 O Controle do VSNT - Jau I

Conforme descrito no Capítulo I, o submersível VSNT Jau I possui dois propulsores localizados lado a lado e, a ré. O controle do rumo pode ser efetuado atuando sobre a rotação destes propulsores.

Ainda segundo esta mesma descrição, para o controle de movimentos verticais o referido submersível utilizou um sistema de ajuste de lastro móvel.

Tal sistema é composto por um tanque de água de lastro e internamente a flexível de ar, permite-se a entrada de água no tanque de lastro, promovendo a imersão.

O sistema de controle de rumo pela variação de rotação dos propulsores à ré, pode ser considerado satisfatório. Entretanto o sistema de controle de movimentação vertical, utilizando sistema de lastro variável foi por Amorim et al (1997) considerado muito instável, fato que levará a primeira adaptação no referido submersível, instalando-se propulsores para o controle vertical. Desta forma o sistema de propulsão final será composto, então, por dois propulsores a ré e propulsores para o movimento vertical, conforme apresentado como boa configuração por Farbrother e Stacey (1993).

De acordo com Ogata (1998), o primeiro passo para o projeto de um sistema de controle é a obtenção do modelo matemático do sistema. Para tanto, toma-se por base a equação desenvolvida no Capítulo 2, que descreve o modelo matemático para o submersível VSNT - Jau I, aqui reapresentada sob nova numeração.

$$(4.1) \quad \begin{aligned} \dot{u}(m - X^n) + m(x_G r^2 - vr) &= -Y^v vr + F^{rx} + F^{Tx} \\ \dot{v}(m - Y^v) + m(ur + x_G r) &= X^n ur + F^{ry} + F^{Ty} \\ \dot{w}(m - Z^n) + g &= F^{rz} + g(W - B) + F^{Tz} \\ \dot{r}(I^z - N^r) + mx_G v &= -r(u - X^n) - Y^v v + F^{rn} + F^{Tn} \end{aligned}$$

Para calcular as velocidades em relação ao referencial fixo, pode-se utilizar as equações (2.2) e (2.3) com $\phi = \theta = p = q = 0$ da seguinte forma:

$$(4.2) \quad \begin{aligned} \dot{x} &= n \cos \psi - v \operatorname{sen} \psi \\ \dot{y} &= n \operatorname{sen} \psi + v \cos \psi \\ \dot{z} &= w \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned}$$

onde: $x(s)$ é a transformada de Laplace de x
 $F_{Tx}(s)$ é a transformada de Laplace de F_{Tx}

$$(4.7) \quad \frac{x(s)}{F_{Tx}(s)} = \frac{[(m - X_n)s^2 + cxs]}{1}$$

propulsora é dada por:

A função de transferência entre o deslocamento na direção X e a força

$$(4.6) \quad [(m - X_n)s^2 + cs]x(s) = F_{Tx}(s)$$

Aplicando-se a Transformada de Laplace, chega-se a:

$$(4.5) \quad \ddot{x}(m - X_n) + c\dot{x} = F_{Tx}$$

Considerando somente o termo linear de amortecimento, teremos:

$$(4.4) \quad \ddot{x}(m - X_n) + c\dot{x} = F_{Tx}$$

Então:

$$\dot{x} = u \quad \text{e} \quad \ddot{x} = \dot{u}$$

Neste caso pode-se escrever que:

$$(4.3) \quad \dot{u}(m - X_n) = -cu - du|\dot{u}| + F_{Tx}$$

Considerando unicamente a direção de avanço, temos:

Analogamente, para os movimentos transversal, vertical e de rumo teremos:

$$(4.8) \quad \frac{Y(s)}{F_Y(s)} = \frac{([m - K_y]s^2 + c_y s)}{1}$$

onde: $Y(s)$ é a transformada de Laplace de y
 $F_Y(s)$ é a transformada de Laplace de F_Y

$$(4.9) \quad \frac{Z(s)}{F_Z(s)} = \frac{([m - Z^w]s^2 + c_z s)}{1}$$

onde: $Z(s)$ é a transformada de Laplace de z
 $F_Z(s)$ é a transformada de Laplace de F_Z

e,

$$(4.10) \quad \frac{\psi(s)}{F_{\psi}(s)} = \frac{([m - N^p]s^2 + c_\psi s)}{1}$$

onde: $\psi(s)$ é a transformada de Laplace de ψ
 $F_{\psi}(s)$ é a transformada de Laplace de F_{ψ}

Sabe-se que, há um certo atraso entre o sinal de controle e a atuação real dos propulsores (Yoerger 1990). Para levar esse efeito em consideração introduziu-se entre o controlador e o atuador um atraso de primeira ordem, dado por:

$$(4.11) \quad \frac{F_{LX}(s)}{F_{LX}(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

onde $F_{LX}(s)$ é a saída do controlador.

Conforme pode ser observado pelas equações (4.7), (4.8) e (4.10), a função

excessivamente outros modos de oscilação do veículo.
 O controlador deve, também ser ajustado de modo a não excitar propulsores.

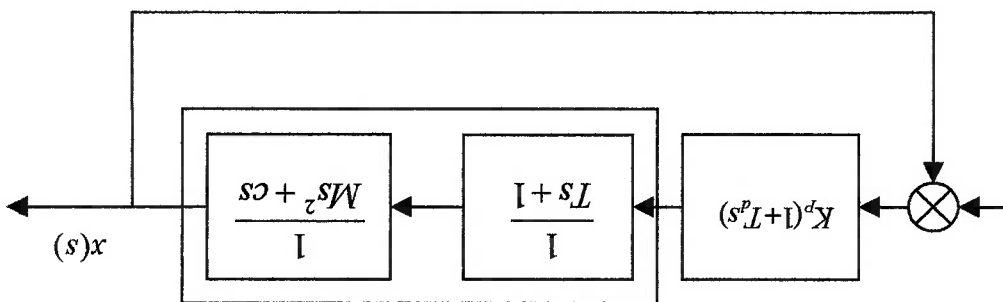
assentamento possível, levando em consideração a limitação de rotação dos para outra deve realizar-se com o mínimo sobrepasso e menor tempo de dada e mantê-lo, dentro de uma pequena tolerância. A passagem de uma orientação O controlador a ser projetado deve orientar o veículo segundo uma trajetória

4.1.1.1 O Controle no plano horizontal

Neste trabalho serão controlados os movimentos no plano horizontal, isto é, avanço, deriva e guinada ou rumo e o movimento no plano vertical, isto é, caturro.

4.1.1 O Controle de Trajetória

Fig. 25 – Estrutura de controle para uma única direção



considerando a função de transferência do sistema e o atraso do propulsor.
 segundo. A figura 25 abaixo, mostra a estrutura de controle numa única direção, Já! Admitiu-se portanto que esta constante de tempo seja da ordem de 0,5 experimento determinando o valor deste atraso para o sistema propulsor do VSNT Embora este efeito esteja de fato presente, no entanto não foi efetuado um

de transferência do veículo para uma dada direção, é de um sistema de ordem 1, isto é, apresenta um pólo na origem do plano S. Para aplicar o controle clássico neste tipo de sistema há que se observar que:

- a) Um controlador Proporcional pode não ser adequado pois a liberdade de alocação dos pólos em malha fechada é restrita.
- b) Um controlador PI também não é adequado pois, introduz mais um pólo na origem o que pode tornar o sistema instável.
- c) Um controlador PD é adequado, pois insere um amortecimento no sistema, favorecendo sua estabilidade e, portanto será o primeiro a ser desenvolvido.
- d) Um controlador PID também é possível, entretanto há que se ter cuidado, pois também introduz mais um pólo na origem o que pode tornar o sistema instável.

4.1.1.2 O Controle no plano vertical

O controlador para o plano vertical deve ser projetado para levar e manter o veículo numa determinada cota, dentro de uma pequena tolerância. A passagem de uma cota para outra deve manter os mesmos princípios apresentados para o controlador do plano horizontal.

O ajuste deste controlador deve ser tal que, também não excite excessivamente outros modos de oscilação do veículo.

Como a estrutura da função de transferência do veículo para o movimento vertical é similar aos dos outros movimentos, cabem aqui as mesmas observações em relação ao projeto do controlador clássico.

4.1.2 Projeto do controlador

O objetivo é desenvolver um sistema de controle para traquear uma dada trajetória, isto é, que o veículo persiga uma determinada trajetória definida ao longo

do tempo. Será admitido que o movimento horizontal e o movimento vertical sejam desacoplados.

Serão mostradas, inicialmente, as leis de controle globais, isto é, as leis de controle para os planos horizontal e vertical. Posteriormente, para estimar os valores dos parâmetros destes controladores é efetuado um estudo individualizado para cada direção do movimento, ignorando-se os demais. O desempenho do controlador é então avaliado através de simulação dinâmica considerando-se o modelo completo do sistema. Para auxiliar a escolha dos melhores parâmetros é adotado um fator de mérito baseado no erro de posição.

4.1.2.1 Projeto do controlador para o plano horizontal

Na figura (26) é mostrado esquematicamente que o objetivo do veículo é perseguir a trajetória J , de tal modo que as coordenadas lineares do centro de gravidade do veículo coincidam com os pontos da trajetória e que o rumo seja tangente a ela.

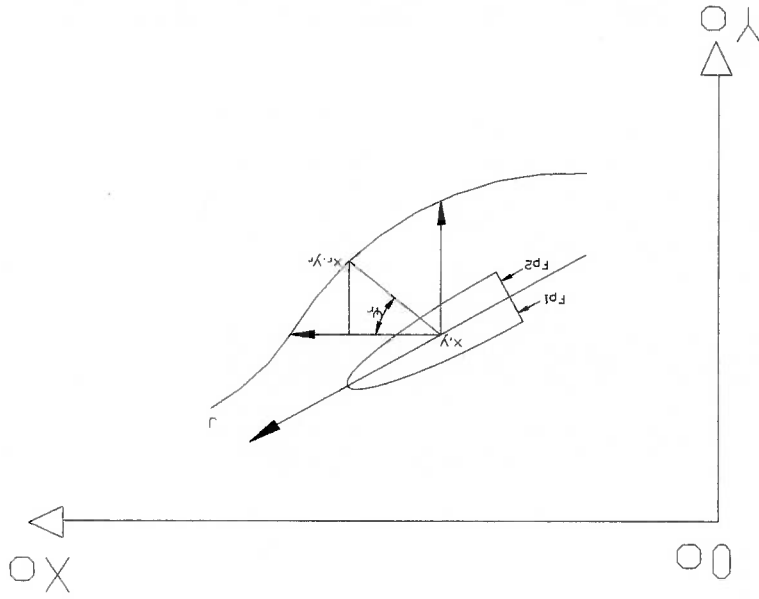


Figura 26 - Representação das coordenadas da trajetória prevista com as coordenadas do veículo.

Nesta abordagem, se o centro de gravidade do veículo não coincidir com a trajetória, o controlador calculará as forças necessárias nas direções OX e OY em função dos erros nestas direções, respectivamente.

A lei de controle é baseada no erro de posição do centro de gravidade do veículo em relação à posição de referência no instante t

Sejam no instante t :

$$\begin{aligned} e_x &= x_r - x \\ e_y &= y_r - y \end{aligned} \quad (4.12)$$

os respectivos erros nas direções OX_0 e OY_0 .

onde: x_r e y_r são as posições de referência e são definidas ao longo do tempo, isto é:

$$\begin{aligned} x_r &= x_r(t) \\ y_r &= y_r(t) \end{aligned}$$

Adotando o controlador PD, as forças nestas direções são dadas por:

$$F_{Tx} = K_{px}(e_x + T_{px} \frac{de_x}{dt}) \quad (4.13)$$

$$F_{Ty} = K_{py}(e_y + T_{py} \frac{de_y}{dt}) \quad (4.14)$$

sendo: K_p é o ganho do controlador
 T_p é a constante de tempo

Resta agora projetar estas forças no sistema de coordenadas móveis fixadas no veículo. Convém ressaltar que o VSNT não possui hélices laterais e sendo assim somente será considerada a projeção das forças obtidas anteriormente na direção OX₁ que resulta em:

Até o presente momento foram determinadas as forças requeridas nas direções de avanço e caturro e, do momento de guinada. Estes esforços devem ser realizados pelos dois propulsores a ré e os verticais instalados no submersível. Para o

4.1.3 Alocação de Empuxo

sendo, $e_z = z_r - z$ o erro na posição do centro de gravidade do veículo em relação à posição de referência no instante t na direção OZ_0 .
onde: z_r é a posição de referência definida ao longo do tempo, isto é: $z_r = z_r(t)$

$$F_{Tz} = K_{pz}(e_z + T_x \frac{de_z}{dt}) \quad (4.18)$$

Para o plano vertical a lei de controle é dada por:

4.1.2.2 Projeto do controlador para o plano vertical

$$F_{TN} = K_{pN}(e_\psi + T_{d\psi} \frac{de_\psi}{dt}) \quad (4.17)$$

O momento requerido é dado então por:

$$\psi_r = \arctg \frac{y_r - y}{x_r - x} \quad (4.16)$$

Para o rumo será admitido que a sua referência será dada por:

$$F_{px} = F_{Tx} \cos \psi + F_{Ty} \sin \psi \quad (4.15)$$

plano horizontal o empuxo de cada um dos propulsores pode ser determinado resolvendo-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned}
 F_{p1} + F_{p2} &= F_{px} \\
 F_{p1}h - F_{p2}h &= F_{TN}
 \end{aligned}
 \tag{4.19}$$

onde F_{p1} e F_{p2} são respectivamente as forças dos propulsores 1 e 2 instalados a ré e, h é a distância entre o centro do propulsor e o eixo de rotação.

Resolvendo-se este sistema de equações obtêm-se que os empuxos são dados por:

$$\begin{aligned}
 F_{p1} &= (F_{px} + F_{TN}/h)/2 \\
 F_{p2} &= (F_{px} - F_{TN}/h)/2
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

Para o plano vertical o empuxo dos propulsores é dado por:

$$F_{pz} = F_{tz}
 \tag{4.21}$$

Na figura 27, é mostrado o diagrama de blocos do sistema de controle integrando-se o controlador, o alocador de empuxo ao VSNT Jaú I.

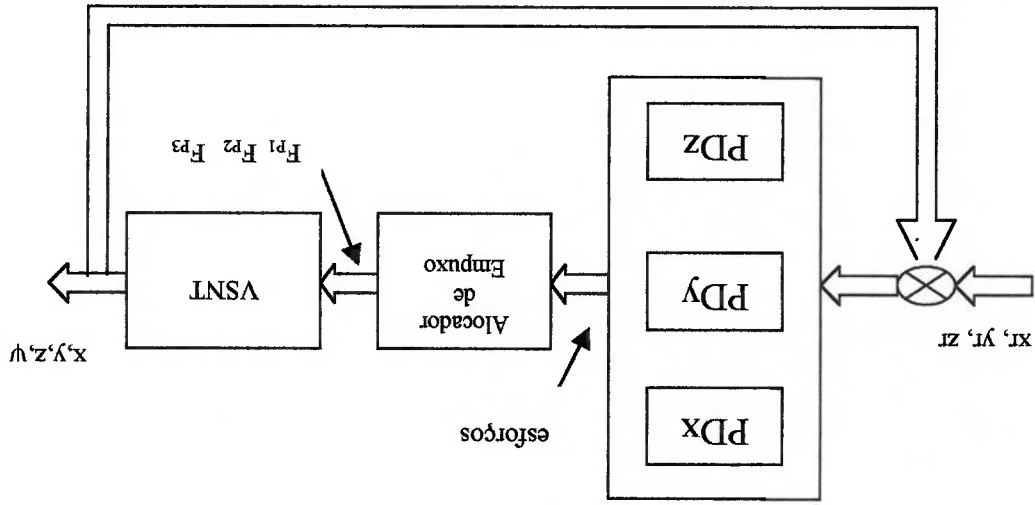


Fig. 27 - Diagrama de blocos global do sistema de controle

4.1.4 Seleção dos Parâmetros de Controle

Para determinar os valores dos parâmetros dos controladores PD, que constituem-se em oito no total, ou seja, K_p e T_p para cada uma dos quatro movimentos possíveis, admitiu-se inicialmente que tais movimentos sejam considerados completamente independentes e o seu modelo matemático adotando o amortecimento puramente linear.

A função de transferência em malha aberta deste sistema para uma direção genérica é dada por:

$$x(s) = \frac{K_p(1+T_p s)}{1} \frac{e(s)}{s(M_G s + c)} \quad (4.22)$$

Onde $e(s)$ é a Transformada de Laplace do erro.

Como o expoente do monômio (s) é 1 o sistema é do tipo 1

O erro deste sistema é dado por:

$$e(s) = \frac{1}{1+G(s)} x_r(s) \quad (4.23)$$

$$\text{onde: } G(s) = \frac{K_p(1+T_p s)}{1} \frac{(Ts+1)}{s(M_G s + c)}$$

Pode-se mostrar que para sistemas do tipo 1 o erro em regime permanente é zero para entrada na referência igual a degrau unitário e igual a $1/K_p$ para entrada rampa.

A função de transferência entre a saída e a referência para uma direção genérica é dada por:

Na Fig. 29 é mostrada a resposta do sistema para entrada na referência de grau unitário. Valores inferiores de K_p minimizam a sobre-elevação mas aumentam o tempo total de resposta. Por outro lado, valores superiores tendem a aumentar a sobre-elevação embora o tempo de resposta seja mais rápido.

$$\frac{1}{C} \leq \frac{TD}{M} + \frac{1}{T} \quad (4.26)$$

Na Fig. 28 é mostrado o diagrama do lugar das raízes considerando-se o movimento de avanço para o valor de $Td=3$. Pode-se mostrar que para que haja estabilidade para qualquer de ganho é necessário que:

$$I = \int_0^{\infty} (e_x^2 + e_y^2 + e_z^2 + e_w^2) dt \quad (4.25)$$

Uma vez obtido os parâmetros do controlador para cada uma das direções verificou-se o desempenho de todo o sistema de controle através de simulação dinâmica considerando o modelo matemático completo e impondo uma determinada trajetória para o veículo. Para refinar o projeto de controle bem como avaliar a influência dos parâmetros definiu-se um índice de erros como:

Os parâmetros do controlador foram selecionados através do método iterativo procurando observar a resposta do sistema considerando-se uma entrada de grau no sinal de referência. Para orientar a busca variou-se Td dentro de uma determinada faixa e o ganho foi selecionado baseado no gráfico de lugar das raízes. Para cada par de parâmetros do sistema foi efetuada simulação dinâmica e procurou-se selecionar ganhos que apresentavam melhor tempo de resposta e sem sobresinal. Tais procedimentos foram realizados utilizando recurso do Matlab.

$$\frac{x(s)}{x_r(s)} = \frac{TM_G s^3 + (Tc + M_G) s^2 + (c + K^p T^d) s + K^p}{K^p (1 + T^d s)} \quad (4.24)$$

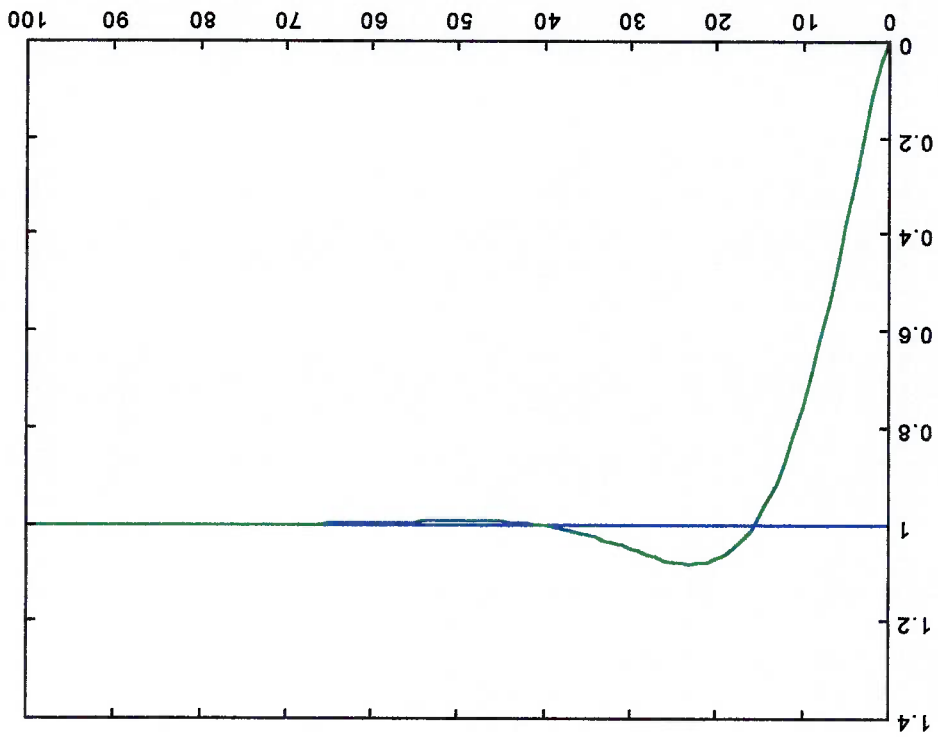


Fig. 29 Resposta do Degrau Unitário para Mov. Longitudinal (X)

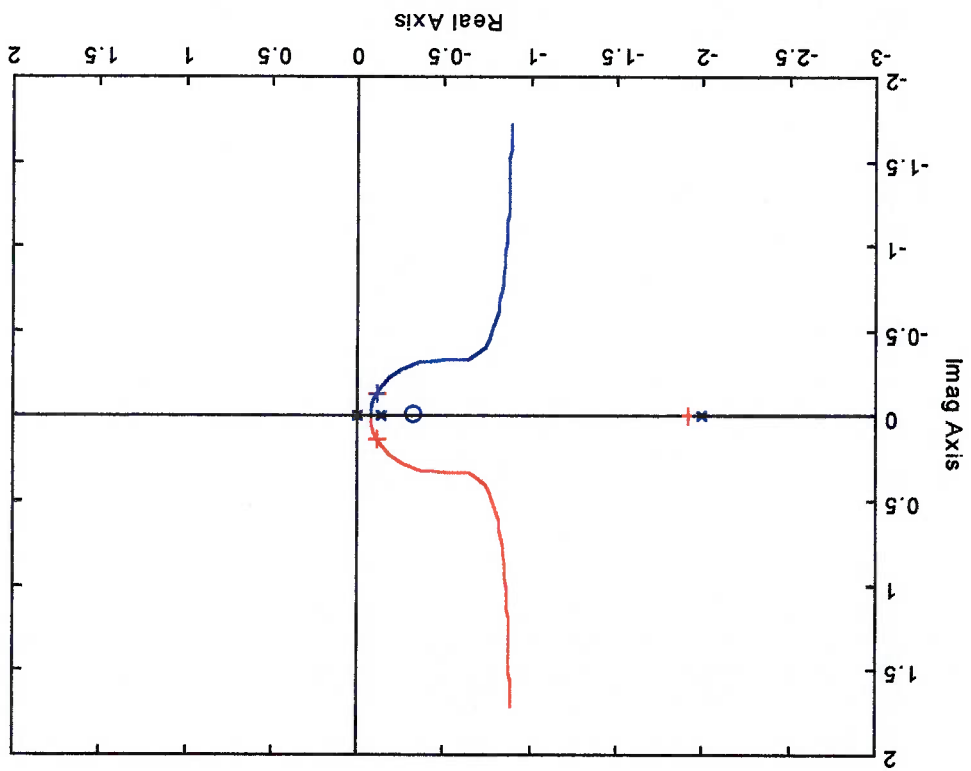


Fig. 28 Lugar das Raízes para Movimento Longitudinal (X)

Resultados semelhantes foram obtidos para outras direções. Baseando-se nos resultados para uma única direção foram efetuadas uma série de simulações buscando minimizar o índice de erro, conforme equação (4.25). Para isto foi selecionada uma trajetória padrão que é mostrada nas Fig 30. Os ganhos selecionados após estes testes estão indicados na Tab. 10.

A figura 30a mostra a trajetória de forma espacial. A figura 30b mostra a referida trajetória pela vista superior isto é, no plano X_o, Y_o e, finalmente a figura 30c mostra a trajetória descendente no plano Z_o, Y_o .

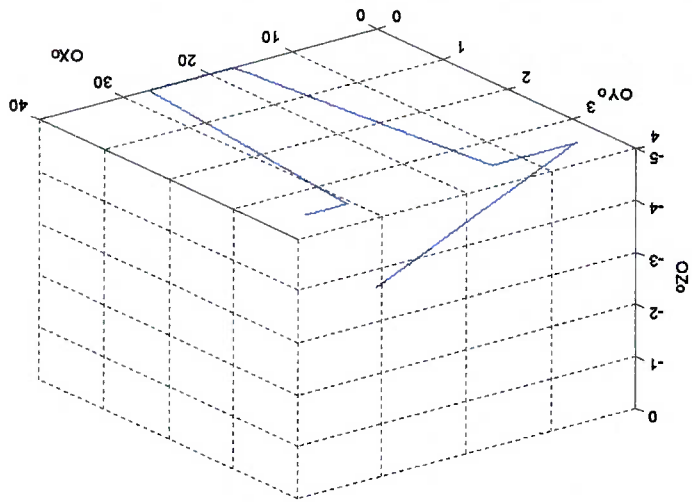


Fig. 30a – Trajetória proposta para simulação

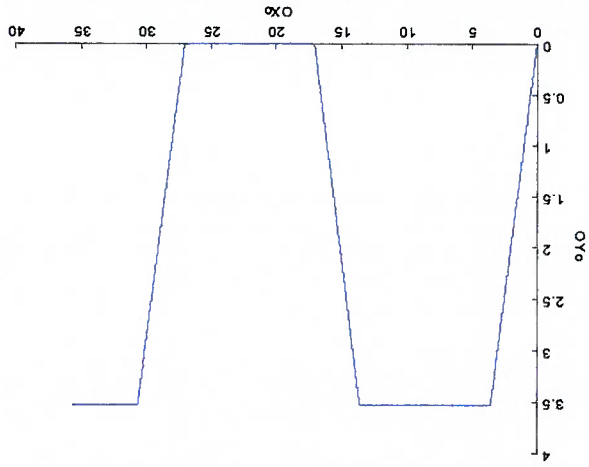
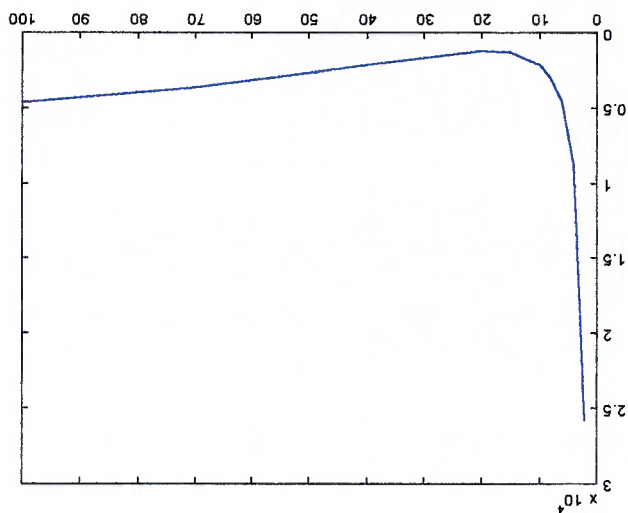


Fig. 30b – Vista superior da trajetória proposta

Cabe ressaltar que numa análise visual os parâmetros que minimizam o índice de erro não mostram necessariamente o melhor desempenho em termos de oscilações na perseguição da trajetória.

Fig. 31 – Índice de erro para uma única direção (X)

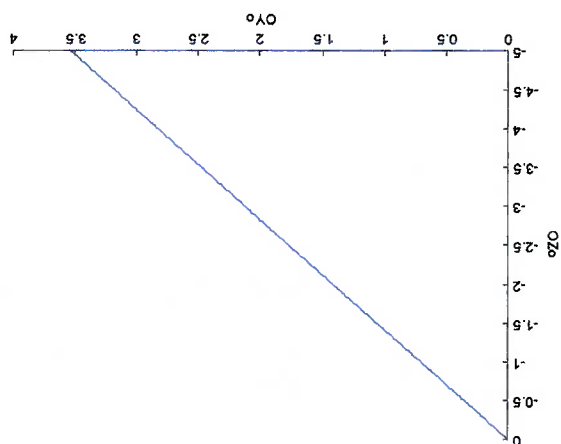


Para ilustrar a sensibilidade do índice de erro é mostrado na Fig. 31 os seus valores variando-se o ganho K_p e mantendo-se o T_d constante em 3 para o sentido de X , o que indica que valores de K_{px} próximos de 15 apresentam menor índice de erro.

adotado 0,1 m/s.

Estas trajetórias foram geradas ao longo do tempo com velocidade compatível com o sistema propulsor do VSNT-Jatú I, sendo no caso em questão

Fig. 30c – Vista da trajetória descendente



Após séries de testes, buscando resultados adequados com o menor índice de erros possível, e com o melhor desempenho geral, adotou-se os valores mostrados na tabela 10 para as constantes do controlador.

| Sentido | Kp | Td |
|---------|-----|-----|
| X | 11 | 3.0 |
| Y | 10 | 4.0 |
| N | 12 | 1.0 |
| Z | 100 | 2.5 |

Tabela 10 - Constantes do controlador PD

Resultados da simulação com os parâmetros definidos na Tab. 10 estão mostrados nas figuras 32.

A figura 32a representa o comportamento do submersível diante da trajetória proposta. Observa-se de uma maneira geral, que o desempenho do controlador é satisfatório porque o VSNT - Jau I acompanha a trajetória de referência.

Na figura 32b é mostrado o movimento vertical, onde se observa durante a descida um erro entre a trajetória de referência e a trajetória real. Observa-se também que o erro de posição é nulo quando a cota fica constante. Estas ocorrências eram esperadas uma vez que o sistema é do tipo 1.

Na figura 32c onde é demonstrado o comportamento o comportamento do submersível no plano horizontal, nota-se uma boa aderência, exceto quando há mudança de direção.

Os gráficos das figuras 32d e 32e mostram a evolução da trajetória de referência e a real ao longo do tempo respectivamente para X e Y, demonstrando um bom comportamento apesar de um certo erro, principalmente quando há variação de referência ao longo do tempo. Tal erro é da ordem de 0,60m para X e 0,30m para Y.

A figura 32f, apresenta o comportamento do submersível relativo ao movimento de guinada, cujo ângulo de referência é dado pela equação (4.16). Pela figura observa-se que os movimentos previstos na trajetória de referência foram perseguidos satisfatoriamente.

O empuxo requerido para cada um dos propulsores é demonstrado pela figura 32g. Nota-se que o empuxo médio é da ordem de 3,5N e nos pontos de guinada ocorre uma variação intensa, chegando a valores máximos da ordem de 6N, estando tais valores dentro dos parâmetros esperados.

Fig. 32a Comportamento geral diante da trajetória proposta
verde: referência; azul: real

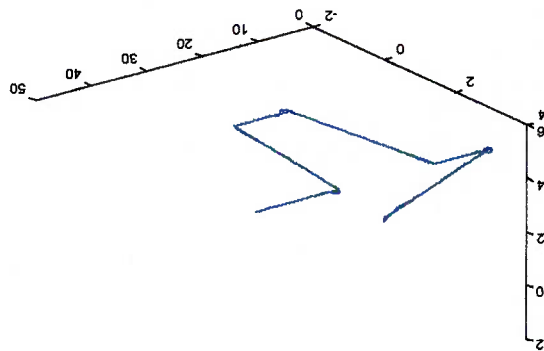


Fig. 32b Comportamento relativo a movimentação vertical
verde: referência; azul: real

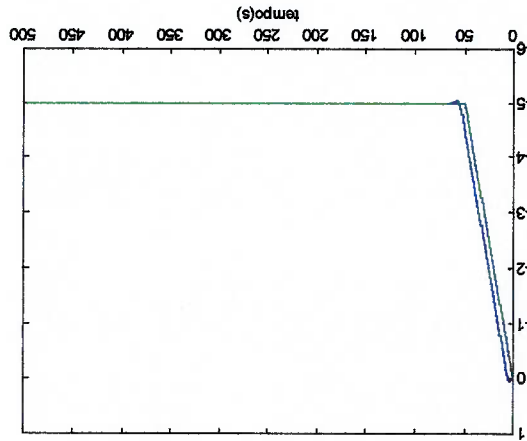


Fig. 32e Comportamento relativo a movimentação na direção OY
 verde: referência; azul: real

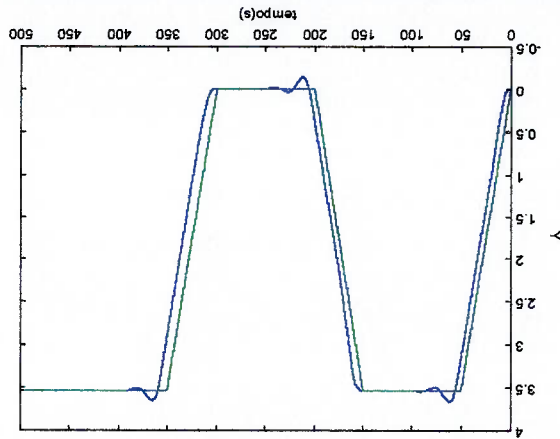


Fig. 32d Comportamento relativo a movimentação na direção OX
 verde: referência; azul: real

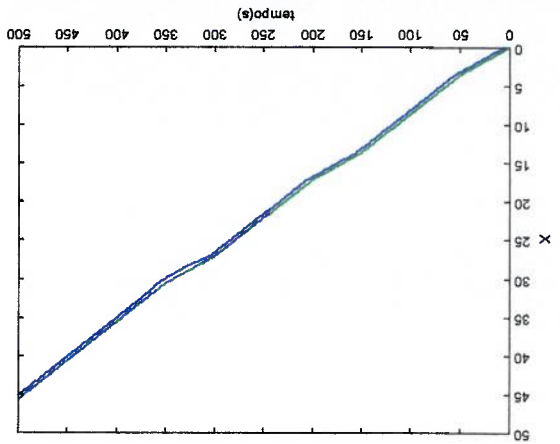
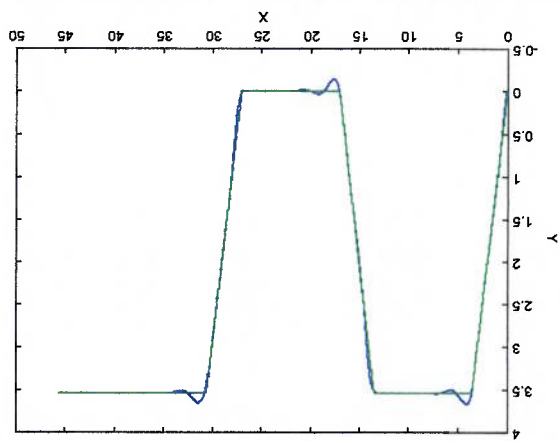


Fig. 32c Comportamento relativo a movimentação horizontal
 verde: referência; azul: real



A figura 33a representa o comportamento do submersível frente a trajetória de referência, onde se observa de uma maneira geral que o desempenho do controlador igualmente satisfatório. As figuras 33b e 33c apesar de um certo erro, também demonstram uma boa aderência na evolução da trajetória de referência e a real ao longo do tempo.

Outras trajetórias também foram submetidas ao controlador que igualmente demonstrou bom desempenho, como pode ser observado pelas figuras 33, onde para exemplo de demonstração uma trajetória circular foi tomada como referência.

Fig. 32g Empuxo requerido para cada um dos propulsores verde: propulsor 1; azul: propulsor 2

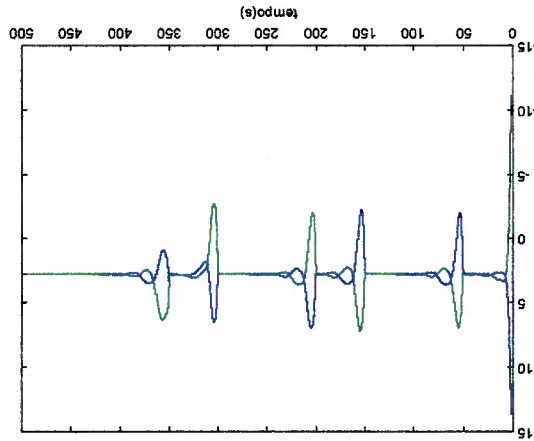


Fig. 32f Comportamento relativo a movimentação de guiada verde: referência; azul: real

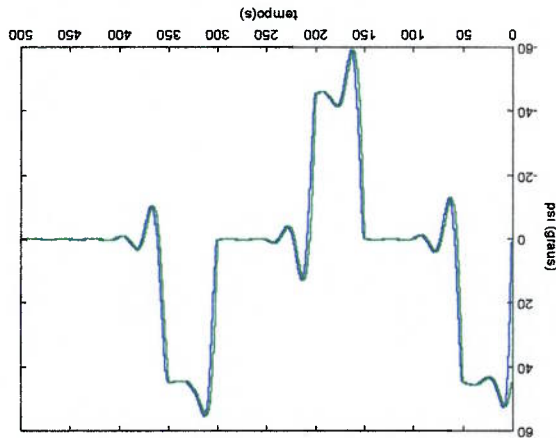


Fig. 33c Comportamento relativo a movimentação na direção OY

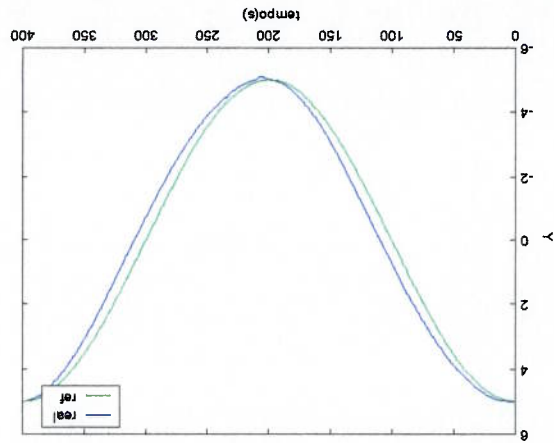


Fig. 33b Comportamento relativo a movimentação na direção OX

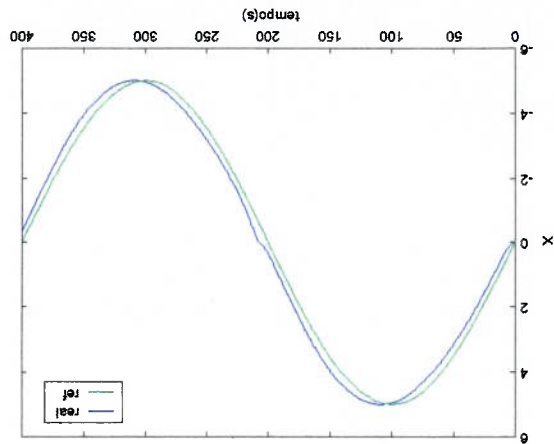
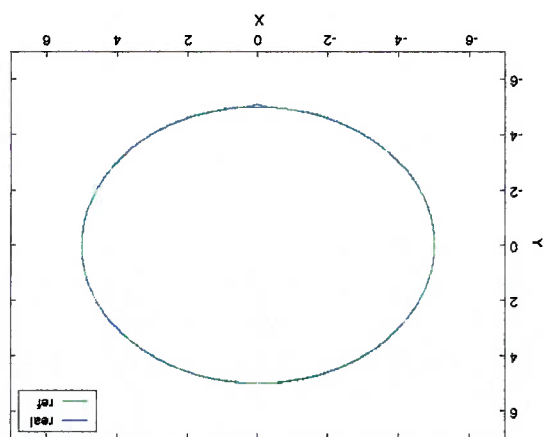


Fig. 33a Comportamento geral diante da trajetória proposta



5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foram estudos procedimentos para implantação de um sistema de controle para um submersível não tripulado tomando-se como exemplo o VSNT-Jau I, cujo equipamento foi projetado para uso no meio fluvial. O modelo matemático desenvolvido requer outros parâmetros, coeficientes de amortecimento e de massa adicional, que para corpos de geometria complexa como no caso, são difíceis de serem obtidos analiticamente. Desta foram optou-se por estimá-los através de ensaios de decaimento utilizando-se um modelo reduzido do submersível. O sistema de controle utilizado é baseado na teoria clássica de controlador tipo PID. O desempenho do controlador foi avaliado através de simulações dinâmicas impondo-se o acompanhamento de uma trajetória tridimensional definida ao longo do tempo.

Para estimar os valores de massa adicional e os coeficientes de amortecimento, foi desenvolvido um aparato experimental, relativamente simples, para realizar ensaios de decaimento. Os resultados obtidos através destes experimentos mostraram-se adequados pois quando em comparação com valores obtidos por outros procedimentos houve indicação de consistência de dados.

Embora o VSNT-Jau I seja um sistema multivariável, o controlador foi projetado admitindo-se a independência dos movimentos em cada um dos graus de liberdade. Isto significa que foram desenvolvidos quatro controladores, correspondentes as direções de avanço, deriva, guinada e caturro, e posteriormente reunidos para a simulação completa.

Para o ajuste dos parâmetros de controle K_p e T_d , foi efetuada, inicialmente, uma análise individual para cada movimento e para cada par de parâmetros do sistema foi efetuada simulação dinâmica e procurou-se selecionar ganhos que apresentavam melhor desempenho. Posteriormente, baseado nos parâmetros obtidos inicialmente, ajustou-se os valores finais dos ganhos dos controladores definindo-se a

guisa de orientação, um índice de erro para o movimento em três dimensões. Durante esta fase percebeu-se que parâmetros que minimizam o índice de erro não necessariamente apresentam o melhor desempenho global. Desta forma os parâmetros foram selecionados através do método iterativo e uma certa inspeção visual dos dados.

O desempenho global do controlador pode ser considerado satisfatório uma vez que houve aderência à trajetória de referência. No entanto, conforme era de se esperar, o sistema de controle não elimina erro de posição quando há variação contínua da referência, mormente quando a velocidade da mudança da referência é aumentada. Desta forma o desempenho do controlador é melhorado para variações lentas da referência.

Como indicação para trabalhos futuros, estudos complementares poderão ser realizados levando-se em conta, como por exemplo: a inclusão da corrente, que implica na obtenção de esforços para diferentes ângulos de ataque. Além disso pode ser incluído a influência do umbilical na dinâmica do submersível, notadamente em águas correntes. A aplicação de outras leis de controle tais como adaptativo, deslizante, baseadas em redes neurais merecem ser estudadas para averiguar se há, eventualmente, ganhos de desempenho. Neste trabalho não foi levado em consideração a dinâmica e o desempenho dos propulsores. O sistema de propulsão merece um estudo detalhado no futuro pois o seu desempenho pode ser alterado ao ser instalado no corpo de um submersível devido às interações hidrodinâmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, A.E.A. et al. Relatório anual do Projeto VSNT Jau I Jau: Fatec-Jahu-CEETEPS. 1997.
- ARANHA, J.A.P. et al. Full Scale Decay Test of the Tanker: field data and theoretical analysis. *Ocean Engineering*, n.26, p.125-145, 1999.
- BUSCARIOLLO, P.H. Estudo de um Sistema de Visão voltado ao submersível não tripulado Jau II. 2002. 104p. (Dissertação - mestrado em engenharia naval) FPU SP São Paulo.
- CANHETTI, A.C.M. Modelo Livre de Submarinos: descrição, modelagem matemática, controle e coeficientes hidrodinâmicos. 1998. 150p. (Dissertação - mestrado em engenharia naval) FPU SP, São Paulo.
- CACCIA, M., et al. Unmanned Underwater Vehicles for scientific applications and robotics research: the ROMEO Project. *Marine Technology Society Journal*, vol. 24, n. 2, p. 3-17, Summer 2000.
- CUNHA, J.P.V.S. et al. Avaliação Experimental da Modelagem e Simulação da Dinâmica de um Veículo Submarino de Operação Remota. *Revista da Sociedade Brasileira de Automática*. São Paulo, vol 11, n.2, p.82-93. ago. 2000.
- DOMINGUEZ, R.B. Simulação e Controle de um Veículo Submersível de Operação Remota. 1989. 207p. (Dissertação de mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica). COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro.
- EGESKOV, P. et al. Pipeline inspection using an autonomous underwater vehicle. *OMAE. Pipeline Technology-ASME* 1995. v.5

- FAIRBROTHER, H.N.R.; STACEY, B.A. Aspects of Remotely Operated Vehicle Control – A Review. *Society for Underwater Technology*, v. 19, n. 1, Spring 1993.
- FOSSEN, T.I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Imprinta Chichester. New York: Wiley, c1994. 480p.
- GABLER, U. *Projeto de Submarinos Rio de Janeiro*: Arsenal da Marinha e Escritório Técnico de Construção Naval da Marinha do Brasil. 1991. 119p.
- FUJII, U. et al., *Mission Execution Experiments with a Newly Developed AUV Twin-Burger*. Proceedings of the UUST. Durham: New Hampshire, 1993.
- HELENO, H.S. *Análise da Trajetória e do Controle Automático de um Submarino pelo Emprego de um Modelo Livre*. 1983 (Dissertação de mestrado em Engenharia.Naval) EPUSP, São Paulo.
- HSU L. et al, *Design of a New High Performance vs Position Control of ROVs*. Edinburgh, U.K.: Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference. 1991. p. 53-60
- LAWRIE, J.A. In *The Undersea Service Industry*. *Sea Technology Magazine*: p.29, Jan, 1983.
- MAKI, T. et al, *Simulation and Experiment of Automatic Controlled ROV*. Proceedings of the Fifth International Offshore Mechanical and Artic Engineering Symposium p.260-267. 1986.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 3ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1998. 324p.

- PASCOAL, A.; ENCARNAÇÃO, E. Combined trajectory tracking and path following: an application to the coordinated control of autonomous marine craft. 40th IEEE -Conference on Decision and Control. Orlando, Florida, USA, 2001.
- PASCOAL, A. The AUV MARIUS: Mission Scenarios Vehicle Design, Construction and Testing. Proceedings of the 2nd Workshop on Mobile Robots for Subsea Environments, Monterey Bay Aquarium, Monterey, California, 1994.
- ROSCOE, K. *Exploração Submarina*. São Paulo: Melhoramentos Edusp, 1971. p. 157 (Série Prisma)
- ROSSOLINI, A. et al., Multiple Models Control of a Remotely Operated Vehicle: analysis of models structure and complexity. Sasp Offshore Engineering. Fano, Italy, 2000.
- SEYMOUR, R.J. et al., Research Submersibles and Undersea Technologies in Finland, France, Russia, Ukraine and the United Kingdom. Disponível em: http://itri.loyola.edu/ar98_99/rsut.html. Acesso em: mar 1999.
- STEPHENS, E.C. *Os Submarinos*. Lisboa: Verbo, 1994. 54p.
- SNAMBE The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Trough a Fluid, Technical and Research Bulletin n.1-5, 1950.
- YOERGER, D.R.; COOKE, J.G.; SLOTINE, J.E. The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation Into Control System Design. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 15, n. 3, July 1990.

APÊNDICES

- APÊNDICE I - Relatório dos ensaios para obtenção dos valores de massa adicional e fator de amortecimento.
- APÊNDICE II - Relatório do ensaio para obtenção do momento de inércia do modelo em escala reduzida do submersível VSNT - Jau I.
- APÊNDICE III - Dados da Análise de Massa Adicional e do amortecimento usando a aproximação linear.
- APÊNDICE IV - Dados da Análise do Amortecimento usando a aproximação quadrática.
- APÊNDICE V - Dados da Análise do Amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática.
- APÊNDICE VI - Estudo dos Fatores de Conversão de escala para coeficientes de Massa e Amortecimento entre o modelo reduzido e o modelo real do submersível VSNT Jau I.

RELATÓRIO DOS ENSAIOS REALIZADOS COM UM MODELO REDUZIDO DO
VSN-T-JAÚ I NO TANQUE DE PROVAS DA EPUSP PARA OBTENÇÃO DOS
VALORES DE MASSA ADICIONAL E FATOR DE AMORTECIMENTO, COMO
PARTE DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUIZ ALBERTO SORANI

APÊNDICE I

SUMÁRIO

| | | |
|----|--|-------|
| 01 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 02 | MATERIAIS E MÉTODOS | 2 |
| 02 | O Modelo | 2.1 |
| 03 | A Estrutura Necessária para o Ensaio | 2.2 |
| 06 | O Sistema de Molas | 2.3 |
| 06 | Determinação do Coeficiente de Elasticidade da Mola | 2.3.1 |
| 09 | A Célula de Carga | 2.4 |
| 09 | A Calibração da Célula de Carga | 2.4.1 |
| 10 | O Elemento Tirante | 2.5 |
| 10 | O Equipamento Computacional | 2.6 |
| 12 | PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO | 3 |
| 12 | Preparação do Modelo | 3.1 |
| 15 | Montagem do Sistema | 3.2 |
| 16 | Descrição da Montagem | 3.2.1 |
| 20 | DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS | 4 |
| 23 | RESULTADOS DOS ENSAIOS | 5 |
| 25 | Sobreposição dos dados dos ensaios de movimentação longitudinal, estrirado por tirantes SOLTs | 5.1 |
| 26 | Sobreposição dos dados dos ensaios de movimentação longitudinal, estrirado por pilões SOLTs | 5.2 |
| 27 | Sobreposição dos dados dos ensaios de movimentação transversal, estrirado por tirantes SOLTs | 5.3 |
| 28 | Sobreposição dos dados dos ensaios de movimentação vertical, estrirado diretamente do casco SOVS | 5.4 |
| 29 | Sobreposição dos dados dos ensaios de movimentação rotacional (rumo) estrirado diretamente do casco, SORRS | 5.5 |
| 30 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 6 |
| 32 | CONCLUSÃO | 7 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----|--|
| 04 | Figura A1 - Dispositivo de adaptação aos muros do Tanque de Forças..... |
| 05 | Figura A2 - Foto do elemento de adaptação ao muro do Tanque de Provas..... |
| 05 | Figura A3 - Vistas principais da haste de junta móvel..... |
| 06 | Figura A4 - Foto do elemento elástico..... |
| 08 | Figura A5 – Gráfico do comportamento elástico da mola – ascendente |
| 08 | Figura A6 – Gráfico do comportamento elástico da mola – descendente |
| 08 | Figura A7 – Gráfico do detalhe da faixa de trabalho..... |
| 09 | Figura A8 - Foto Célula de Carga utilizada nos ensaios..... |
| 11 | Figura A9 - Foto dos equipamentos eletrônicos de aquisição de dados..... |
| 12 | Figura A10 - Foto da disposição dos elementos de fixação do modelo..... |
| 12 | Figura A11 - Foto da disposição dos elementos de fixação do modelo..... |
| 13 | Figura A12 - Foto de detalhe de pontos de fixação de tirantes junto ao modelo |
| 13 | Figura A13 - Foto de detalhe de pontos de fixação de tirantes junto ao modelo |
| 14 | Figura A14 - Foto de detalhe de pontos de fixação de tirantes junto ao modelo..... |
| 14 | Figura A15 - Foto de detalhe de pontos de fixação diretamente do casco..... |
| 15 | Figura A16 - Foto de detalhe de pontos de fixação diretamente do casco..... |
| 16 | Figura A17 - Foto de detalhe de posicionamento para produção do movimento inicial..... |
| 17 | Figura A18 - Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos lineares..... |
| 18 | Figura A19 - Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos de rotação em torno do eixo Z..... |
| 19 | Figura A20 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional..... |
| 19 | Figura A21 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional..... |
| 19 | Figura A22 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional..... |
| 23 | Figura A23 - Quadro dos Ensaios Realizados..... |

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de determinar os coeficientes de massa adicional e de fator de amortecimento de um submersível pela coleta de dados de laboratório, motivo de dissertação de mestrado de Luiz Alberto Sorani, o presente relatório apresenta os ensaios realizados no Tanque de Provas do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP, em julho de 2001, para análise do comportamento hidrodinâmico do corpo de ensaio.

O corpo de ensaio utilizado trata-se de um modelo em escala 1:2,5 do submersível VSNT Jau I, construído e operado pela FATEC-Jahu, cujo próprio modelo foi em outra oportunidade utilizado como corpo de prova em testes de resistência ao reboque, realizado no Tanque de Provas do Laboratório de Hidrodinâmica da Divisão de Tecnologia de Transportes - Agrupamento de Engenharia Naval e Oceânica do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

Os ensaios foram preparados para que uma célula de carga, adequadamente instalada junto ao corpo de provas, fosse capaz de refletir em forma numérica o comportamento oscilatório amortecido do referido modelo nos três eixos de direção lineares e, de rotação no sentido de rumo, separadamente.

Os dados numéricos então obtidos, aplicados às específicas equações da física e da mecânica clássica devidamente tratadas, fornecerão os coeficientes de massa adicional e fator de amortecimento de um corpo submerso.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O Modelo

Embora o modelo em teste seja uma réplica em escala reduzida, construído especialmente para os testes realizados no IPT em novembro de 1998 com o objetivo de determinar os coeficientes de resistência ao reboque, naquela oportunidade não foram consideradas as massas internas ao submersível, e, como para os testes agora programados, requereu-se de total equivalência, portanto houve a necessidade de dotar o modelo de massas que reproduzissem o equipamento original

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| <i>Partes do Submersível Original</i> | |
| Corpo Principal | 56.1 |
| Carrinho interno | 54.8 |
| Carenagem da bolina | 3.2 |
| Grampos | 5.0 |
| Corpo de Popa e Eixos | 9.4 |
| Hélices (2) | 1.4 |
| Anel de Popa | 1.4 |
| Eixos de Suporte da bolina | 1.2 |
| Encostos dos eixos dos hélices | 0.2 |
| Câmara de Vídeo | 0.8 |
| Cabos Elétricos | 4.0 |
| Lastro da bolina | 22.7 |
| TOTAL (M) | 160,2 |

$$m = M / \text{escala}^3 \quad m = 160,2 / 2,5^3 \quad m = 10,250\text{kg}$$

| | |
|---|---------------|
| <i>Partes do Modelo</i> | |
| Corpo Principal | 2,355 |
| Carenagem da bolina | 0,260 |
| Carenagem torreta | 0,235 |
| Ferragens (eixos, suportes, grampos) | 1,340 |
| Sub Total | 4,190 |
| Lastro Interno (compensar equipamentos) | 4,590 |
| Lastro da bolina | 1,470 |
| TOTAL (m) | 10,250 |

Na colocação do modelo na água, detectou-se a necessidade de adição de uma massa capaz de equilibrar a relação peso e empuxo, uma vez que o mesmo ficava com a torreta para fora d'água. Experimentalmente foram adicionados massas (Lastro de Ajuste final) até atingir 0,255kg, valor capaz de equilibrar tal relação.

| | |
|------------------------|-----------------|
| Lastro de Ajuste final | 0,255kg |
| TOTAL FINAL | 10,505kg |

A diferença de massa entre o modelo teórico e o prático de 0,255kg que foi necessária para equilibrar a relação peso e empuxo é da ordem de 2,5% em relação a massa total podendo ser considerada plenamente aceitável, por ser de uma ordem de grandeza bastante baixa.

Esta diferença, deve-se pelo fato de que a massa do submersível de 160,2 kg foi obtida de maneira menos confiável daquelas mais recentes conseguidas do corpo de provas, pelo fato da confiabilidade oferecida pelas respectivas balanças usadas em ambas ocasiões, donde se conclui que a massa total do submersível é:

$$M = m \cdot \text{escala}^3 \quad M = 10,505 \cdot 2,5^3 \quad M = 164,14\text{kg}$$

2.2 A Estrutura Necessária para o Ensaio

Os testes foram programados para serem realizados no tanque de provas do Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da USP Universidade de São Paulo, cujas dimensões principais são: largura 5,00m, profundidade 1,70m e comprimento 22,0m.

Para as necessidades programadas, e em vista das pequenas dimensões do corpo de provas e necessidades de deslocamentos menores de 1 metro, resolveu-se pela utilização do tanque no sentido transversal, aproveitando-se sua largura e profundidade, considerando para efeito desses testes as seguintes dimensões: comprimento 5,00m, profundidade 1,70m.

Para tanto, foi necessária a construção de um dispositivo, de forma a adaptar as dimensões do tanque e servir elemento apoio ao ensaio, uma vez que o modelo será colocado à movimentar-se de forma submersa.

Tal dispositivo, duas peças idênticas, cujo desenho encontra-se na Figura 1,

foi construído com perfis de ferro em forma de cantoneira "L", de 50,8mm, de maneira a compor um elemento capaz de adaptar-se aos muros laterais do tanque, muros esses cuja largura média é de 0,15m.

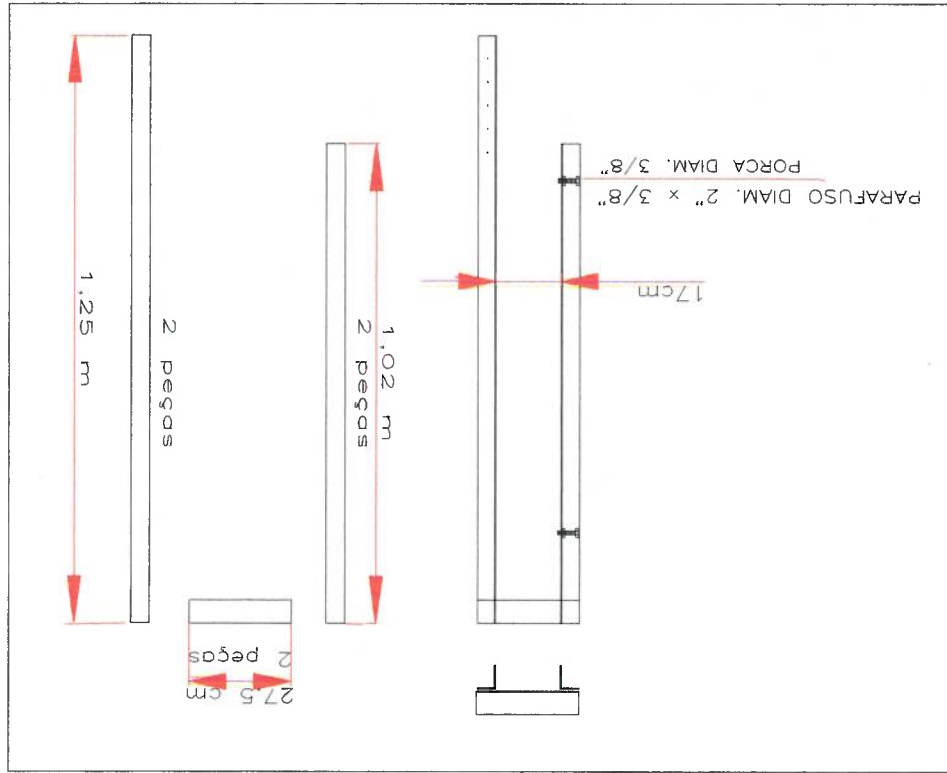


Fig. A1- Dispositivo de adaptação aos muros do Tanque de Provas

Neste dispositivo, próximo das extremidades, que ficam submersas, foram feitos quatro furos de 2,5mm de diâmetro e espaçadas de 50,0mm. Tais furos servem para acoplamento do elemento elástico, responsável pelo amortecimento do modelo. Nas extremidades que ficam por fora do tanque foram colocados dois parafusos de 2" x 3/8" cuja suas porcas foram soldadas no perfil, de forma compor presilhas, que fixam o elemento ao muro do tanque, como pode ser visto na da figura A2.



Fig. A2 - Foto do elemento de adaptação ao muro do Tanque de Provas

Esta estrutura, anteriormente descrita foi suficiente para os ensaios de movimentos de lineares, contudo para os testes de movimentos de rotação houve necessidade da construção de um outro dispositivo auxiliar, compondo-se uma haste de fixação com uma junta móvel, cuja função é posicionar o modelo permitindo-lhe apenas liberdade de movimentos rotacionais, conforme apresentado na figura A3.

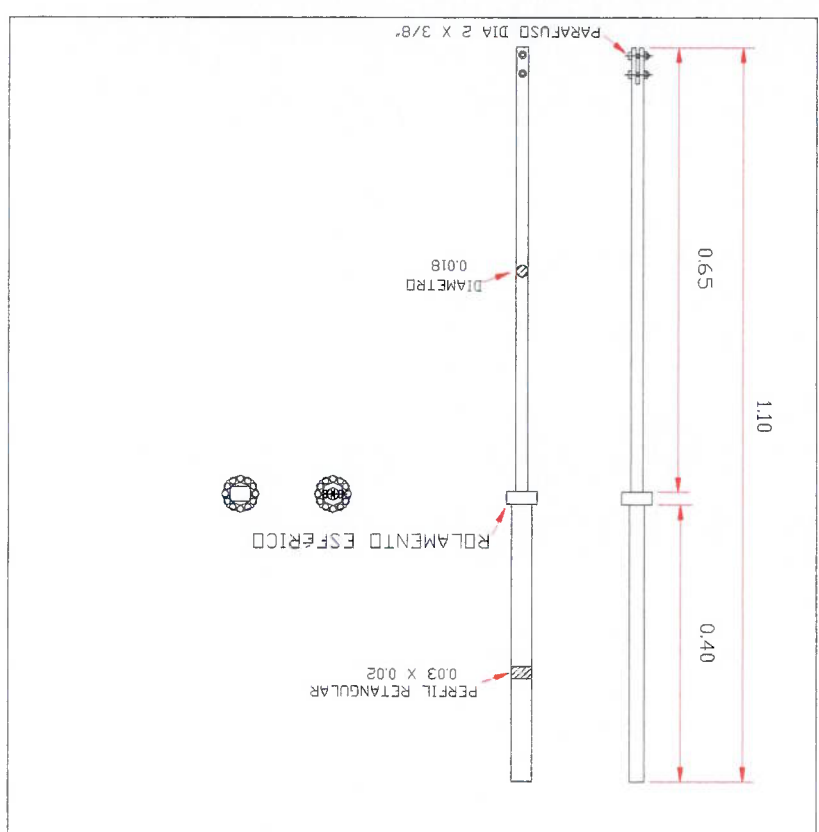


Fig. A3 - Vistas principais da haste de junta móvel

2.3 O Sistema de Molas

O Sistema de Molas escolhido para esses testes foi o "elástico clínico" conhecido também pelo nome popular de *tripa de mico*, escolhido em função de sua facilidade de aquisição, manuseio, custo e disponibilidade.

Foram construídos dispositivos de molas com o referido elástico, cujo diâmetro é de 0,57cm e 25,0cm de comprimento em condições de repouso, sendo que em suas extremidades foram colocados ganchos ou anéis metálicos (pitões) que servem de elos de ligação às demais partes do sistema. O comprimento total deste elemento elástico é então de 28,5cm, sendo 25,0cm do elástico e 1,75cm de cada pitão colocado cada lado, conforme apresenta as figura A4.



Fig. A4 - Foto do Elemento Elástico utilizado nos ensaios

2.3.1 Determinação do Coeficiente de Elasticidade "K" da Mola

Através de ensaios constituídos de deflexões do elástico por massas conhecidas, ao longo de uma escala graduada, pode-se determinar o fator de amortecimento k da mola, dados esses que podem ser observados na tabela A1 e curvas respectivas.

Experimentalmente verificamos que a constante elástica do referido elemento não se comporta linearmente para grandes deformações. Contudo para deformações em torno de 18cm com 7,5cm de oscilação, o comportamento elástico pode ser considerada constante, como se comprova pela tabela A1 e seus respectivos gráficos (figuras A5, A6 e A7). De maneira que na realização dos testes o elástico foi pré-tensionado em 46,5cm (25,0 + 1,75 + 1,75 + 18,0) que corresponde segundo a mesma experiência e tabela a 0,730 kgf.

Tabela A1 - Dados da calibração do elemento elástico

| Desl. (cm) | Massa (g) | K (gf/cm) |
|------------|-----------|-----------|
| 17,5 | 720 | 41,143 |
| 16,8 | 700 | 41,667 |
| 16,1 | 680 | 42,236 |
| 15,5 | 660 | 42,581 |
| 14,7 | 640 | 43,537 |
| 14 | 620 | 44,286 |
| 13,5 | 600 | 44,444 |
| 13 | 580 | 44,615 |
| 12,5 | 570 | 45,600 |
| 12 | 560 | 46,667 |
| 11,5 | 540 | 46,957 |
| 11 | 520 | 47,273 |
| 10,5 | 500 | 47,619 |
| 10 | 480 | 48,000 |
| 9,5 | 460 | 48,421 |
| 9 | 440 | 48,889 |
| 8,5 | 420 | 49,412 |
| 8 | 400 | 50,000 |
| 7,5 | 380 | 50,667 |
| 7 | 360 | 51,429 |
| 6,5 | 340 | 52,308 |
| 4,5 | 240 | 53,333 |
| 1,5 | 100 | 66,667 |
| 0 | 0 | 0 |
| 18 | 730 | 40,556 |
| 18,4 | 740 | 40,217 |
| 18,8 | 750 | 39,894 |
| 19,1 | 760 | 39,791 |
| 19,6 | 770 | 39,286 |
| 20 | 780 | 39,000 |
| 20,5 | 790 | 38,537 |
| 20,8 | 800 | 38,462 |
| 21,2 | 810 | 38,208 |
| 21,5 | 820 | 38,140 |
| 22,1 | 840 | 38,009 |
| 23 | 860 | 37,391 |
| 23,8 | 880 | 36,975 |
| 24,6 | 900 | 36,585 |
| 25,5 | 920 | 36,078 |
| 26,5 | 940 | 35,472 |
| 27,4 | 960 | 35,037 |
| 28 | 980 | 35,000 |
| 29 | 1000 | 34,483 |
| 29,8 | 1020 | 34,228 |
| 31,2 | 1040 | 33,333 |
| 32 | 1060 | 33,125 |
| 33,1 | 1080 | 32,628 |
| 34,1 | 1100 | 32,258 |

Fig. A5 - Gráfico do comportamento elástico da mola (ensaio ascendente)

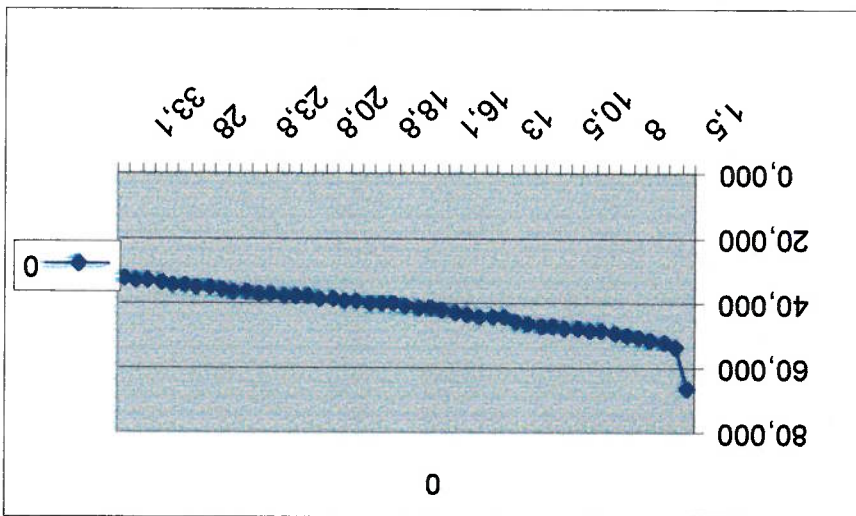


Fig. A6 - Gráfico do comportamento elástico da mola (ensaio descendente)

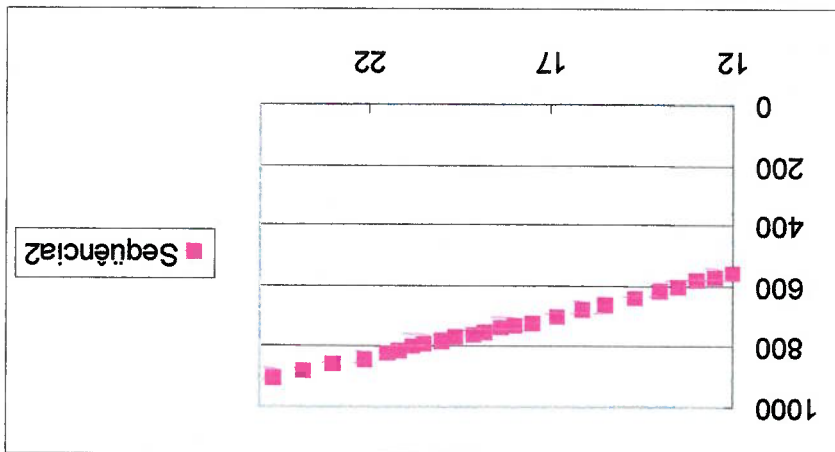
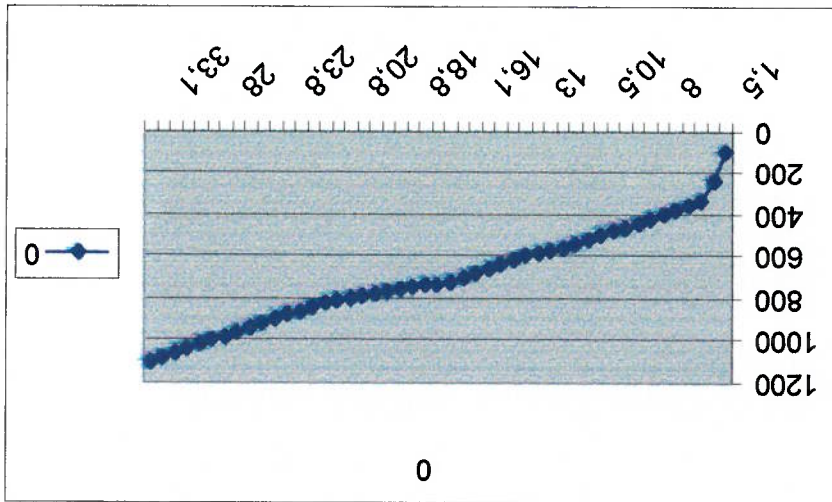


Fig. A7 - Gráfico do detalhe da faixa de trabalho da mola



2.4 A Célula de Carga

A célula de carga é um elemento resistivo variável fixado ao material a ser tensionado, ligado a uma Ponte de Wheatstone. Quando o material é deformado, pela adição de uma carga, o equilíbrio entre os resistores da Ponte é alterado, promovendo o aparecimento de uma corrente elétrica entre os terminais desta Ponte. Esta corrente é provocada pelo desequilíbrio dos resistores na Ponte de Wheatstone e proporcional a deformação mecânica do elemento sensor da célula de carga mostrada na figuras A8. Um Amplificador Extensiométrico, faz a análise e o registro destes dados.



Fig. A8 - Foto da Célula de Cargas utilizada nos ensaios

2.4.1 A Calibração da Célula de Carga

No processo de calibração da Célula de Carga utilizada nos testes, foram adicionadas massas de 0g até 1000g e posteriormente subtraídas massas desde 1000g até 0g, cujos dados podem ser observados na tabela A2 a seguir:

Calibração: ganho 500µe

canal 1

➤ um Amplificador Extensiométrico marca KIOVA modelo DPM 82A em seu

Para os ensaios foram utilizados

2.6 O Equipamento Computacional

Como elemento tirante de todo o sistema foi utilizado um Cordão de Nylon de 0,2cm de diâmetro, cuja constante elástica pode ser considerada infinita em comparação com a constante elástica do elástico clínico.

2.5 O Elemento Tirante

A faixa de trabalho deste experimento ficará em torno de 700g. Observa-se na calibração da célula de carga uma variação nos valores durante a ascendência e a descendência. Este erro segundo os técnicos do laboratório podem ser atribuídos a anormalidade de comportamento tanto do anel como do sensor da célula e ainda do próprio extensômetro. Apesar disso o erro aí existente deve também ser considerado aceitável pois é da ordem de aproximadamente 2%, ordem de grandeza bastante baixa nestes tipos de ensaios.

Tabela A2 - Dados da Calibração da Célula de Carga

| Massa | Volt | Volt | 1min | 2min |
|-------|-----------|-------------|-------|-------|
| 0g | 0.000 | 0.008 | 0.005 | 0.003 |
| 50g | 0.050 | 0.059 | | |
| 100g | 0.100 | 0.112 | | |
| 200g | 0.200 | 0.214 | | |
| 400g | 0.403 | 0.416 | | |
| 600g | 0.605 | 0.618 | | |
| 800g | 0.810 | 0.818 | | |
| 1000g | 1.014 | 1.015 | | |
| | Crescente | Decrescente | | |

Sinal de calibração: $+500\mu\text{e} = +1,310\text{V}$
 $-500\mu\text{e} = -1,310\text{V}$
Filtragem: Passa Baixa de 30Hz

➤ uma Placa de Aquisição de Dados A/D marca Lynx

➤ Programa de Aquisição de Dados marca Lynx, Modelo: AqDados.

A figura A9 apresenta o conjunto computacional utilizado nos ensaios.

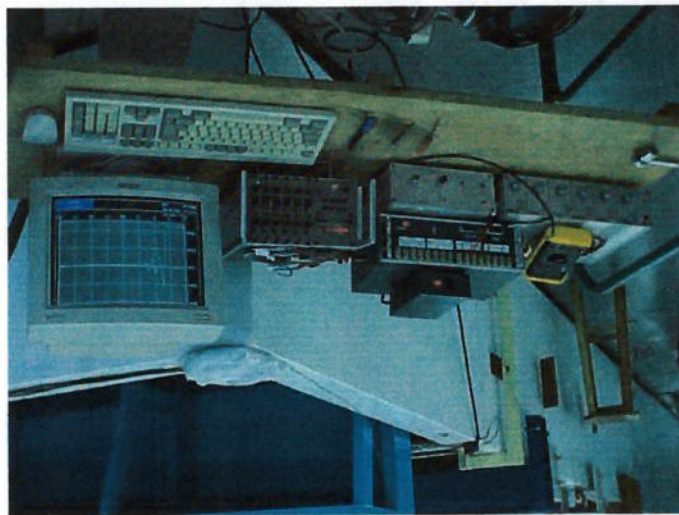


Fig. A9 - Foto dos equipamentos eletrônicos de aquisição de dados

3 PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO

3.1 Preparação do Modelo

Tendo em vista os ensaios terem sido programados para quatro tipos de movimentos: longitudinal, lateral, vertical e rotacional em torno do eixo Z, o modelo foi especialmente preparado para ser fixado para cada uma das condições acima mencionadas. Para os ensaios dos movimentos longitudinal e transversal, a fixação foi feita através de cabos dispostos nos sentidos verticais e horizontais, tanto de um lado como do outro, de modo a garantir um movimento uniforme sem produzir qualquer outro movimento no corpo de prova. Estes detalhes de fixação podem ser observados pelas figuras A10 e A11, onde o modelo está preparado para movimentos transversais.



Fig. A10 - Foto da disposição dos elementos de fixação do modelo



Fig. A11 - Foto da disposição dos elementos de fixação do modelo

Para a colocação destes cabos, foram fixados, na estrutura do modelo, anéis metálicos de 10 mm de diâmetro constituídos de fio de arame galvanizado de 1mm de espessura, conforme figuras A12, A13 e A14, dispostos em forma de cruz, de maneira que, ao colocar-se os cabos nos sentidos vertical e horizontal, para cada movimento ensaiado, tanto de um bordo como do outro, ou da proa como da popa, ou ainda da bolina como da torreia, encontra-se um ponto de equivalência simétrica, promovendo movimentos retilíneos como preconizado acima.



Fig. A12 - Foto de detalhe de ponto de fixação de tirantes junto ao modelo

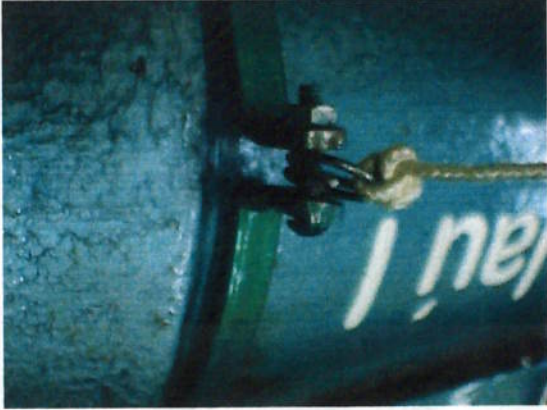


Fig. A13 - Foto de detalhe de ponto de fixação de tirantes junto ao modelo

Fig. A14 - Foto de detalhe de ponto de fixação de tirantes junto ao modelo



Esses pontos de equivalência de simetria junto aos cabos de fixação foram conseguidos por ensaios preliminares numa piscina, ensaiados até a obtenção de tais localizações.

Um outro modo de fixação foi planejado com o objetivo de determinar diferenças de comportamento entre a fixação através dos cabos descritos acima e uma fixação diretamente junto ao casco. Deste modo, para o movimento longitudinal, foi também instalado um gancho (pitão) junto ao visor (na proa) bem como um outro junto a popa, conforme figuras A15 e A16, instalados definitivamente por furos e cola.

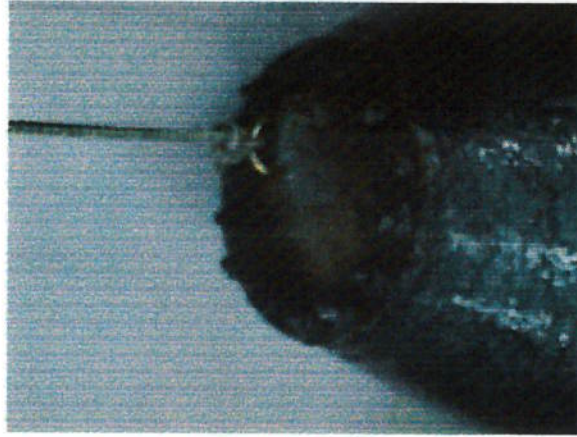


Fig. A15 - Foto de detalhe de ponto de fixação diretamente do casco.

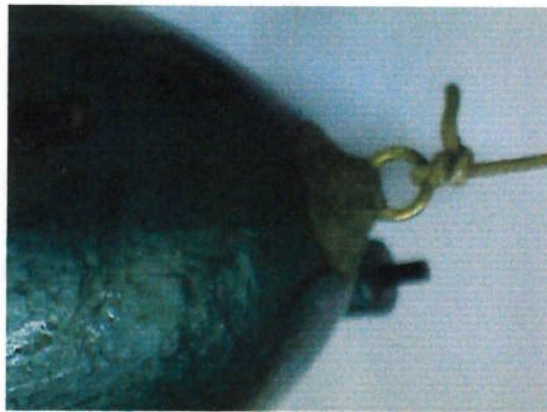


Fig. A16 - Foto de detalhe de ponto de fixação diretamente do casco.

Para o movimento vertical, não foram usados esses cabos tirantes, uma vez que na própria estrutura do modelo existem pontos de equivalência simétrica fixos, o que dispensa o uso dos cabos para esse fim.

Igualmente, para os ensaios de movimentos rotacionais, é dispensado o uso destes cabos, uma vez que a própria haste de fixação (Figura A3) garante a unidirecionalidade do objeto em teste, e a mesma é fixada diretamente na estrutura do modelo.

3.2 Montagem do Sistema

Foram programadas cinco situações de ensaio:

- a- Deslocamento longitudinal do modelo posicionado com tirantes;
- b- Deslocamento longitudinal do modelo posicionado diretamente do casco;
- c- Deslocamento transversal do modelo com tirantes e,
- d- Deslocamento vertical do modelo, diretamente do casco
- e- Deslocamento rotacional do modelo, diretamente do casco

A cada uma destas situações, houve necessidade de preparação específica, notadamente em relação à fixação do corpo de provas.

3.2.1 Descrição da Montagem

Os elementos de apoio descritos no item 2.2, foram firmemente fixados junto aos muros, em cada lado do tanque de provas, figura A1. Nestes elementos, nos furos mais próximos das extremidades submersas no tanque, foram acoplados tanto de um lado como do outro, os elementos elásticos descritos no item 2.3. Na outra extremidade do elemento elástico foi acoplado o elemento tirante descrito no item 2.5, com o corpo de prova inserido em seu intermédio.

Numa das extremidades, em série com o elemento elástico, foi acoplada a célula de carga descrita em 2.4, que em seus condutores elétricos foi acoplado todo o sistema computacional descrito no item 2.6. Nesta mesma extremidade, junto ao elemento tirante, um outro cordão de nylon de mesmas características foi afixado, e o mesmo teve a função de produzir o movimento inicial necessário ao ensaio.

Este cordão passa através de uma roldana plástica colocada nas proximidades do ponto de fixação do elemento elástico de maneira que quando acionado produza um deslocamento exatamente na mesma direção daquela promovida naturalmente pelos elementos elásticos.

Ressalta-se que este sistema para produzir o movimento inicial necessário resume-se em apenas estirar o elemento elástico em 7,5cm, conforme figura A17, deformação média do elemento elástico, região onde comporta-se com k constante.



Fig. A17 Detalhe do posicionamento para produção do movimento inicial

As figuras A18 e A19, apresentam esquematicamente toda montagem realizada para a obtenção dos dados requeridos, sendo que a primeira utilizada para movimentos de translação, e a segunda para movimentos de rotação.

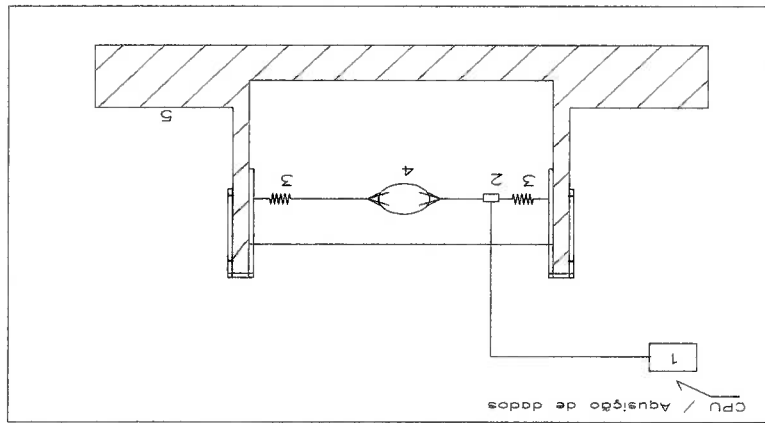


Fig. A18- Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos lineares.

(1) sistema eletrônico de aquisição de dados; (2) célula de cargas; (3) molas; (4) corpo em ensaio; (5) vista em corte do tanque de provas.

Fig. A19- Representação esquemática do experimento de obtenção de dados para os movimentos de rotação em torno do eixo Z. (1),(2),(3),(4) e (5) identificados na figura 11; (6) haste com junta móvel; (7) viga metálica disposta transversalmente ao tanque. As figuras A20, A21 e A22, na sequência, apresentam fotos do modelo preparado para ensaios de movimentos rotacionais em torno do eixo Z.

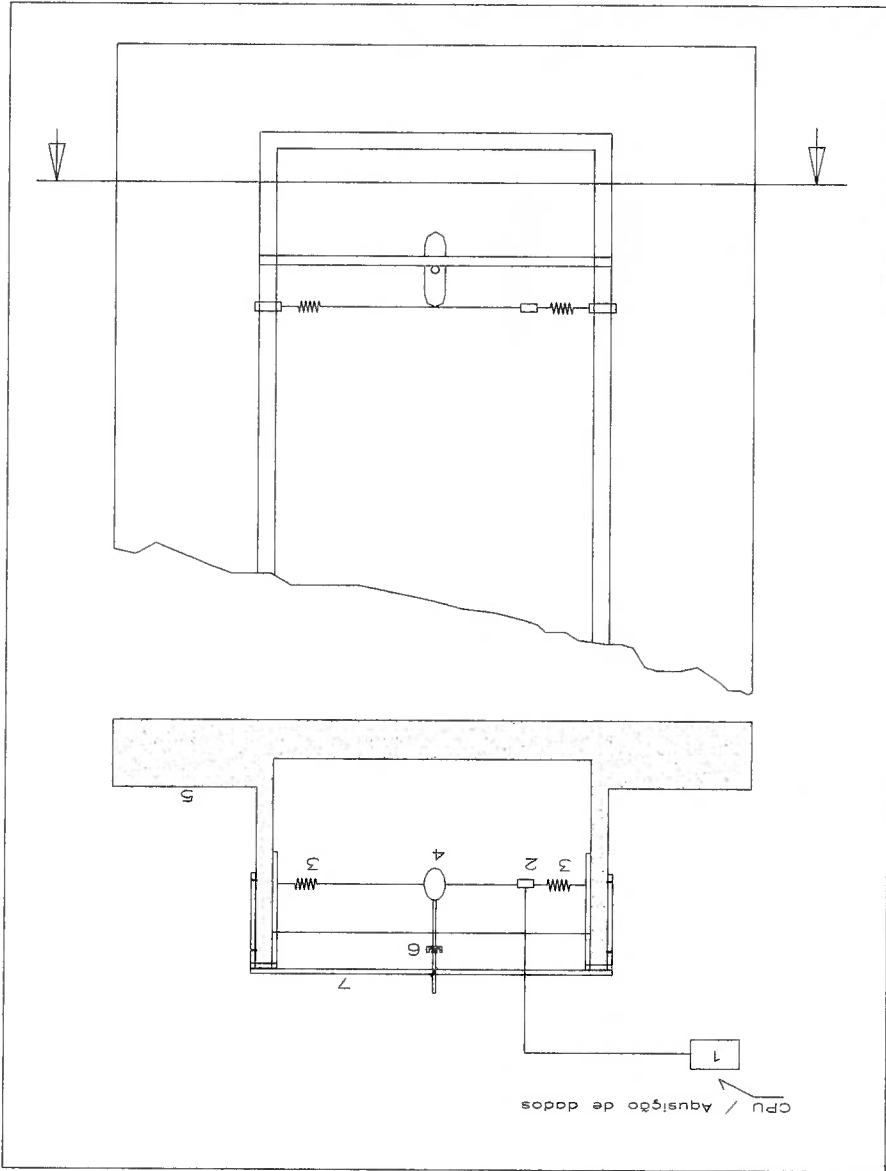




Fig. A20 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional



Fig. A21 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional



Fig. A22 - Foto de detalhe da fixação do modelo para ensaio rotacional

4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Primeiramente, após a preparação completa dos equipamentos, bem como do posicionamento do corpo de provas para o ensaio de deslocamento longitudinal da ordem de 0,942V ou 0,942kg foi provocada e observada junto ao extensiómetro. Para esta configuração foram realizados inicialmente três testes para a movimentação longitudinal, denominados: SOLT1, SOLT2 e SOLT3.

Em continuidade, após a realização dos três primeiros testes acima descritos, deliberou-se por ajustar o filtro antes regulado para 30Hz para agora 10Hz. Para esta nova configuração foram realizados os testes: SOLT4, SOLT5 e SOLT6, sendo estes então considerados perfeitos para utilização.

Na sequência, foi preparado o ensaio para o deslocamento longitudinal do modelo posicionado diretamente pelo casco, onde os tirantes de posicionamento foram retirados, de forma que a tração passou a ser feita diretamente do casco através dos ganchos metálicos, também chamados de Pítões, instalados tanto na proa como na popa do modelo, como visto nas Figuras A16 e A17.

Após a preparação completa dos equipamentos bem como do posicionamento do corpo de provas, em repouso observou-se uma pré-tensão da ordem de 0,846kg. Para esta configuração foram realizados os testes: SOLT1e SOLT2.

Deliberou-se na sequência por ajustar a pré-tensão para valores que se aproximassem aos valores utilizados nos testes anteriores (aproximadamente 0,940kg).

Diante disso os próximos ensaios SOLT3, SOLT4 e SOLT 5 foram realizados com uma pré-tensão de 0,938kg, sendo estes últimos então considerados

SOLP2, perfeitos para utilização, eliminado-se portanto os dados dos ensaios SOLP1 e

Ressalta-se que tanto os testes denominados SOLT como os denominados SOLP, referem-se a movimentação longitudinal, diferenciando-se apenas pela forma de fixação do modelo, um por tirantes (SOLT) como nas figuras A13 e A14 e outro por pitões (SOLP) fixados diretamente no casco do modelo, como nas figuras A15 e A16.

Tal diferenciação deve-se a verificação da possível interferência causada pelos tirantes, numa movimentação.

Na continuidade, o sistema foi preparado para ensaios de deslocamento transversal do modelo com tirantes. Após a preparação completa dos equipamentos bem como do posicionamento do corpo de provas, em repouso observou-se uma pré-tensão da ordem de 0,932kg.

Para esta configuração foram realizados os testes: SOTT1, SOTT2, SOTT3 e SOTT4, sendo que o primeiro deles, SOTT1, teve que ser eliminado por falha ocorrida na coleta de dados.

Na sequência, o sistema foi preparado para ensaios de deslocamento vertical do modelo, estritado diretamente pelo casco. Após a preparação completa dos equipamentos bem como do posicionamento do corpo de provas, que para este caso, dispensou o uso dos elementos de apoio descritos em 3.2.1. Contou-se com o apoio de um bloco de chumbo colocado no fundo do tanque e de uma ponte rolante onde foi suspenso o outro lado do elemento elástico. Após a preparação completa dos equipamentos, bem como do posicionamento do corpo de provas, observou-se uma pré-tensão, em repouso, da ordem de 0,944kg. Para esta configuração foram realizados os testes: SOV1, SOV2 e SOV3.

Por fim, o sistema foi preparado para os ensaios de deslocamentos rotacionais do modelo, posicionado diretamente do casco, pela haste de fixação com junta móvel (Figuras A20, A21 e A22). Após a preparação completa dos equipamentos bem como do posicionamento do corpo de provas em repouso, observou-se uma pré-tensão da ordem de 0,940kg. Para esta configuração foram realizados os testes: SORR6, SORR7 e SORR8.

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Na sequência, apresenta-se um quadro onde são demonstrados os vinte e um ensaios realizados, onde observa-se aqueles que foram eliminados e aqueles que puderam ser aproveitados.

| No. | Ensaio | Código | detalhe | Diagnóstico |
|-----|------------------------------------|--------|------------|-------------|
| 01 | Longitudinal estirado com tirantes | Solt1 | Desajustes | Eliminado |
| 02 | Longitudinal estirado com tirantes | Solt2 | Desajustes | Eliminado |
| 03 | Longitudinal estirado com tirantes | Solt3 | Desajustes | Eliminado |
| 04 | Longitudinal estirado com tirantes | Solt4 | Perfeito | OK |
| 05 | Longitudinal estirado com tirantes | Solt5 | Perfeito | OK |
| 06 | Longitudinal estirado com tirantes | Solt6 | Perfeito | OK |
| 07 | Longitudinal estirado com piteões | Solp1 | Desajustes | Eliminado |
| 08 | Longitudinal estirado com piteões | Solp2 | Desajustes | Eliminado |
| 09 | Longitudinal estirado com piteões | Solp3 | Perfeito | OK |
| 10 | Longitudinal estirado com piteões | Solp4 | Perfeito | OK |
| 11 | Longitudinal estirado com piteões | Solp5 | Perfeito | OK |
| 12 | Transversal estirado com tirantes | Solt1 | Desajustes | Eliminado |
| 13 | Transversal estirado com tirantes | Solt2 | Perfeito | OK |
| 14 | Transversal estirado com tirantes | Solt3 | Perfeito | OK |
| 15 | Transversal estirado com tirantes | Solt4 | Perfeito | OK |
| 16 | Vertical estirado com tirantes | Sov1 | Perfeito | OK |
| 17 | Vertical estirado com tirantes | Sov2 | Perfeito | OK |
| 18 | Vertical estirado com tirantes | Sov3 | Perfeito | OK |
| 19 | Rotacional posicionado diretamente | Sorr6 | Perfeito | OK |
| 20 | Rotacional posicionado diretamente | Sorr7 | Perfeito | OK |
| 21 | Rotacional posicionado diretamente | Sorr8 | Perfeito | OK |

Figura 8 - Quadro dos Ensaio Realizados

Na continuidade, apresentamos o resultado gráfico de cada um dos ensaios, sobrepondo-se aqueles que são do mesmo tipo de movimento. Primeiramente os

"longitudinais com tirantes", depois os "longitudinais com pitões", depois os "transversais com tirantes" depois os "verticais" e por fim os "rotacionais".

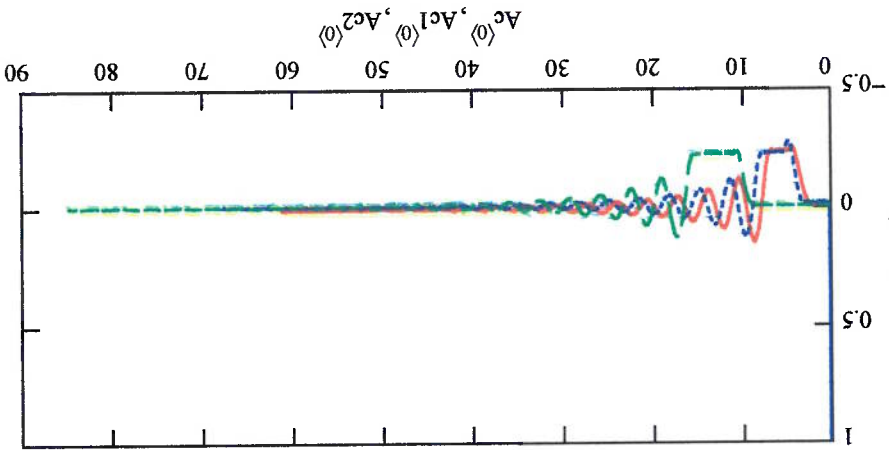
```

Ac :=
C:\Solta.dat
Ac1 :=
C:\Solta.dat
Ac2 :=
C:\Solta.dat
    
```

comprimento do vetor

```

B := length(Ac<0>)
B1 := length(Ac1<0>)
B2 := length(Ac2<0>)
B = 3.915 × 103
B1 = 4.36 × 103
B2 = 5.425 × 103
    
```



Exclusão dos pontos iniciais

```

Np := 488
j := Np..B - 1
    
```

$$t_{j-Np} := (Ac<0>)_j - (Ac<0>)_{Np}$$

$$F_{j-Np} := (Ac<1>)_j$$

Até j=Np representa o instante inicial

```

Np1 := 552
j1 := Np1..B1 - 1
Np2 := 1036
j2 := Np2..B2 - 1
    
```

$$t_{j1-Np1} := (Ac1<0>)_j1 - (Ac1<0>)_{Np1}$$

$$F1_{j1-Np1} := (Ac1<1>)_j1$$

$$F2_{j2-Np2} := (Ac2<1>)_j2$$

```

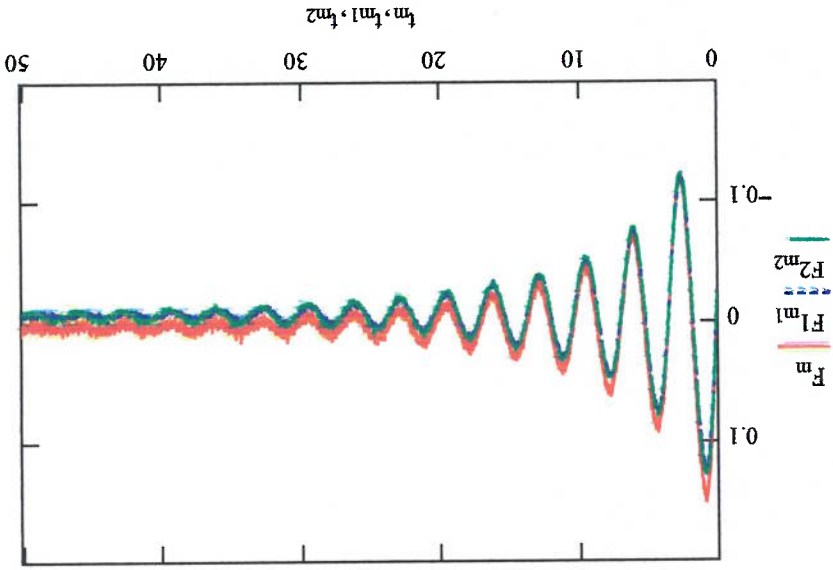
m2 := 0..B2 - Np2
    
```

```

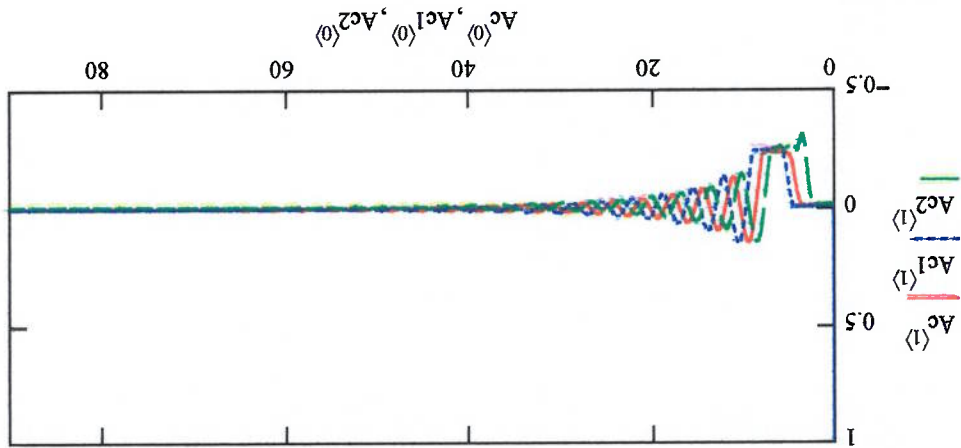
m1 := 0..B1 - Np1
    
```

```

m := 0..B - Np
    
```



Ac := C:\Solp3a.dat
 Ac1 := C:\Solp4a.dat
 Ac2 := C:\Solp5a.dat



comprimento do vetor

$$B := \text{length}(Ac^{(0)})$$

$$B = 6.483 \times 10^3$$

Exclusão dos pontos iniciais

$$Np := 549$$

$$j := Np..B - 1$$

$$t_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$$

$$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j$$

$$Np1 := 617$$

$$j1 := Np1..B1 - 1$$

$$t1_{j1-Np1} := (Ac1^{(0)})_{j1} - (Ac1^{(0)})_{Np1}$$

$$F1_{j1-Np1} := (Ac1^{(1)})_{j1}$$

$$m1 := 0..B1 - Np1$$

$$m2 := 0..B2 - Np2$$

$$B1 := \text{length}(Ac1^{(0)})$$

$$B1 = 5.765 \times 10^3$$

$$B2 = 5.76 \times 10^3$$

$$B2 := \text{length}(Ac2^{(0)})$$

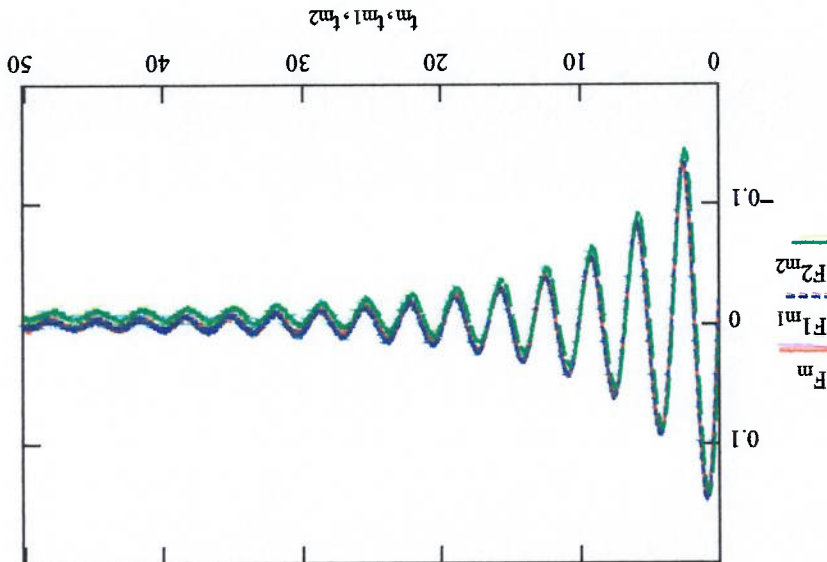
Até j=Np representa o instante inicial

$$Np2 := 492$$

$$j2 := Np2..B2 - 1$$

$$t2_{j2-Np2} := (Ac2^{(0)})_{j2} - (Ac2^{(0)})_{Np2}$$

$$F2_{j2-Np2} := (Ac2^{(1)})_{j2}$$

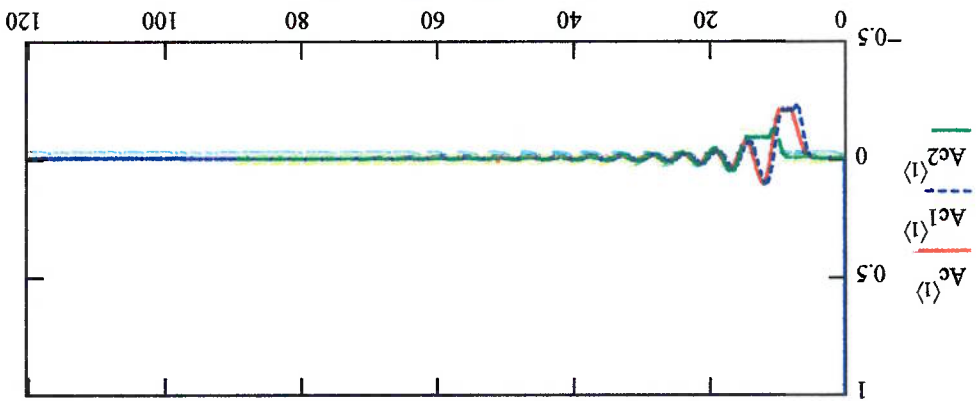


Ac := C:\Sotta.dat
 Ac1 := C:\Sotta3a.dat
 Ac2 := C:\Sotta4a.dat

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>) B1 := length(Ac1<0>) B2 := length(Ac2<0>)

B = 4.512 × 10³ B1 = 7.685 × 10³ B2 = 5.715 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais

Np1 := 705

j := Np1..B - 1

$$F_{j-Np1}^{j-1} := (Ac^{(0)})^j - (Ac^{(0)})^{Np1}$$

$$F_{j-Np1}^{j-1} := (Ac^{(1)})^j$$

m := 0..B - Np

m1 := 0..B1 - Np1

m2 := 0..B2 - Np2

$$F_{j1-Np1}^{j1-1} := (Ac1^{(0)})^{j1} - (Ac1^{(0)})^{Np1}$$

$$F_{j1-Np1}^{j1-1} := (Ac1^{(1)})^{j1}$$

$$F_{j2-Np2}^{j2-1} := (Ac2^{(1)})^{j2}$$

j2 := Np2..B2 - 1

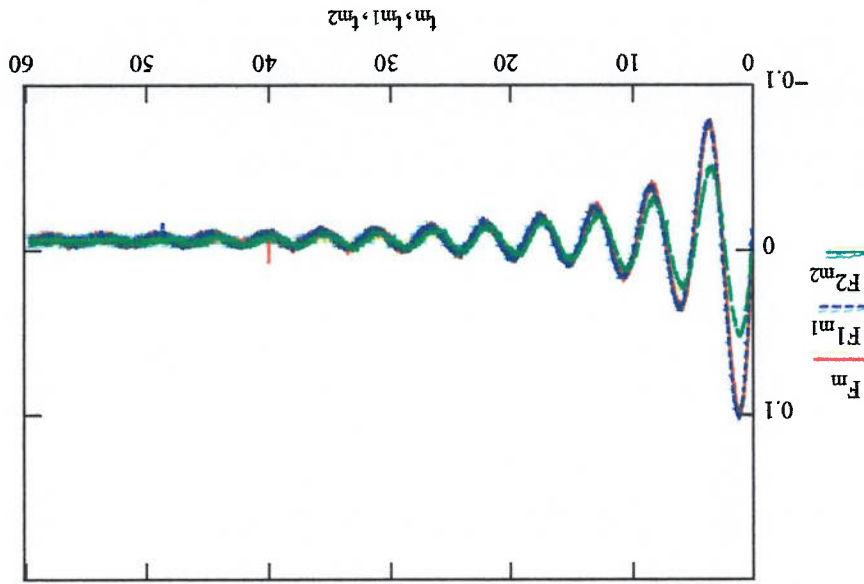
j1 := Np1..B1 - 1

Np2 := 1004

Np1 := 676

Até j=Np representa o instante inicial

Ac<0>, Ac1<0>, Ac2<0>



C:\Sov3a.dat

Ac2 :=

B2 := length(Ac2(0))

B2 = 7.685 × 10³

C:\Sov2a.dat

Ac1 :=

B1 := length(Ac1(0))

B1 = 7.685 × 10³

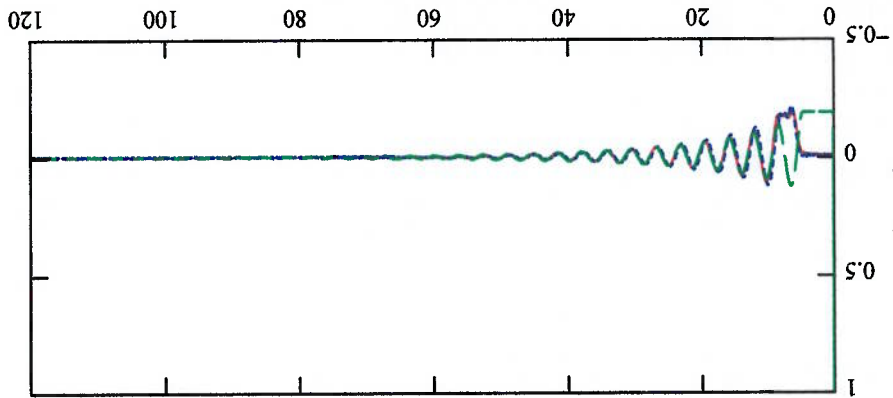
C:\Sov1a.dat

Ac :=

B := length(Ac(0))

B = 4.837 × 10³

comprimento do vetor



Exclusão dos pontos iniciais

Np := 588

j := Np..B - 1

t_{j-Np} := (Ac(0))_j - (Ac(0))_{Np}

F_{j-Np} := (Ac(1))_j

j1 := Np1..B1 - 1

t_{j1-Np1} := (Ac1(0))_{j1} - (Ac1(0))_{Np1}

F_{j1-Np1} := (Ac1(1))_{j1}

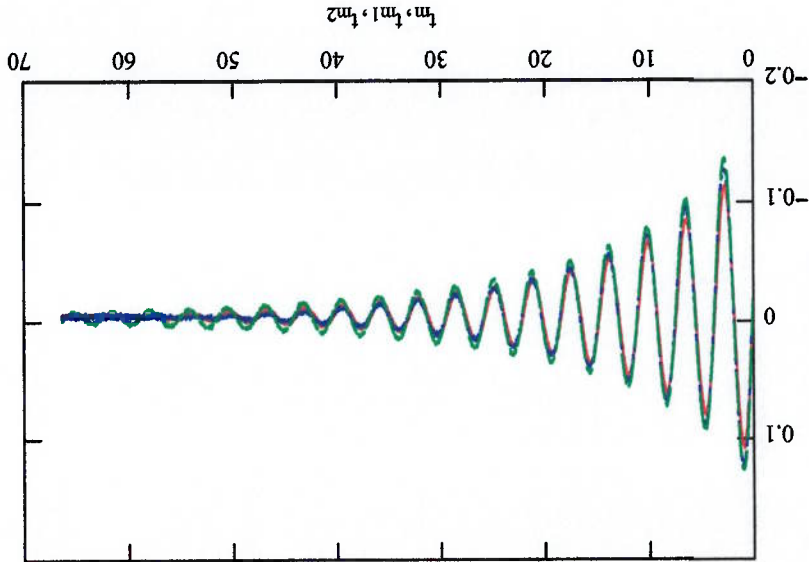
m1 := 0..B1 - Np1

m2 := 0..B2 - Np2

j2 := Np2..B2 - 1

t_{j2-Np2} := (Ac2(0))_{j2} - (Ac2(0))_{Np2}

F_{j2-Np2} := (Ac2(1))_{j2}

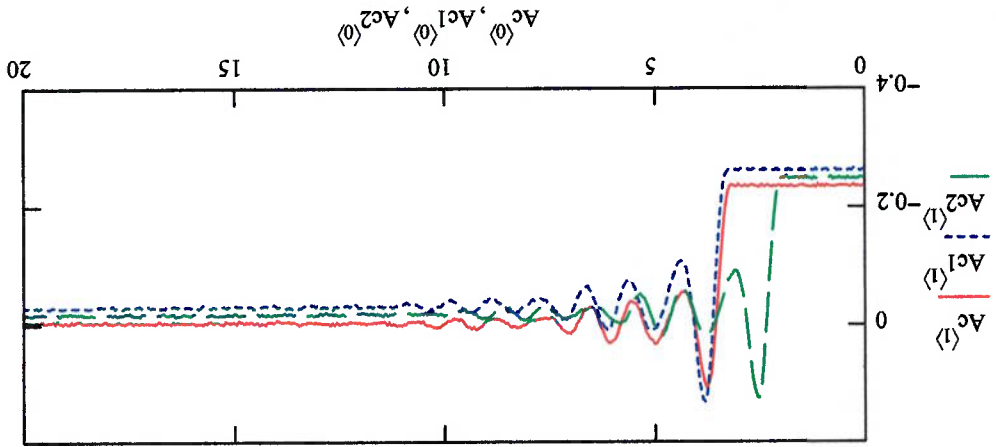


Ac := C:\SORR06.txt
 Ac1 := C:\SORR07.txt
 Ac2 := C:\SORR08.txt

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>)
 B1 := length(Ac1<0>)
 B2 := length(Ac2<0>)

B = 1.2 × 10³
 B1 = 1.2 × 10³
 B2 = 1.2 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais

Np := 72

Np1 := 73

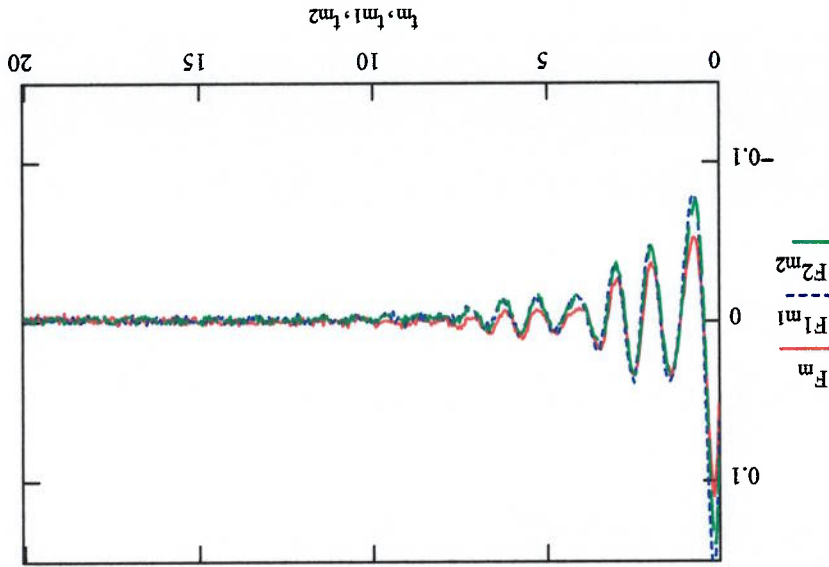
Até j=Np representa o instante inicial

j := Np..B - 1
 j1 := Np1..B1 - 1
 j2 := Np2..B2 - 1

$t_{j-Np} := (Ac<0>)_j - (Ac<0>)_Np$
 $t_{j1-Np1} := (Ac1<0>)_j - (Ac1<0>)_Np1$
 $t_{j2-Np2} := (Ac2<0>)_j - (Ac2<0>)_Np2$

$F_{j-Np} := (Ac<1>)_j + 0.0010833 F1_{j1-Np1} + 0.026278 F2_{j2-Np2} := (Ac2<1>)_j + 0.013699$

m := 0..B - Np
 m1 := 0..B1 - Np1
 m2 := 0..B2 - Np2



Como se observa nos resultados apresentados anteriormente, referentes a movimentação longitudinal com fixação e posicionamento do modelo por tirantes, SOLT4, SOLT5 e SOLT6, o primeiro dos gráficos apresenta os resultados puros e sobrepostos, na sequência, é realizada a exclusão dos dados iniciais e desnecessários, pois representam instantes anteriores ao início propriamente dito dos testes, o próximo gráfico então apresenta a sobreposição dos três ensaios.

Pela análise, podemos confirmar a consistência destes três ensaios, onde apesar de alguma diferença de amplitude entre os sinais, observa-se um bom comportamento referente a frequência.

A diferença de amplitude se explica pela forma pouco uniforme em se dar início a cada ensaio. O objetivo era estirar 7,5cm, mas isso de forma manual, e imprecisões certamente ocorreram e provocaram esta diferenciação.

Em função da similaridade dos resultados, por simples opção escolheu-se o ensaio SOLT6 para ser utilizado como referência.

Igualmente para a movimentação longitudinal, porém com fixação através de pites diretamente do casco, SOLT3, SOLT4 e SOLT5, pelos resultados gráficos também pode-se observar, após a devida eliminação dos dados iniciais desnecessários, que os dados dos três ensaios se sobrepõem muito bem, embora igualmente com alguma diferença referente a amplitude, pelos motivos anteriormente expostos.

Os dados foram considerados plenamente consistentes, e em função da similaridade dos resultados, optou-se em escolher o ensaio SOLT5 para ser utilizado como referência.

Para a movimentação transversal, ensaios SOTT2, SOTT3 e SOTT4, igualmente após a eliminação dos resultados iniciais desnecessários, observa-se a sobreposição dos resultados e também agora a diferença de amplitude, os dados, são os três perfeitamente consistentes e semelhantes onde optou-se pela utilização do SOTT2 como referência.

Observa-se ainda que a frequência de movimentação neste tipo de ensaio é menor que nos demais tipos de movimentação. Fato este explicado pela maior área frontal do modelo para movimentações transversais.

Para a movimentação no sentido vertical, ensaios SOV1, SOV2 e SOV3, também após a eliminação dos resultados iniciais desnecessários, e observada a sobreposição dos três ensaios, pode-se também observar que os dados são plenamente consistentes e semelhantes. Optou-se por usar o SOV3 como experimento padrão para movimentação vertical.

Por fim, para a movimentação rotacional, ensaios SORR6, SORR7 e SORR8, da mesma maneira, após a eliminação dos dados iniciais desnecessários, e feita a sobreposição dos três ensaios, pode-se também observar que os dados destes três ensaios são semelhantes e consistente. Optou-se pelo uso do SORR7 como experimento referencial do movimento rotacional.

Pode-se concluir que a forma de realização dos ensaios cumpriu plenamente aos objetivos, pois de maneira simples e sem grandes investimentos pode-se obter os dados requeridos do comportamento hidrodinâmico do modelo em teste.

Também, é possível concluir que os resultados foram considerados plenamente consistentes e confiáveis.

Como recomendação para uma nova edição deste tipo de ensaio, sugere-se que o sistema para produzir o movimento inicial necessário a cada ensaio, seja feito de forma que dependa da pericia manual e sim de um dispositivo que estire de forma padrão, eliminando assim a diferença de amplitude observada nestes ensaios.

Uma outra conclusão importante é que, na movimentação longitudinal, onde foram utilizadas duas formas diferentes de fixação do modelo, os resultados foram bastante semelhantes, de maneira que fixar por tirantes, muito pouca influência causou nos resultados

7 CONCLUSÕES

RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO PARA OBTENÇÃO DO MOMENTO DE
INÉRCIA DO MODELO EM ESCALA REDUZIDA DO SUBMERSÍVEL VSNT-JAU

APÊNDICE II

SUMÁRIO

| | | |
|----|------------------------------------|-----|
| 01 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 01 | PRINCÍPIO TEÓRICO | 2 |
| 02 | MATERIAIS E MÉTODO | 3 |
| 02 | O corpo de ensaio | 3.1 |
| 02 | O fio suspenso | 3.2 |
| 03 | O método de ensaio | 3.3 |
| 04 | DETERMINAÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA | 4 |
| 05 | CONCLUSÃO | 5 |
| 06 | BIBLIOGRAFIA | 6 |

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta o ensaio realizado com o modelo reduzido do submersível VSNT Jau I, para a obtenção do seu momento de inércia. O corpo de ensaio utilizado, trata-se de um modelo em escala 1:25 do submersível original, desenvolvido e construído pela Faculdade de Tecnologia de Jahu, objeto desta dissertação de mestrado.

O ensaio foi preparado para que, ao ar livre, o modelo suspenso por um fio de características conhecidas, desenvolva movimento oscilatório em torno do seu próprio eixo. Medindo-se o período desta oscilação pode-se determinar o seu momento de inércia.

2 PRINCÍPIO TEÓRICO

Num fio suspenso é atado na sua outra extremidade um corpo. Oscilando-se esse corpo em torno do seu eixo, pode-se dizer que o momento de inércia será:

$$I = D \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad \text{(II-1)}$$

onde: I é o momento de inércia ($kg.m^2$);

D é módulo de torção do fio (kgf/mm^2);

T é o período de oscilação (s).

O módulo de torção do fio, pode ser calculado sabendo-se das características físicas e geométricas do material utilizado. A expressão para a obtenção do módulo de torção do fio é:

$$D = \frac{\pi G r^4}{2l} \quad , \quad \text{(II-2)}$$

onde G é o módulo de rigidez do fio (kgf / mm^2);

r é o raio do fio (m);

l é o comprimento do fio (m).

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 O corpo de ensaio

O corpo de ensaio possui uma geometria um tanto complexa, contudo, suas características principais são:

Comprimento total: 0,52m

Largura total: 0,16m

Altura total: 0,54m

As figuras de 1 a 7 do Capítulo I da dissertação ajudam a elucidar as questões ligadas à geometria do modelo.

3.2 O fio de suspensão

O material utilizado como fio de suspensão no referido ensaio foi o aço 1020 e possui as seguintes características principais:

l = comprimento 1,525m

r = raio 0,00063m

e, de acordo com Van Vlack (1970), o módulo de elasticidade deste fio é de $E = 21 \times 10^3 \text{ kgf} / \text{mm}^2$ a 20°C , onde o módulo de rigidez é dado por:

onde ν é o chamado coeficiente de Poisson e, que tal coeficiente está normalmente na faixa de 0,25 a 0,50. Assim G pode variar entre $7.10^3 \text{Kg}f / \text{mm}^2$ e $8,4.10^3 \text{Kg}f / \text{mm}^2$.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

(II-3)

3.3 O método de ensaio

O modelo foi suspenso pelo fio de aço de características conhecidas, e colocando o modelo a oscilar em torno do próprio eixo e, com o auxílio de um cronômetro, mediu-se período de oscilação.

Originalmente o modelo possui dois compartimentos alagáveis (torreta e bolina), que para melhor representá-lo, tais compartimentos foram mantidos completamente alagados para o ensaio.

A figura a seguir apresenta o esquema utilizado no ensaio.



Fig. A24 - Representação esquemática do ensaio para obtenção do momento de inércia do modelo do VSNT Jati I.

Após diversos ensaios, chegou-se ao período de oscilação de 19,36 segundos.

4 DETERMINAÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA

O momento de inércia pode ser obtido pela aplicação direta da seguinte expressão:

$$I = D \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad \text{(II-4)}$$

onde

$$D = \frac{\pi G r^4}{2l} \quad \text{(II-5)}$$

e, como G pode variar entre 7.10^3 kgf/mm^2 e $8.4.10^3 \text{ kgf/mm}^2$, o momento de inércia I pode estar entre:

$$I = 0,106 \text{ kg.m}^2 \text{ e } 0,127 \text{ kg.m}^2$$

Uma outra maneira de se conseguir o momento de inércia é pelo ensaio de um corpo de formato simples. Para um corpo cilíndrico maciço a equação será:

$$I = \frac{m \cdot r^2}{4} + \frac{m \cdot l^2}{12} \quad \text{(II-6)}$$

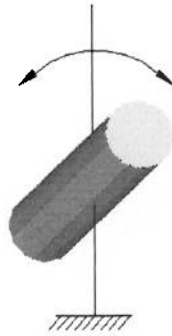


Fig. A25 - Figura de um corpo sólido suspenso por um fio

Dimensões principais do modelo:

Comprimento = 0,5m;

Raio = 0,00545m;

Massa = 0,7785g.

Aplicando-se a equação (II-6) acima, obtêm-se o momento de inércia do corpo de 0,016kg.m².

Igualmente ao realizado no item 3.3 deste relatório, onde o modelo foi suspenso e colocado a oscilar, medindo o período de oscilação, também colocou-se esse corpo cilíndrico a oscilar e, após diversos ensaios, observou-se que o período de oscilação é de 7,43 segundos.

Pode-se relacionar os coeficientes como:

$$(II-7) \quad \frac{I_{submersivel}}{T_2^{submersivel}} = \frac{I_{cilindro}}{T_2^{cilindro}}$$

$$(II-8) \quad \frac{I_{submersivel}}{19,36s^2} = \frac{0,016kg.m^2}{7,43s^2}$$

$$(II-9) \quad I_{submersivel} = 0,109kg.m^2$$

5 CONCLUSÃO

O valor de momento de inércia de 0,109kg.m² pode ser considerado consistente, uma vez que também pelo primeiro método analisado, o referido valor está dentro da faixa de valores possíveis.

6 BIBLIOGRAFIA

- VAN VLACK, L.H. 1950 **Princípios de Ciência dos Materiais**. (Tradução: Ferrão L.P.C.) São Paulo, Edgard Blucher p.135-140. 1970.
- HALLIDAY, D. et al **Física 1. 4ª Edição**. Rio de Janeiro, LTC, p.234. 1997.

DADOS DA ANÁLISE DE MASSA ADICIONAL E DO AMORTECIMENTO
USANDO A APROXIMAÇÃO LINEAR.

APÊNDICE III

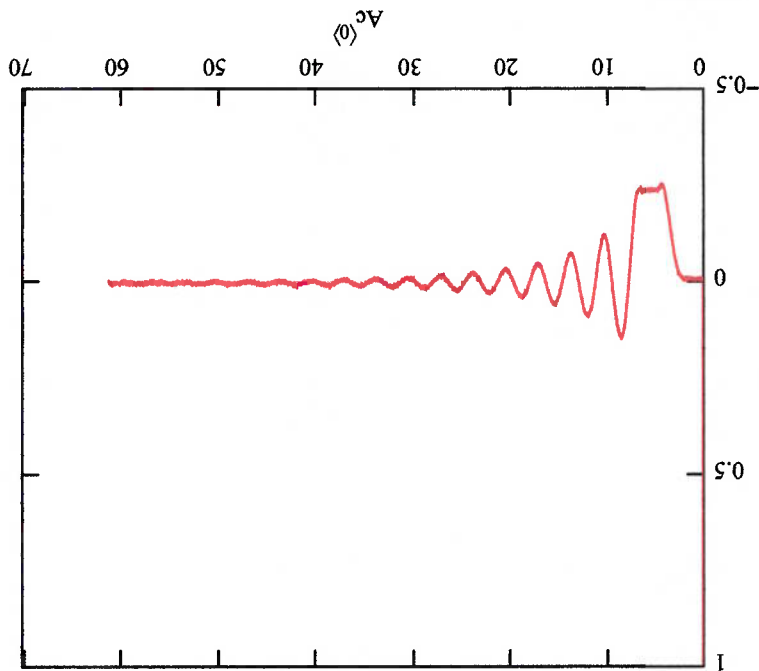
SUMÁRIO

| | |
|----|--|
| 01 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT4 |
| 04 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT5 |
| 07 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT6 |
| 10 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação vertical para o ensaio SOV1 |
| 13 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação vertical para o ensaio SOV2 |
| 16 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação vertical para o ensaio SOV3 |
| 19 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação transversal para o ensaio SOTT1 |
| 22 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação transversal para o ensaio SOTT2 |
| 25 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação transversal para o ensaio SOTT3 |
| 28 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR6 |
| 31 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR7 |
| 34 | Análise de massa adicional e do amortecimento usando a aproximação linear para a movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR8 |

Análise da massa adicional usando a aproximação linear
 Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrado com pites (Solit)

```
Ac :=
    C:\Solita.dat
    (solit.in)
```

comprimento do vetor $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 3.92 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até $j=436$ representa o instante inicial

$Np := 436$

$j := Np..B - 1$

$$F_{j-Np} := Ac^{(0)}(j) - Ac^{(1)}(Np)$$

$$F_{j-Np} := Ac^{(1)}(j) - 0.005$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.23$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \quad \text{N/m}$$

$$k = 32.56 \quad \text{N/m}$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \quad \text{m}$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t1 := 1.6719$$

$$t2 := 5.0934$$

$$x1 := 0.15469$$

$$x2 := 0.096094$$

$$T := t2 - t1$$

$$T = 3.42$$

$$r := \frac{x1}{x2}$$

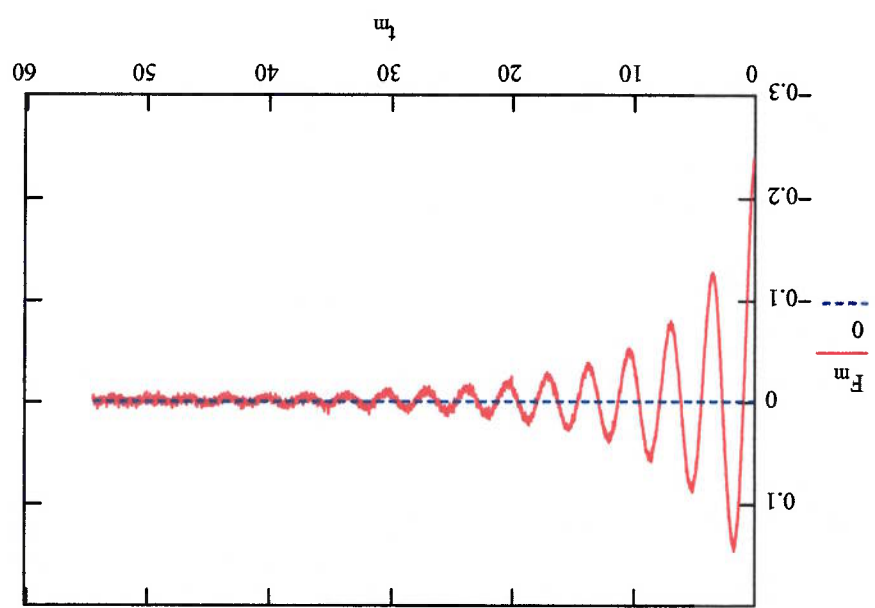
$$r = 0.62$$

$$\zeta := \frac{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}{1}$$

$$\zeta = 0.08$$

$$\alpha := \text{atan} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right)$$

$$\alpha = 1.5$$

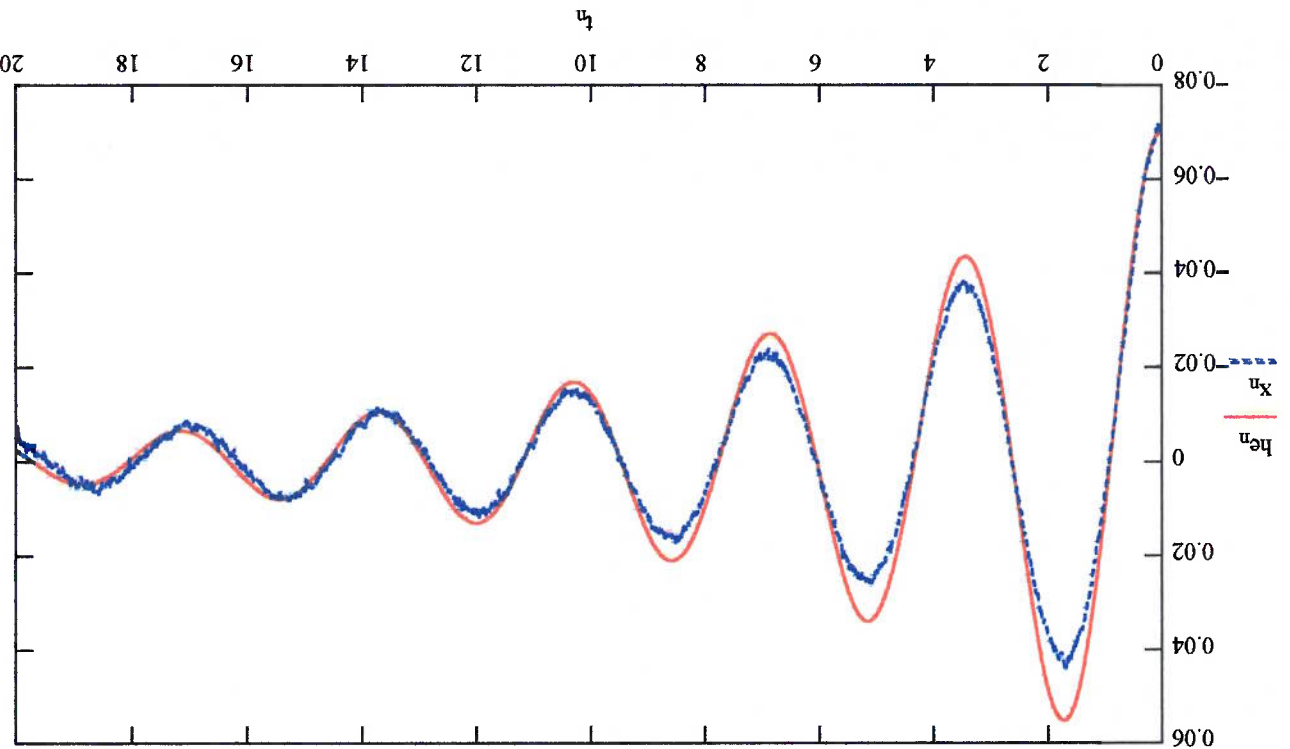


A0 := -0.23752
 A1 := -0.12414
 A2 := -0.074648

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \omega_n = 1.84 \text{ rad}$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \omega_d = 1.84 \text{ rad}$$

$$h e_n := \frac{x_0}{\zeta} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := \frac{2k}{\omega_n^2} \quad Mg = 19.2 \text{ kg}$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot Mg$$

$$c := cc \cdot \zeta \quad c = 5.34$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.28$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \text{ kg}$$

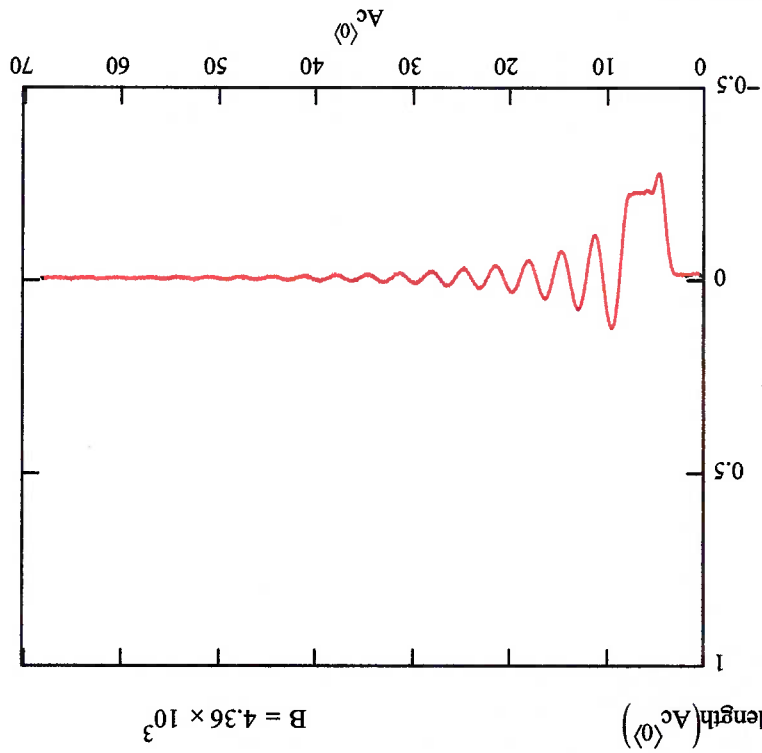
$$MAD11 := Mg - m$$

$$MAD11 = 8.7 \text{ kg}$$

$$MAD11 \div m \cdot 100 = 82.75 \%$$

Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrado com pitões (Sol)

```
Ac :=
C:\Sol5a.dat
comprimento do vetor
B := length(Ac)
B = 4.36 x 10^3
(sol5lin)
```



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=498 representa o instante inicial

Np := 498

j := Np..B - 1

$$F_{j-Np} := (Ac_{(j)}) - (Ac_{(Np)})$$

$$F_{j-Np} := (Ac_{(j)}) + 0.0042969$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

m := 0..B - Np

F₀ = -0.22

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \quad \text{N/m}$$

$$k = 30.24$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$F_n := F \cdot 9.8$$

$$x_n := \frac{x}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial $x_0 = -0.07$ n

Velocidade inicial $v_0 = 0$

t1 := 1.8437 t2 := 5.2656

x1 := 0.12735 x2 := 0.080078

T := t2 - t1 T = 3.42

$$r := \frac{x_2}{x_1}$$

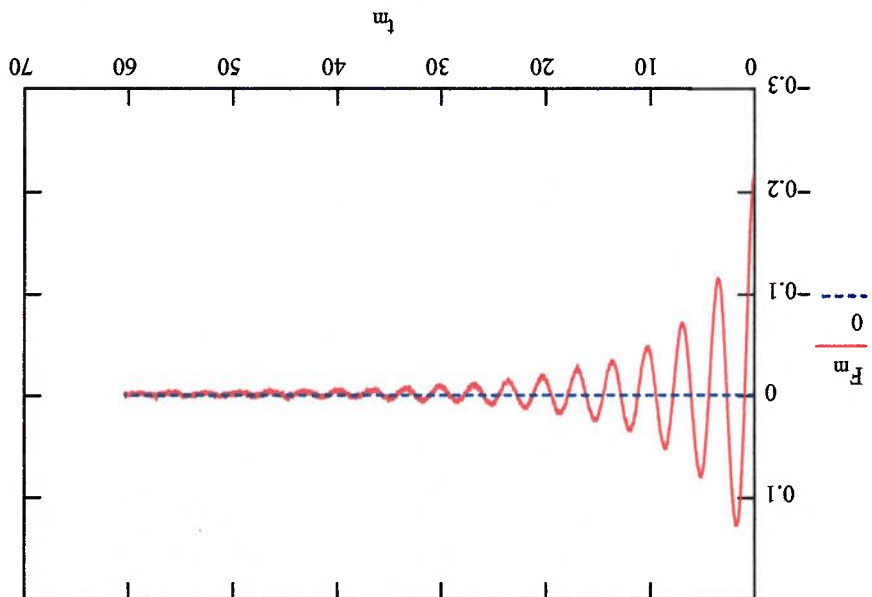
$$r = 0.63$$

$$\zeta := \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}$$

$$\zeta = 0.07$$

$$\alpha := \text{atan} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right)$$

$$\alpha = 1.5$$



$$A2 := -0.069531$$

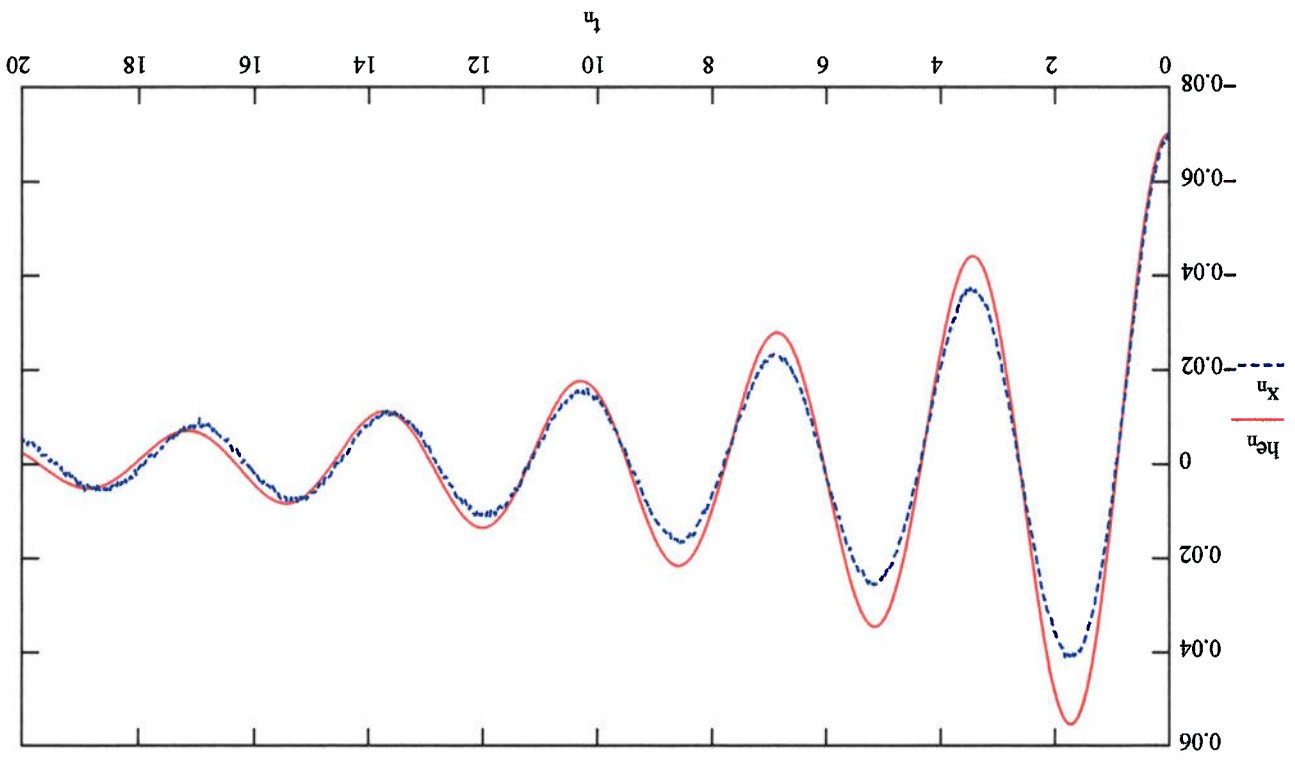
$$A1 := -0.11328$$

$$A0 := -0.21601$$

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \omega_n = 1.84 \text{ rad}$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \omega_d = 1.84 \text{ rad}$$

$$h e_n := \frac{x_0}{\zeta} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := \frac{2k}{\omega_n^2} \quad Mg = 17.84 \text{ kg}$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot Mg$$

$$c := cc \cdot \zeta \quad c = 4.84$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.27$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \text{ kg}$$

$$MAD11 := Mg - m$$

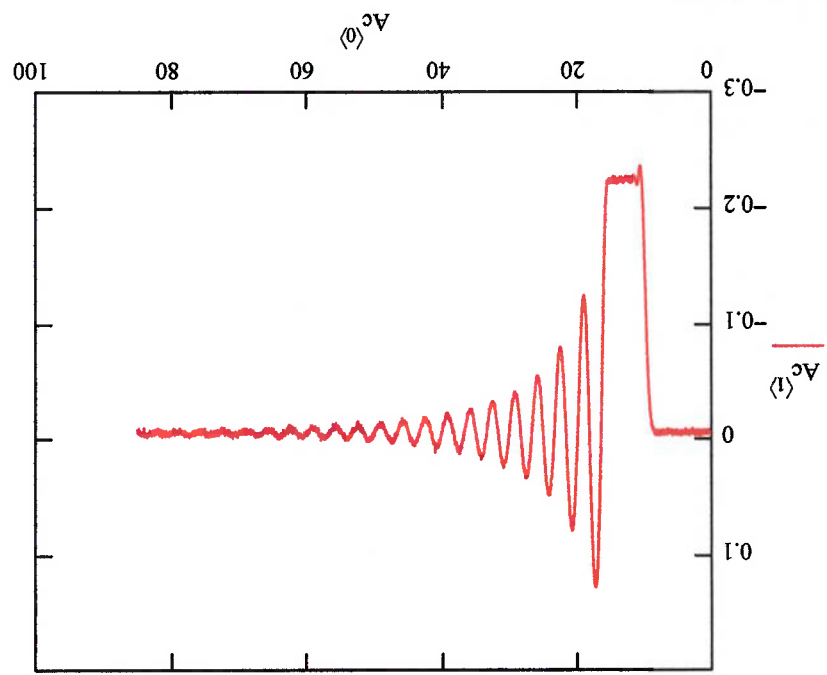
$$MAD11 = 7.3 \text{ kg}$$

$$MAD11 \div m \cdot 100 = 69.8 \%$$

Análise da massa adicional usando a aproximação linear
 Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrado com pites (Sol)

```
Ac :=
C:\Sol\Sol6a.dat
(soltlin)
```

comprimento do vetor $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 5.42 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=978 representa o instante inicial

```
Np := 978
```

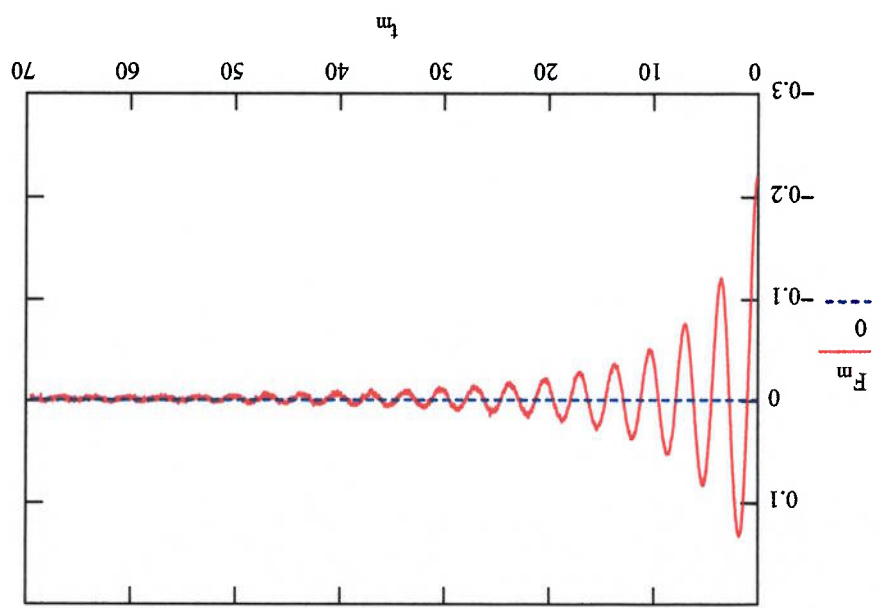
```
j := Np..B - 1
```

```
tj-Np := (Ac<sup>(0)</sup>)j - (Ac<sup>(0)</sup>)Np
Fj-Np := (Ac<sup>(l)</sup>)j + 0.0042969
```

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

```
m := 0..B - Np
F0 = -0.22
```

A0 := -0.21565
 A1 := -0.11845
 A2 := -0.072266



Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{L} \quad \text{N/m}$$

k = 30.63

$$n := 0 \dots B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial $x_0 = -0.07$ n

Velocidade inicial $v_0 = 0$

t1 := 1.719
 t2 := 5.187
 x1 := 0.13282
 x2 := 0.083594

T := t2 - t1
 T = 3.47

$$r := \frac{x2}{x1}$$

r = 0.63

$$\zeta := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}}$$

$\zeta = 0.07$

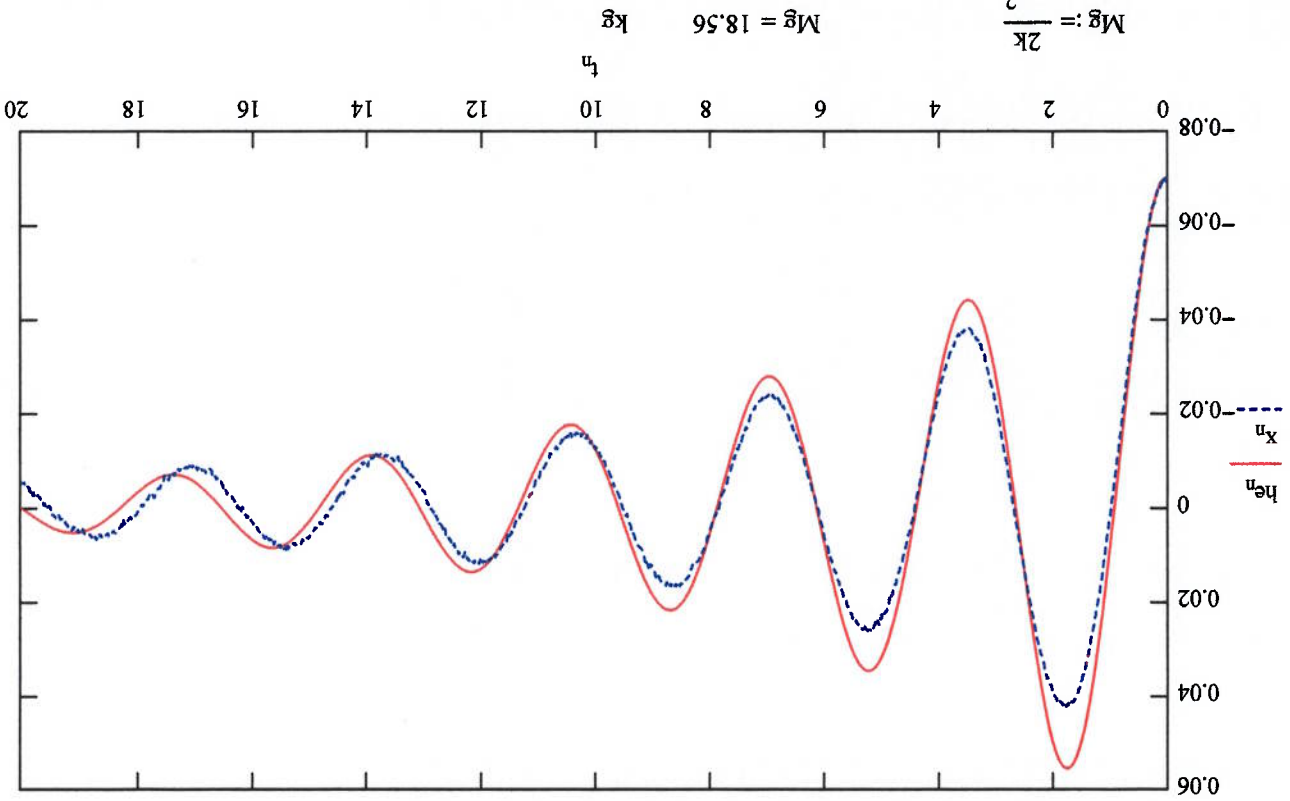
$$\alpha := \arctan\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right)$$

$\alpha = 1.5$

$$w_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad w_n = 1.82$$

$$w_d := w_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad w_d = 1.81$$

$$h_{e_n} := \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \exp(-\zeta \cdot w_n \cdot t_n) \cdot \sin(w_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := \frac{2k}{w_n^2} \quad \text{kg} \quad Mg = 18.56$$

$$cc := 2 \cdot w_n \cdot Mg$$

$$c := cc \cdot \zeta \quad c = 4.96$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.27$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \text{ kg}$$

$$MAD11 := Mg - m$$

$$MAD11 = 8.1 \text{ kg}$$

$$MAD11 \div m \cdot 100 = 76.7 \%$$

Análise da massa adicional usando a aproximação linear
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrado com pitões (Sov1)

(sov1im)

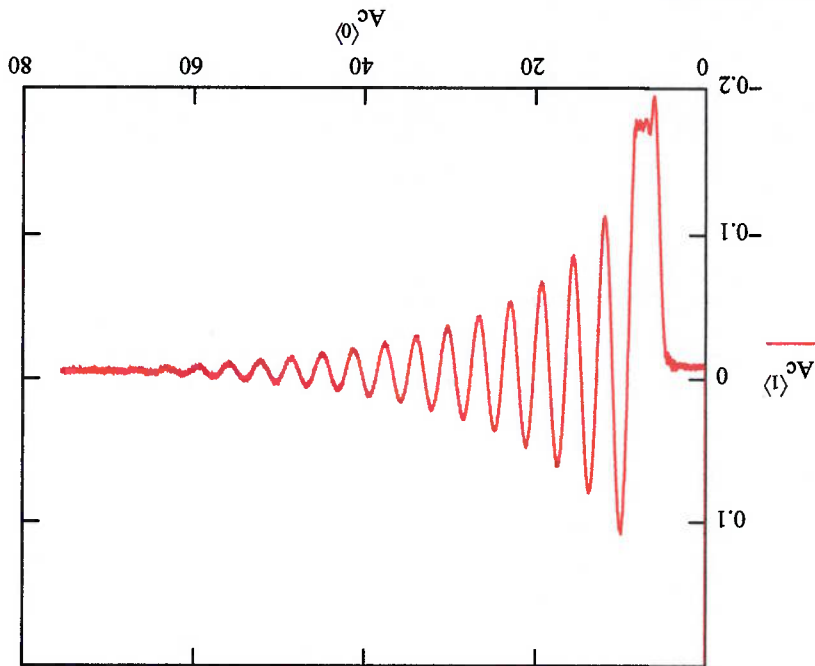
C:\Sov1a.dat

Ac :=

comprimento do vetor

$B = \text{length}(Ac^{(j)})$

$B = 4.84 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=520 representa o instante inicial

$Np := 520$

$j := Np..B - 1$

$t_{j-Np} := Ac^{(j)} - Ac^{(Np)}$

$F_{j-Np} := Ac^{(j)} + 0.003$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.17$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \quad \text{N/m}$$

$$k = 23.7$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$F_n := 9.8$$

$$x_n := \frac{k}{F_n}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \text{ m}$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t1 := 1.9253$$

$$t2 := 5.6305$$

$$x1 := 0.11075$$

$$x2 := 0.083187$$

$$T := t2 - t1$$

$$T = 3.71$$

$$r := \frac{x1}{x2}$$

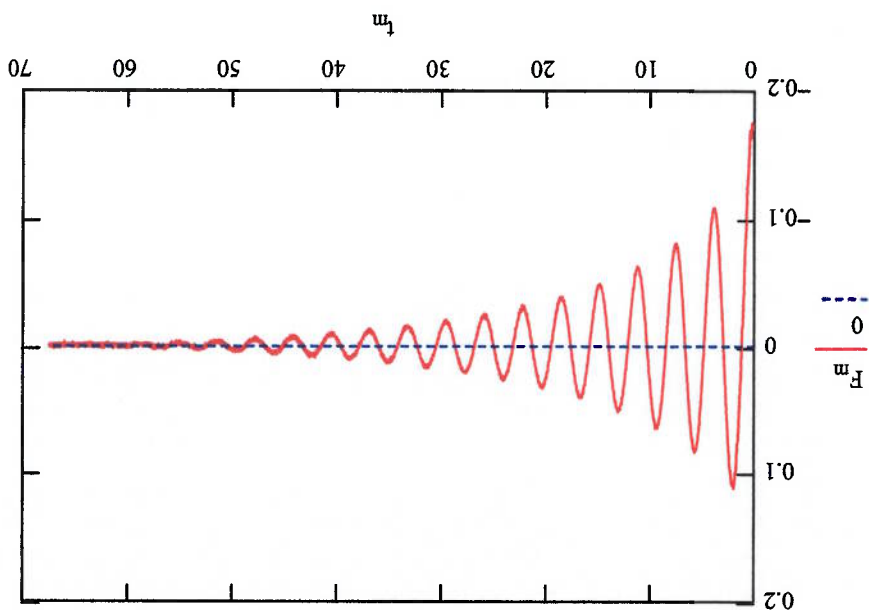
$$r = 0.75$$

$$\zeta := \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}$$

$$\zeta = 0.05$$

$$\alpha := \arctan\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right)$$

$$\alpha = 1.53$$

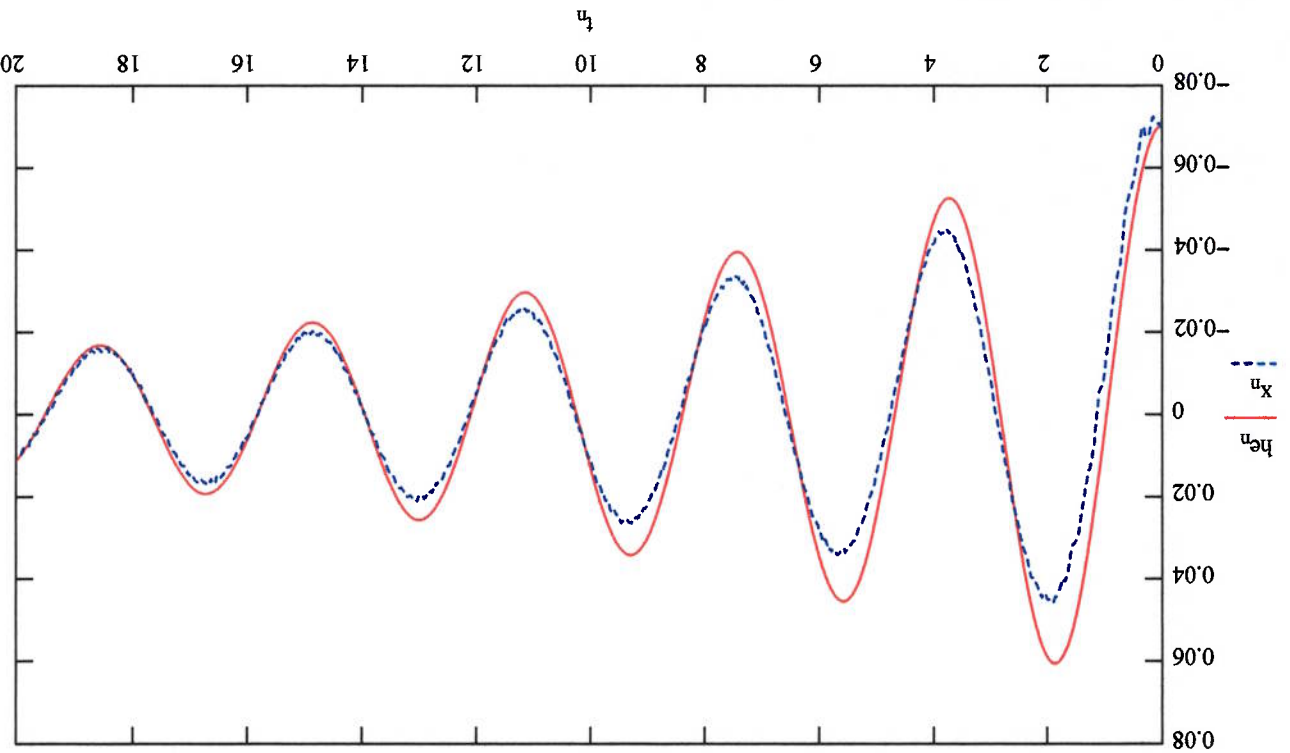


A0 := -0.16927
 A1 := -0.10768
 A2 := -0.080523

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad \omega_n = 1.7$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad \omega_d = 1.7$$

$$h_{e_n} := \frac{x_0}{\zeta} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := 2 \frac{k}{\omega_n^2} \quad Mg = 16.45 \quad \text{kg}$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot Mg$$

$$c := cc \cdot \zeta$$

$$c = 2.54$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.15$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \quad \text{kg}$$

$$MA33 := \frac{2k}{\omega_n^2} - m$$

$$MA33 = 5.9 \quad \text{kg}$$

$$\frac{MA33}{m} \cdot 100 = 56.6 \quad \%$$

Análise da massa adicional usando a aproximação linear
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrado com pítões (Sov2)

(sov2lin)

C:\Sov2a.dat

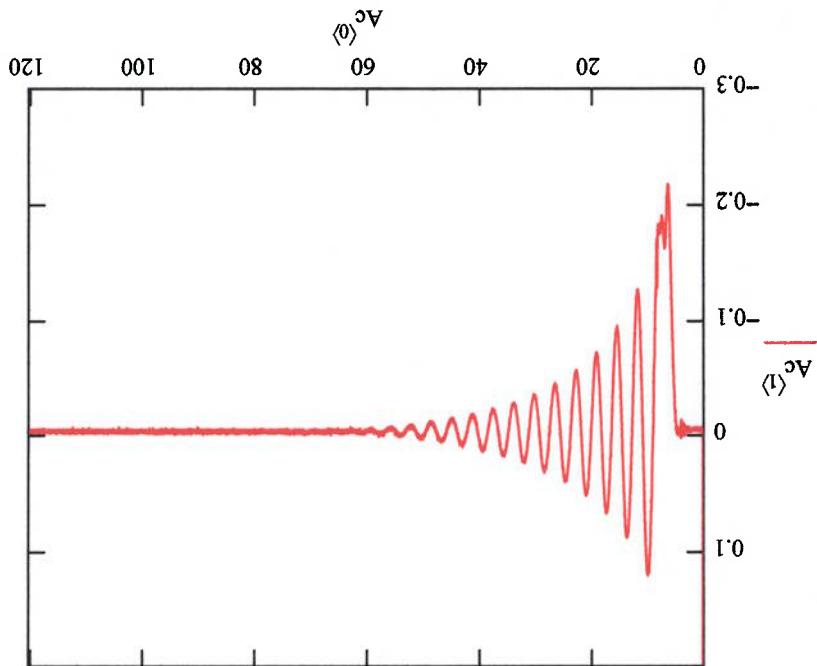


Ac :=

comprimento do vetor

$B := \text{length}(Ac^{(0)})$

$B = 7.68 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=509 representa o instante inicial

$Np := 509$

$j := Np..B - 1$

$t_{j-Np} := Ac^{(0)}(j) - Ac^{(0)}(Np)$

$F_{j-Np} := Ac^{(1)}(j) + 0.003$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.18$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \quad \text{N/m}$$

k = 24.9

$$n := 0 \dots B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \text{ m}$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t1 := 1.9079$$

$$t2 := 5.6215$$

$$x1 := 0.1245$$

$$x2 := 0.091187$$

$$T := t2 - t1$$

$$T = 3.71$$

$$r := \frac{x1}{x2}$$

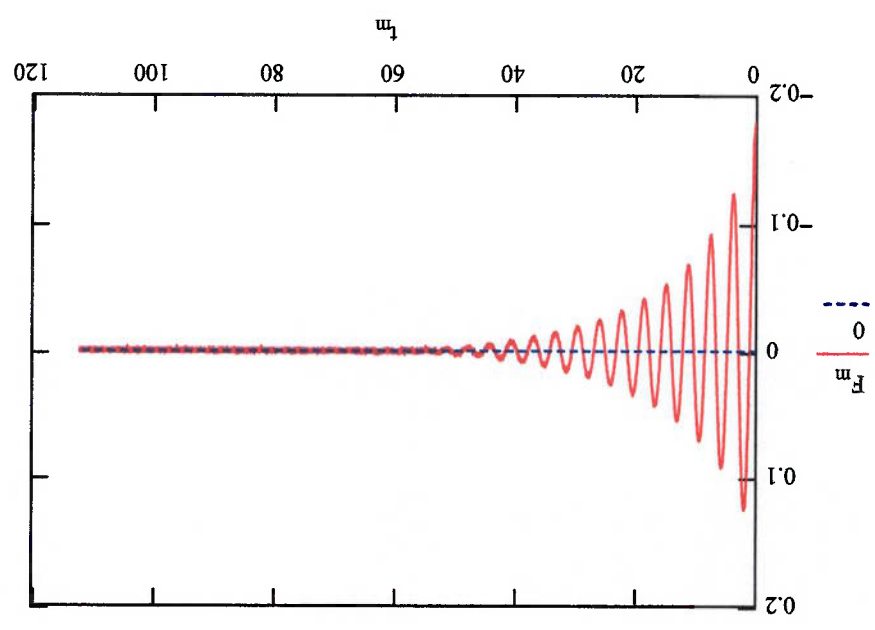
$$r = 0.73$$

$$\zeta := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}}$$

$$\zeta = 0.05$$

$$\alpha := \arctan\left(\sqrt{\frac{1 - \zeta^2}{\zeta}}\right)$$

$$\alpha = 1.52$$

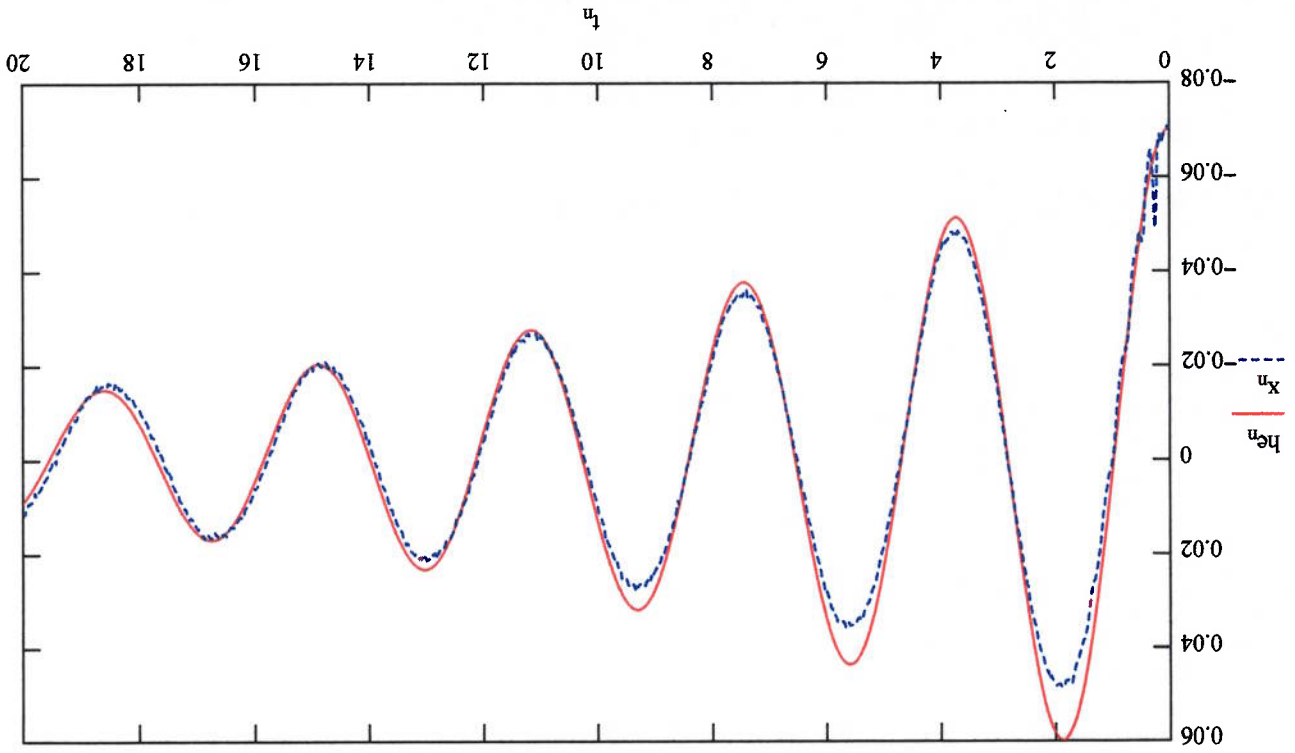


A0 := -0.17981
 A1 := -0.12239
 A2 := -0.067234

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad \omega_n = 1.69$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad \omega_d = 1.69$$

$$h_{e_n} := \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := \frac{2k}{\omega_n^2}$$

$$Mg = 17.35 \quad \text{kg}$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot Mg$$

$$c = 2.91$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.17$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \quad \text{kg}$$

$$MA33 := Mg - m$$

$$MA33 = 6.8 \quad \text{kg}$$

$$\frac{MA33}{m} \cdot 100 = 65.2 \quad \%$$

(sov3lin)

C:\Sov3a.dat

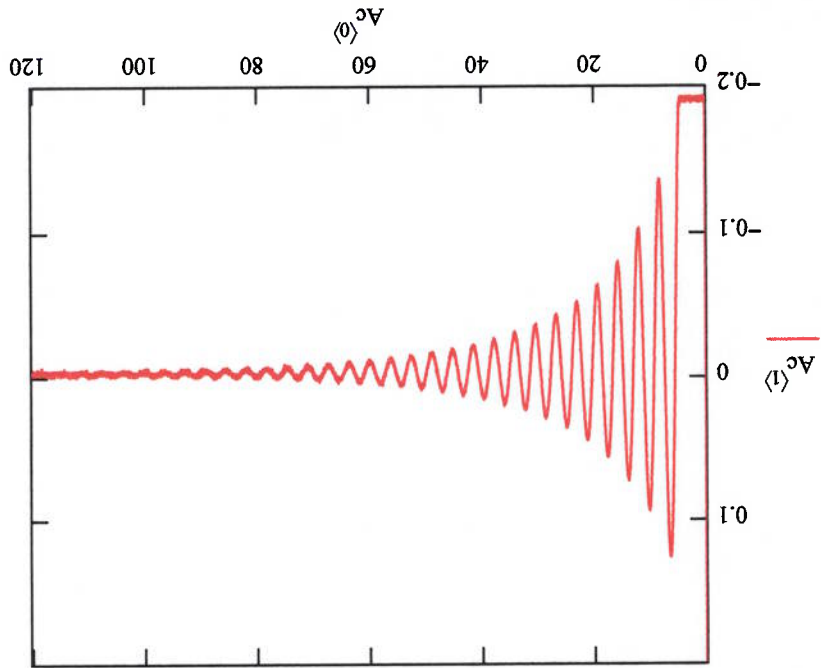


Ac :=

comprimento do vetor

$B := \text{length}(Ac^{(0)})$

$B = 7.68 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até $j=292$ representa o instante inicial

$Np := 292$

$j := Np..B - 1$

$t_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$

$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j + 0.002$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.19$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \quad \text{N/m}$$

$$k = 26.57$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \text{ m}$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t1 := 1.8906$$

$$t2 := 5.573$$

$$x1 := 0.12817$$

$$x2 := 0.095356$$

$$T := t2 - t1$$

$$T = 3.68$$

$$r := \frac{x1}{x2}$$

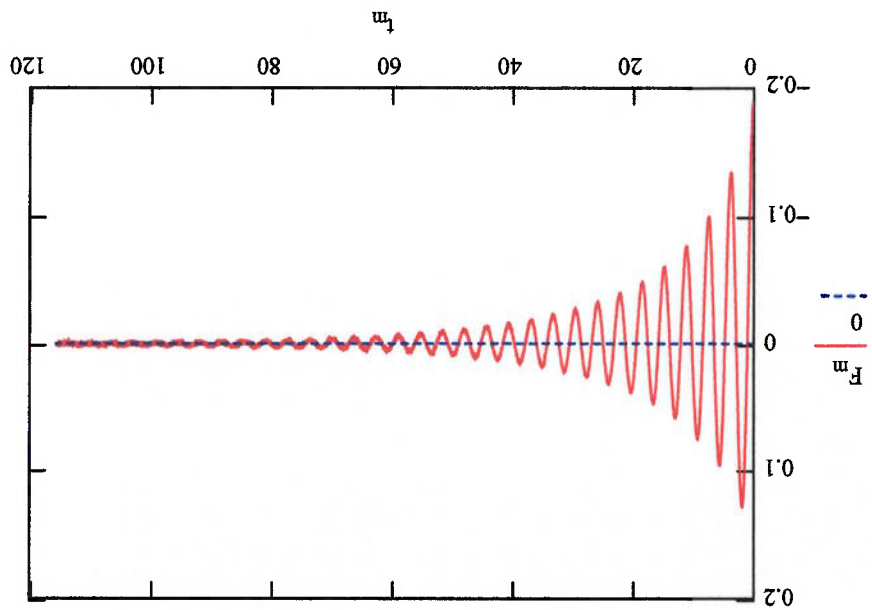
$$r = 0.74$$

$$\zeta := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}}$$

$$\zeta = 0.05$$

$$\alpha := \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right)$$

$$\alpha = 1.52$$



$$A0 := -0.189$$

$$A1 := -0.1314$$

$$A2 := -0.096994$$

Massa do modelo

$m := 10.505 \text{ kg}$

$MA33 := Mg - m$

$MA33 = 7.7 \text{ kg}$

$\frac{MA33}{m} \cdot 100 = 73.4 \%$

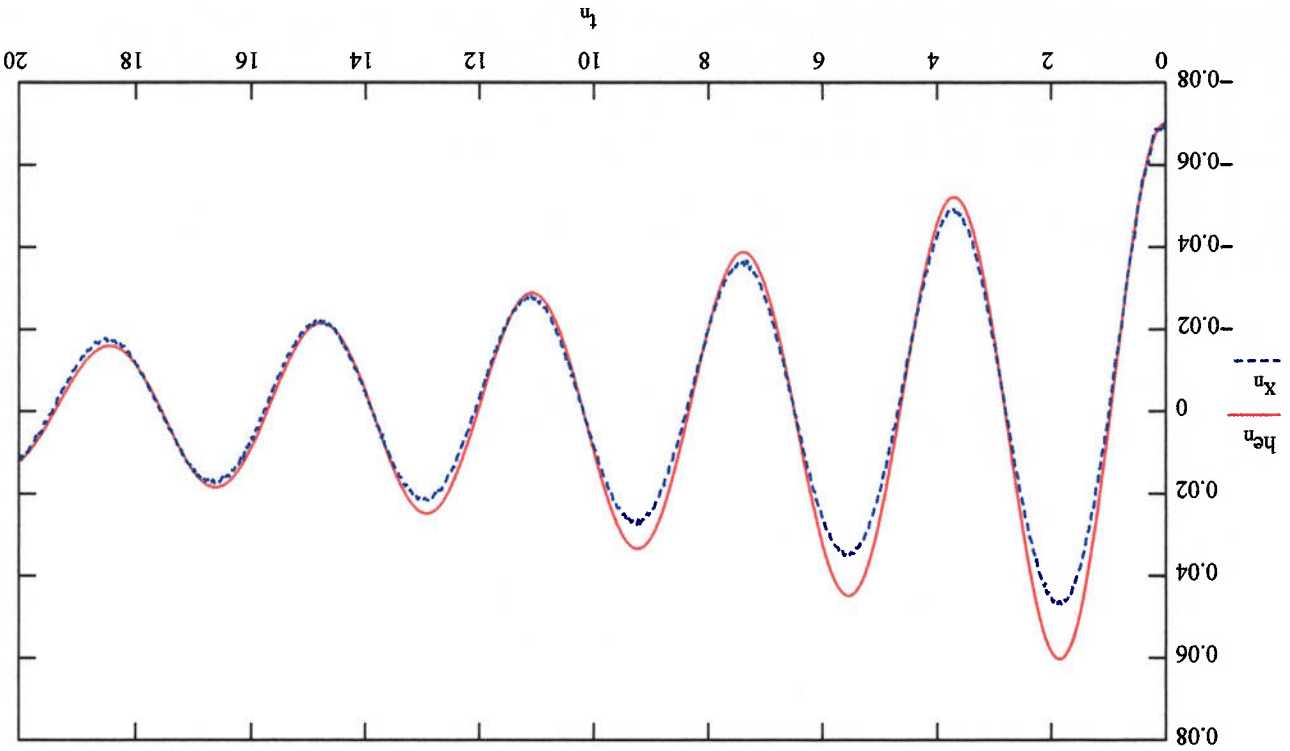
$\frac{Mg}{c} = 0.16$

$c = 2.93$

$cc := 2 \cdot wn \cdot Mg$

$Mg := \frac{2k}{wn^2}$

$Mg = 18.21 \text{ kg}$



$$h_{e_n} := \frac{x_0}{wn} \cdot \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{2} \cdot \exp(-\zeta \cdot wn \cdot t_n) \cdot \sin(wn \cdot t_n + \alpha)$$

$wd := wn \cdot \sqrt{1-\zeta^2} \text{ rad}$

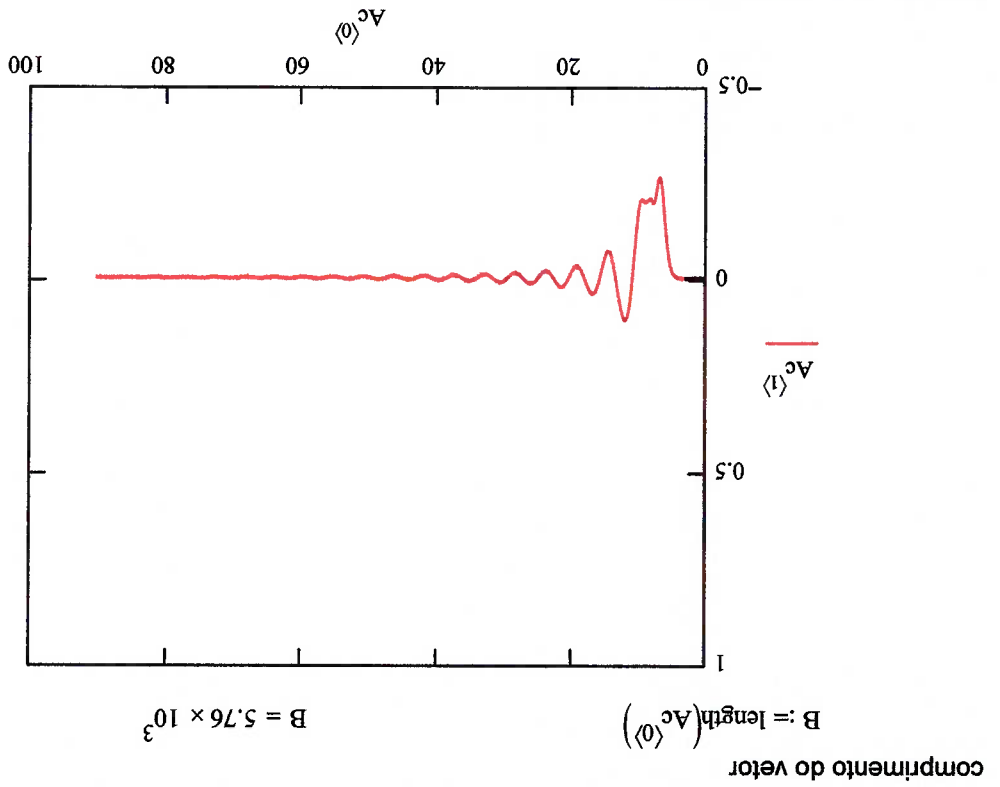
$wd = 1.71 \text{ rad}$

$wn := \frac{T \cdot \sqrt{1-\zeta^2}}{2 \cdot \pi} \text{ rad}$

$wn = 1.71 \text{ rad}$

Análise da massa adicional usando a aproximação linear
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estrado com pítões (Sott)

```
Ac :=
C:\Sott1x.dat
(sottlin)
```



$Np := 608$

$j := Np..B - 1$

$$F_{j-Np} := Ac^{(j)} - Ac^{(Np)}$$

$$F_{j-Np} := Ac^{(j)} + 0.006$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.2$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \quad \text{N/m}$$

$$k = 28.47$$

$$n := 0 \dots B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial $x_0 = -0.07$ n
 Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$t1 := 2.4687 \quad t2 := 7.3193$$

$$x1 := 0.11008 \quad x2 := 0.041668$$

$$T := t2 - t1 \quad T = 4.85$$

$$r := \frac{x1}{x2}$$

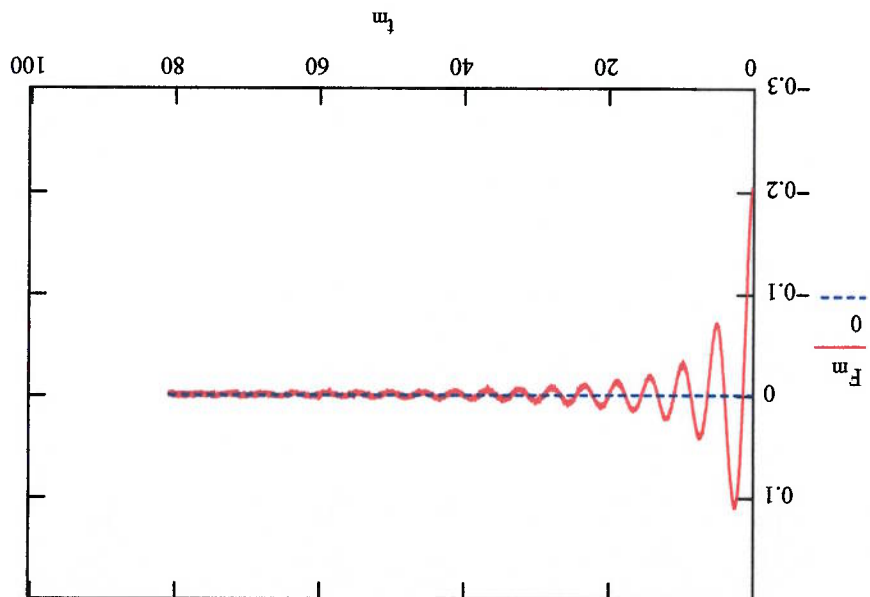
$$r = 0.38$$

$$\zeta := \frac{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}{1}$$

$$\zeta = 0.15$$

$$\alpha := \text{atan} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right)$$

$$\alpha = 1.42$$

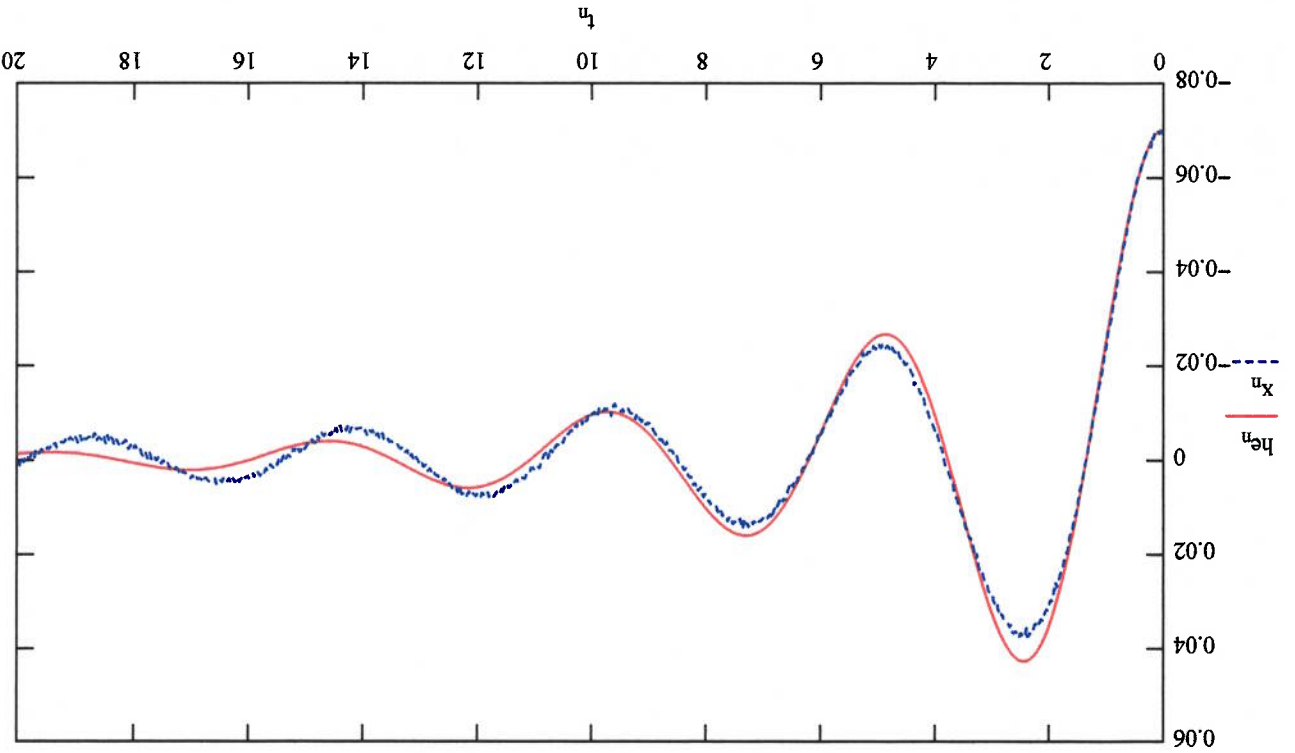


A0 := -0.20181
 A1 := -0.069
 A2 := -0.030719

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad \omega_n = 1.31$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad \omega_d = 1.3$$

$$h e_n := \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := \frac{2k}{\omega_n^2} \quad \text{kg} \quad Mg = 33.15$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot Mg$$

$$c := cc \cdot \zeta$$

$$c = 13.28$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.4$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \text{ kg}$$

$$MA22 := \frac{2k}{\omega_n^2} - m$$

$$MA22 = 22.6 \text{ kg}$$

$$\frac{MA22}{m} \cdot 100 = 215.5 \%$$

Análise da massa adicional usando a aproximação linear
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estrado com pílotes (Sott)

(sott2lin)

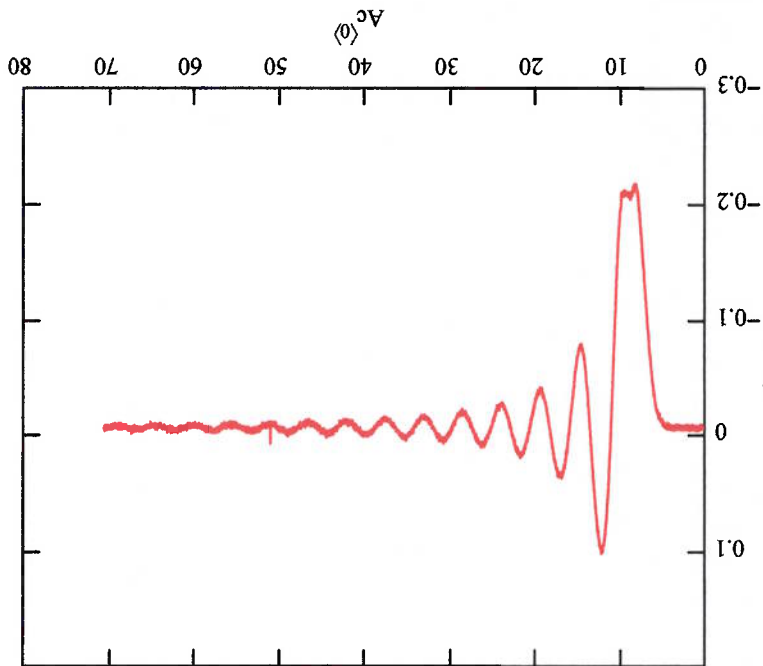
C:\Sott2a.dat

Ac :=

comprimento do vetor

$B := \text{length}(Ac \langle l \rangle)$

$B = 4.51 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=617 representa o instante inicial

$Np := 617$

$j := Np .. B - 1$

$t_{j-Np} := (Ac \langle l \rangle)_j - (Ac \langle l \rangle)_{Np}$

$F_{j-Np} := (Ac \langle l \rangle)_j + 0.00526123$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0 .. B - Np$

$F_0 = -0.2$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \quad \text{N/m}$$

$$k = 28.25$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F \cdot 9.8}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \quad n$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t_1 := 2.234$$

$$t_2 := 7.109$$

$$x_1 := 0.10643$$

$$x_2 := 0.041189$$

$$T := t_2 - t_1$$

$$T = 4.88$$

$$r := \frac{x_2}{x_1}$$

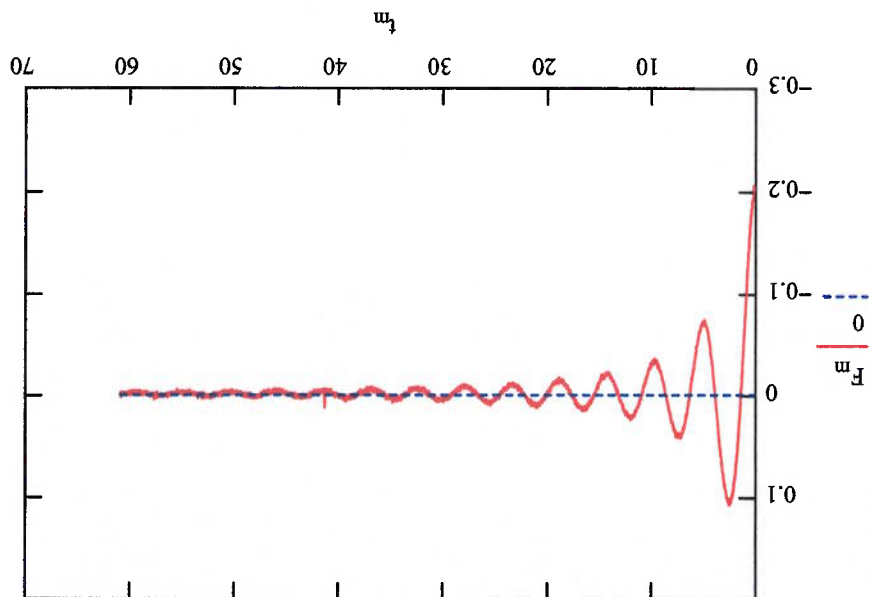
$$r = 0.39$$

$$\zeta := \frac{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}{1}$$

$$\zeta = 0.15$$

$$\alpha := \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right)$$

$$\alpha = 1.42$$

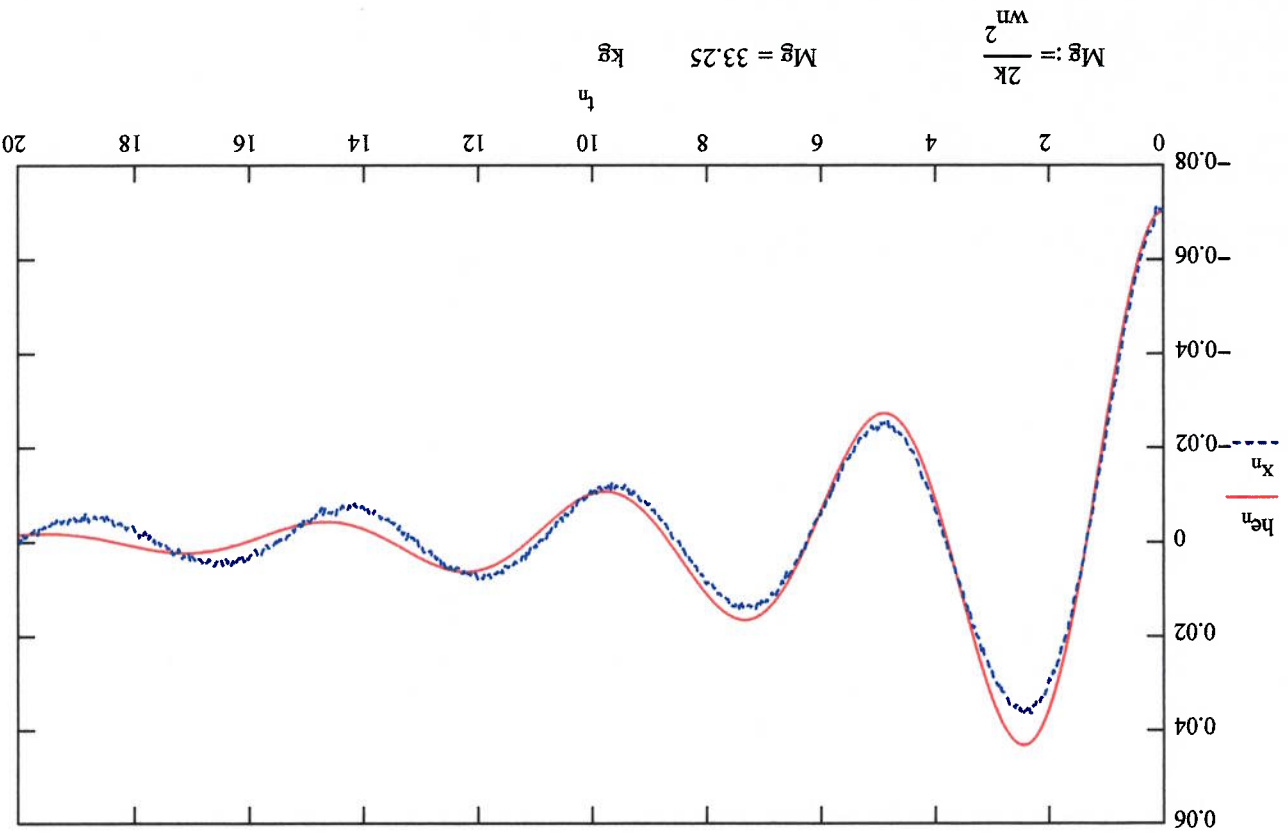


A0 := -0.20177
 A1 := -0.071516
 A2 := -0.03263

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad \omega_n = 1.3$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad \omega_d = 1.29$$

$$h e_n := \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := \frac{2k}{\omega_n^2} \quad \text{kg} \quad Mg = 33.25$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot Mg$$

$$c := cc \cdot \zeta$$

$$c = 12.95$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.39$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \text{ kg}$$

$$MA22 := Mg - m$$

$$MA22 = 22.7 \text{ kg}$$

$$\frac{MA22}{m} \cdot 100 = 216.5 \%$$

Análise da massa adicional usando a aproximação linear
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estrado com pñões (Sott)

(sott3lin)

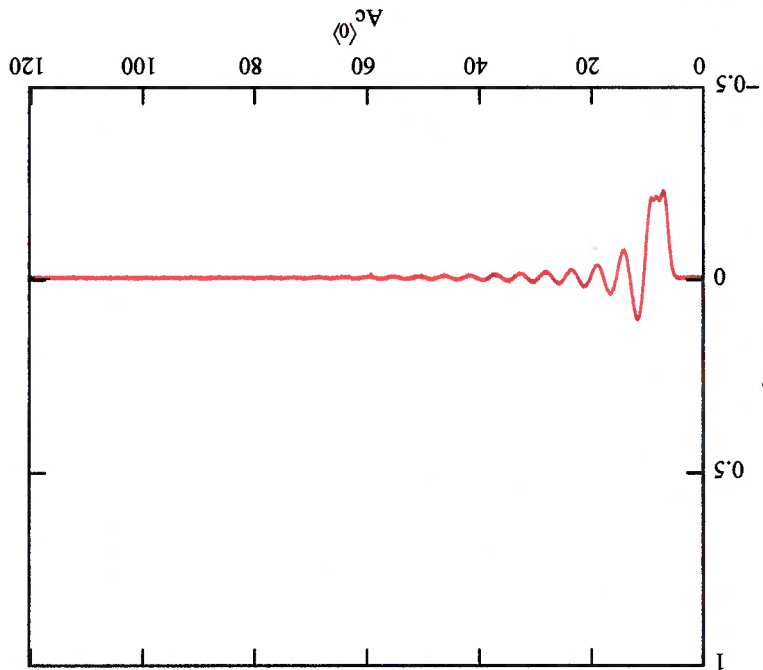
C:\Sott3a.dat

Ac :=

comprimento do vetor

$$B := \text{length}(Ac \langle 0 \rangle)$$

$$B = 7.68 \times 10^3$$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=592 representa o instante inicial

$$Np := 592$$

$$j := Np .. B - 1$$

$$F_{j-Np} := (Ac \langle 0 \rangle)_j - (Ac \langle 0 \rangle)_{Np}$$

$$F_{j-Np} := (Ac \langle 1 \rangle)_j + 0.00526123$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$$m := 0 .. B - Np$$

$$F_0 = -0.21$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 0.980} \quad \text{N/m}$$

$$k = 29.18$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$F_n \cdot 9.8$$

$$x_n := \frac{\quad}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$t1 := 2.4841 \quad t2 := 7.3281$$

$$x1 := 0.10682 \quad x2 := 0.04198$$

$$T := t2 - t1 \quad T = 4.84$$

$$r := \frac{x2}{x1}$$

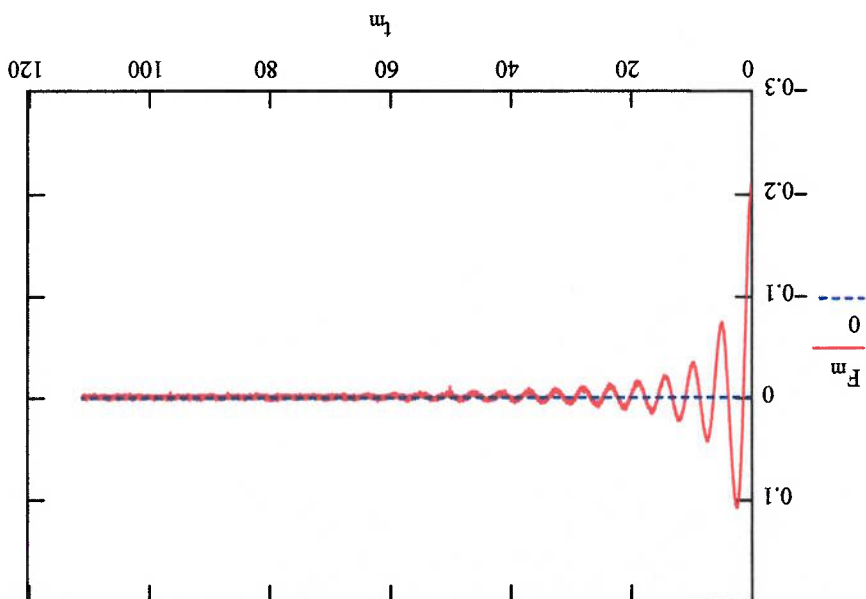
$$r = 0.39$$

$$\zeta := \frac{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(x))^2}}{1}$$

$$\zeta = 0.15$$

$$\alpha := \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right)$$

$$\alpha = 1.42$$



$$A2 := -0.03263$$

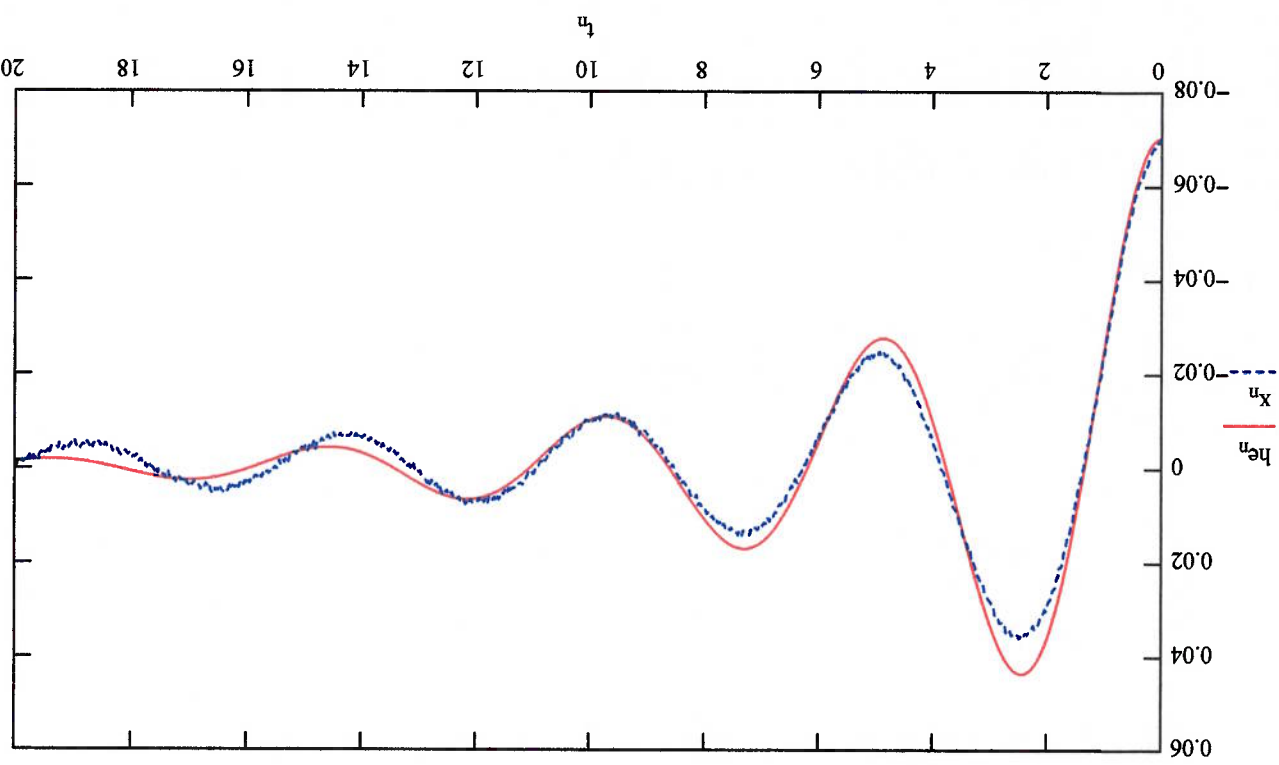
$$A1 := -0.071692$$

$$A0 := -0.20841$$

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad \omega_n = 1.31$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad \omega_d = 1.3$$

$$x_0 := \frac{h e_n}{\omega_d} \cdot \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{2} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



$$Mg := \frac{2k}{\omega_n^2} \quad \text{kg} \quad Mg = 33.93$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot Mg$$

$$c := cc \cdot \zeta$$

$$c = 13.09$$

$$\frac{Mg}{c} = 0.39$$

Massa do modelo

$$m := 10.505 \quad \text{kg}$$

$$MA22 := Mg - m$$

$$MA22 = 23.4 \quad \text{kg}$$

$$\frac{MA22}{m} \cdot 100 = 223 \quad \%$$

(sorr6lin)

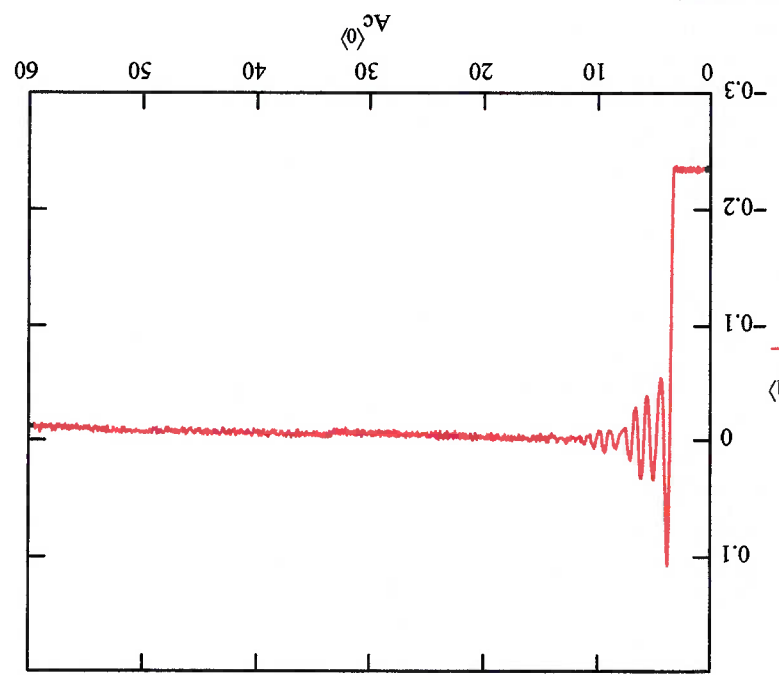
C:\Sorr06.txt

Ac :=

comprimento do vetor

$B = \text{length}(Ac^{(j)})$

$B = 1.2 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=64 representa o instante inicial

$Np := 64$

$j := Np..B - 1$

$Ac^{(j)} := Ac^{(j)} - Ac^{(Np)}$

$F_{j-Np} := Ac^{(j)} + 0.0$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.23$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{L} \quad \text{N/m}$$

$$k = 32.81$$

$$n := 0 \dots B - Np - 1$$

$$F_n \cdot 9.8$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \text{ m}$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t1 := 0.55091$$

$$t2 := 1.7729$$

$$0.55368$$

$$0.10817$$

$$x1 := 0.10887$$

$$x2 := 0.034345$$

$$L := 0.265$$

$$T := 1.22$$

$$0.03469$$

$$1.7995$$

$$r := \frac{x2}{x1}$$

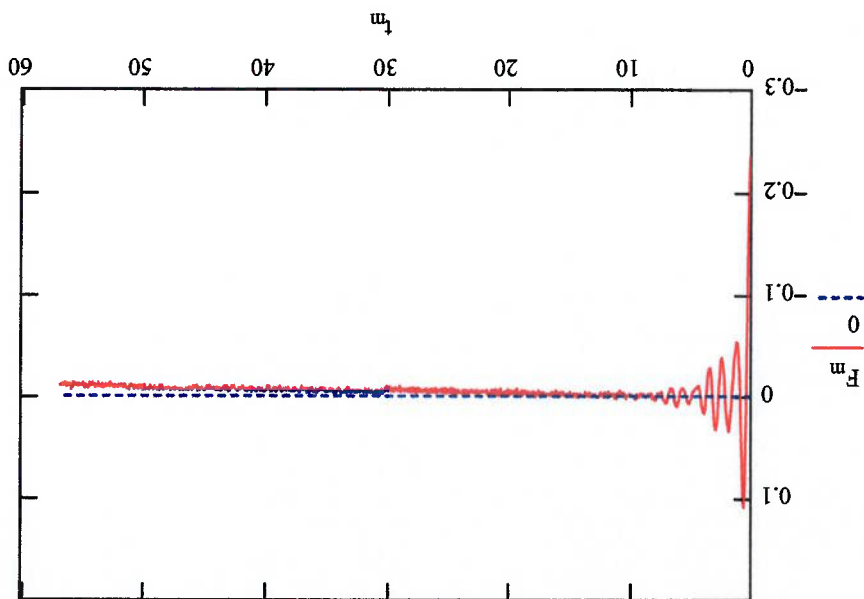
$$r = 0.32$$

$$\zeta := \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}$$

$$\zeta = 0.18$$

$$\alpha := \arctan\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right)$$

$$\alpha = 1.39$$



$$A2 := -0.038308$$

$$A1 := -0.053055$$

$$A0 := -0.23438$$

$$MA66 = 0.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad \frac{Iz}{MA66} \cdot 100 = 54.7 \%$$

$$MA66 := MIG - Iz$$

Momento de inércia do modelo

$$Iz := 0.109 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

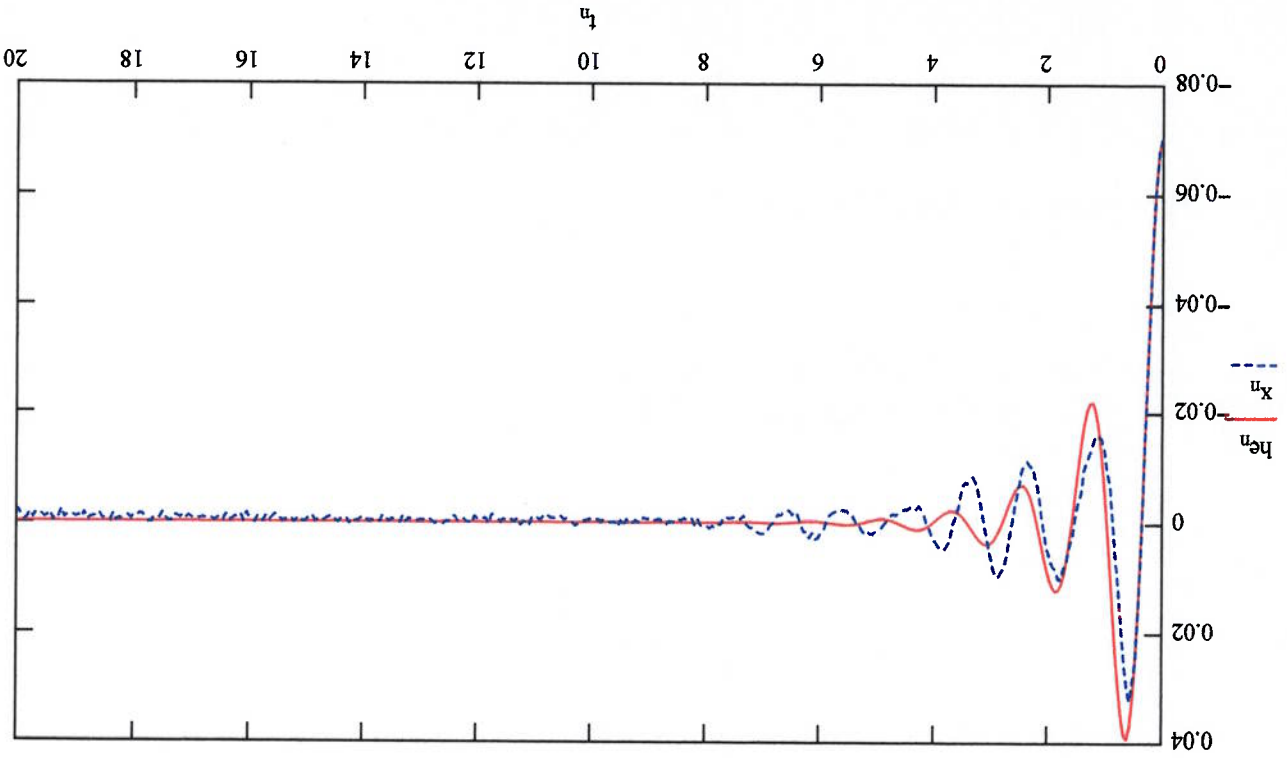
$$\frac{MIG}{c} = 1.89$$

$$c := cc \cdot \zeta \quad c = 0.32$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot MIG$$

Momento de inércia generalizado

$$MIG := \frac{2k \cdot (L)^2}{\omega_n^2} \quad MIG = 0.169 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$



$$h_{e_n} := \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \omega_d = 5.14 \text{ rad}$$

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \omega_n = 5.23 \text{ rad}$$

(sorr7lin)

Ac :=

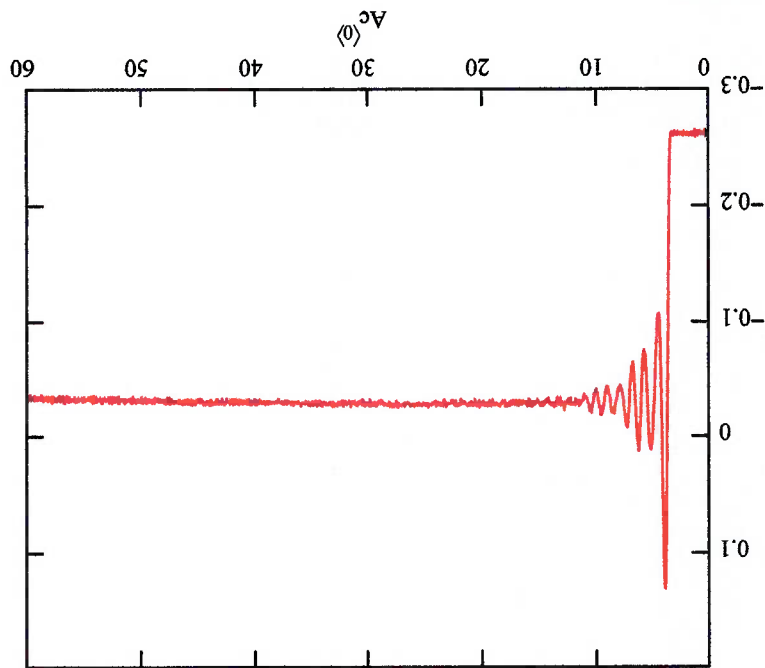


C:\Sorr07.txt

comprimento do vetor

$B := \text{length}(Ac^{(0)})$

$B = 1.2 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até $j=64$ representa o instante inicial

$Np := 64$

$j := Np..B - 1$

$t_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$

$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j + 0.0276569$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.23$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \quad \text{N/m}$$

$$k = 32.87$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$F_n \cdot 9.8$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \text{ m}$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t1 := 0.60963$$

$$t2 := 1.858$$

$$x1 := 0.16016$$

$$x2 := 0.040218$$

$$T := t2 - t1$$

$$T = 1.25$$

$$L := 0.265$$

$$r := 0.25$$

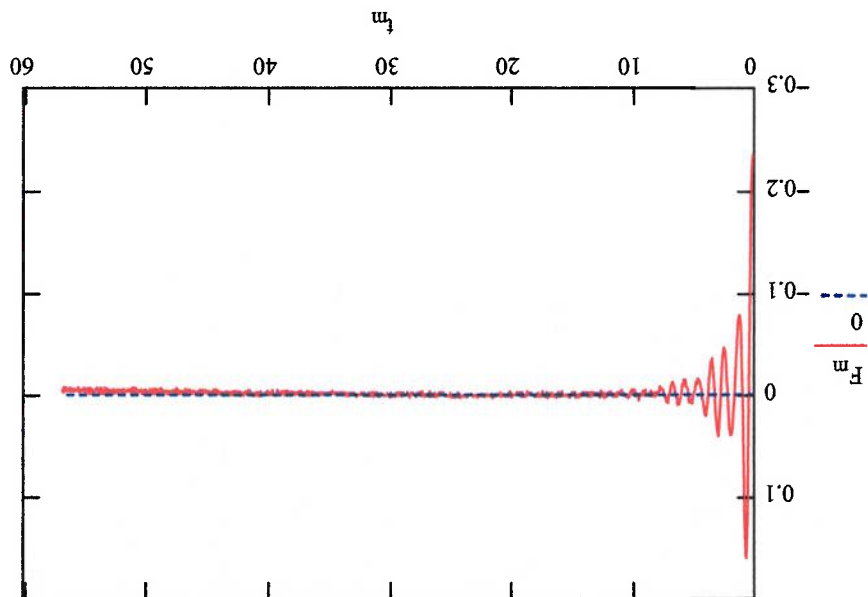
$$r := \frac{x2}{x1}$$

$$\zeta := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}}}$$

$$\zeta = 0.21$$

$$\alpha := \arctan\left(\sqrt{1 - \zeta^2}\right)$$

$$\alpha = 1.35$$



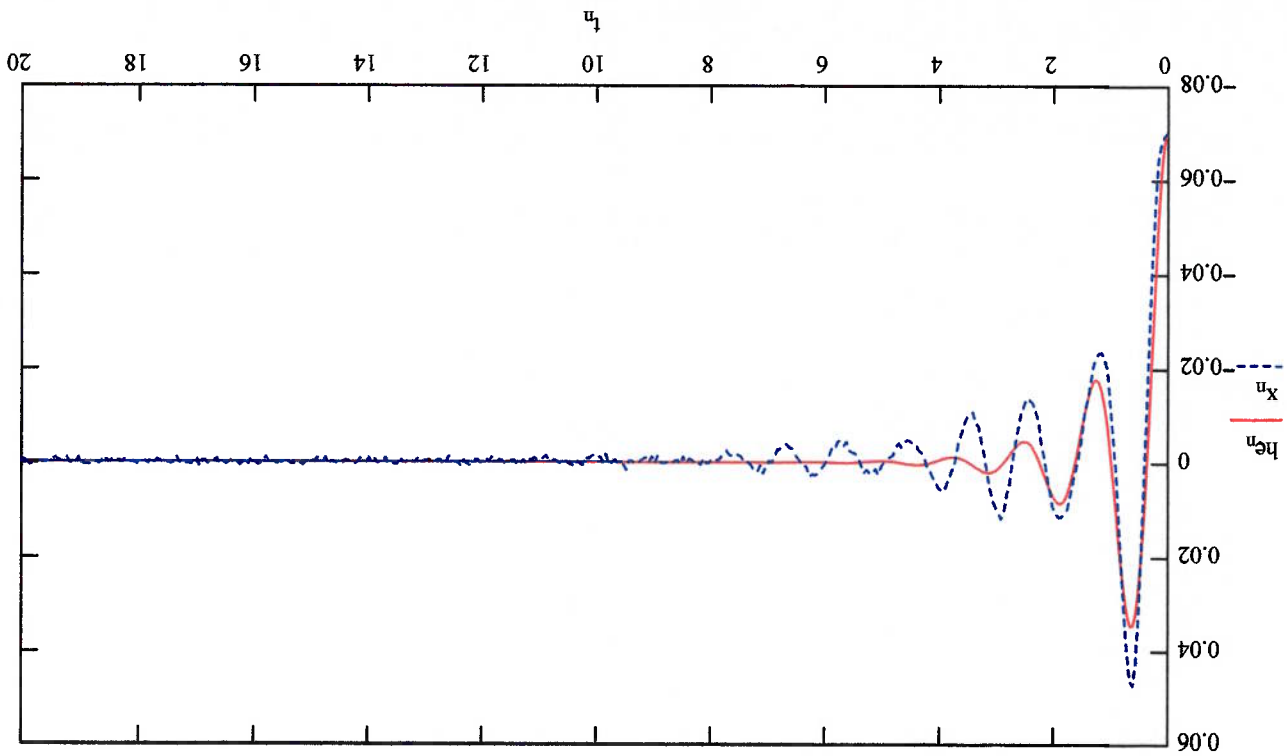
A0 := -0.23479
 A1 := -0.07709
 A2 := -0.046196

0.6
 0.16011
 1.9
 0.039254

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad \omega_n = 5.15$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad \omega_d = 5.03$$

$$h e_n := \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$



Momento de inércia generalizado $MIG := \frac{2k \cdot (L)^2}{\omega_n^2} \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad MIG = 0.174$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot MIG$$

$$c := cc \cdot \zeta$$

$$c = 0.38$$

$$\frac{MIG}{c} = 2.21$$

momento de inércia do modelo $Iz := 0.109 \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$

$$MA66 := MIG - Iz$$

$$MA66 = 0.065 \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\frac{MA66}{Iz} \cdot 100 = 59.5 \%$$

(sort&lin)

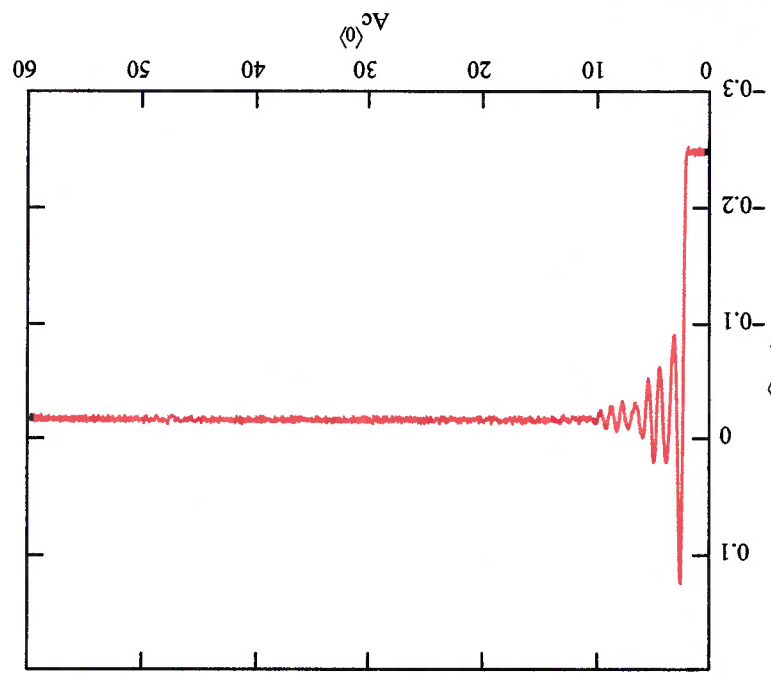
C:\Sort08.txt

Ac :=

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>)

B = 1.2 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=39 representa o instante inicial

Np := 39

j := Np..B - 1

$$t_{j-Np} := \text{Ac}\langle 0 \rangle_j - \text{Ac}\langle 0 \rangle_{Np}$$

$$F_{j-Np} := \text{Ac}\langle 1 \rangle_j + 0.015$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$$m := 0..B - Np$$

$$F_0 = -0.23$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \quad \text{N/m}$$

$$k = 32.59$$

$$n := 0 \dots B - Np - 1$$

$$F_n \cdot 9.8$$

$$x_n := \frac{\quad}{k}$$

"Aproximação linear

Posição inicial

$$x_0 = -0.07 \text{ m}$$

Velocidade inicial

$$v_0 = 0$$

$$t1 := 0.59376 \quad t2 := 1.8174$$

$$x1 := 0.14108 \quad x2 := 0.036462$$

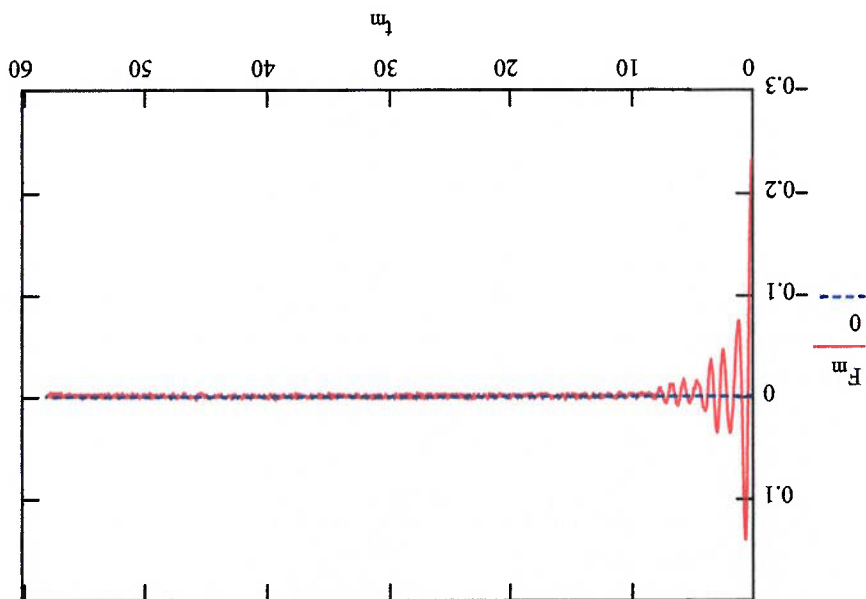
$$T := t2 - t1 \quad T = 1.22$$

$$L := 0.265$$

$$r := \frac{x1}{x2} \quad r = 0.26$$

$$\zeta := \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{(\ln(r))^2}} \quad \zeta = 0.21$$

$$\alpha := \arctan\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right) \quad \alpha = 1.36$$



$$A2 := -0.044766$$

$$A1 := -0.07277$$

$$A0 := -0.2328$$

$$MA66 := 0.057 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad MA66 := \frac{I_z}{100} \cdot 100 = 52.2 \%$$

$$MA66 - I_z$$

momento de inércia do modelo

$$I_z := 0.109 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\frac{MIG}{c} = 2.21$$

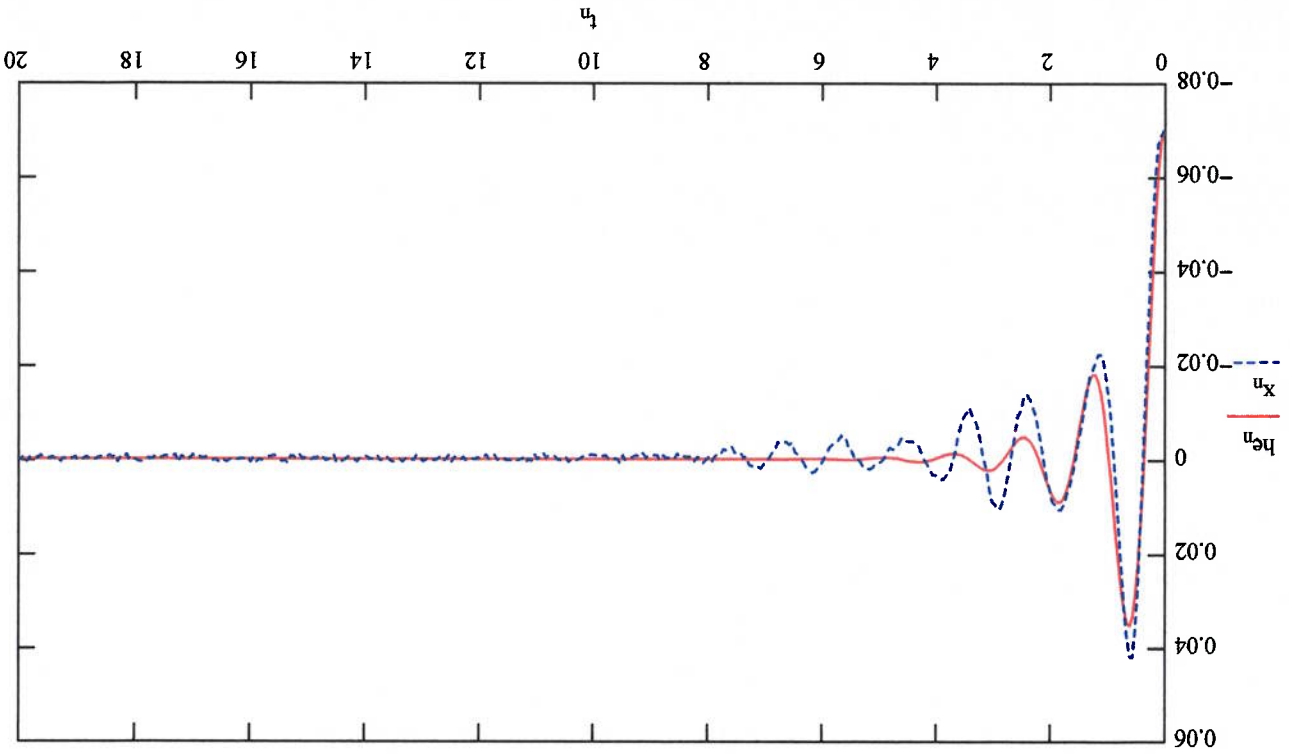
$$c := c \cdot \zeta$$

$$c = 0.37$$

$$cc := 2 \cdot \omega_n \cdot MIG$$

Momento de inércia generalizado

$$MIG := \frac{2k \cdot (L)^2}{\omega_n^2} \quad MIG = 0.166 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$



$$h_n := \frac{x_0}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \exp(-\zeta \cdot \omega_n \cdot t_n) \cdot \sin(\omega_d \cdot t_n + \alpha)$$

$$\omega_d := \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{rad} \quad \omega_d = 5.13$$

$$\omega_n := \frac{T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}{2 \cdot \pi} \quad \text{rad} \quad \omega_n = 5.25$$

DADOS DA ANÁLISE DO AMORTECIMENTO USANDO A APROXIMAÇÃO QUADRÁTICA.

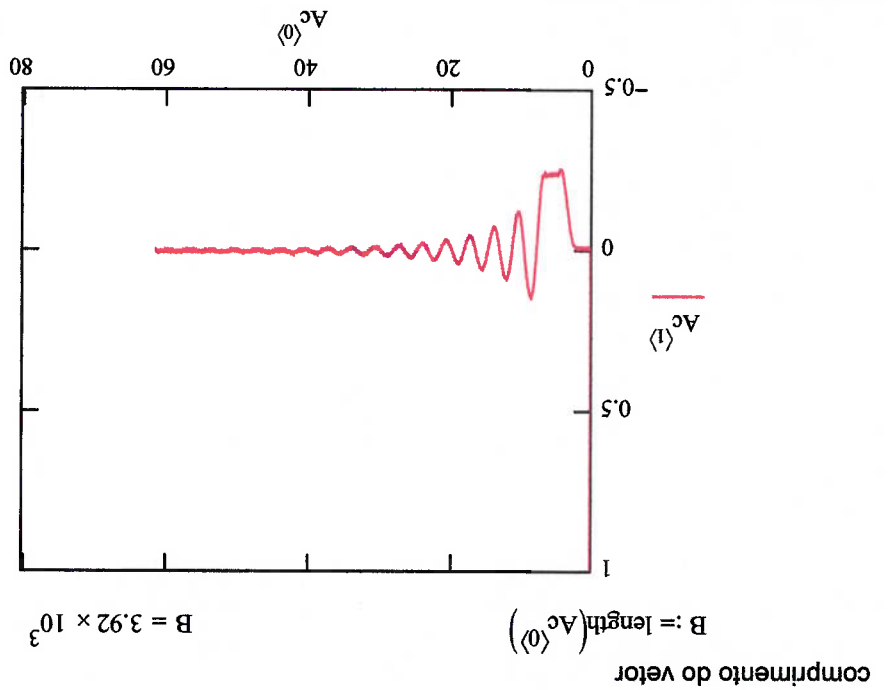
APÊNDICE IV

SUMÁRIO

| | |
|----|---|
| 01 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT4 |
| 03 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT5 |
| 05 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT6 |
| 07 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação vertical para o ensaio SOV1 |
| 09 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação vertical para o ensaio SOV2 |
| 11 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação vertical para o ensaio SOV3 |
| 13 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação transversal para o ensaio SOTT1 |
| 15 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação transversal para o ensaio SOTT2 |
| 17 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação transversal para o ensaio SOTT3 |
| 19 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR6 |
| 21 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR7 |
| 23 | Análise do amortecimento usando a aproximação quadrática na movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR8 |

Análise da massa adicional usando a aproximação puramente quadrática
 Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrado com tirantes (Solt)

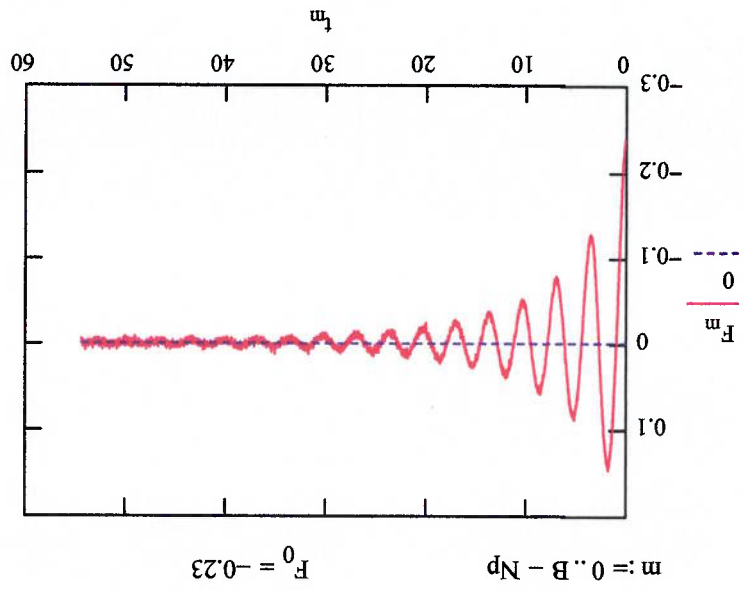
```
Ac :=
C:\Solt4.dat
comprimento do vetor
B := length(Ac)
B = 3.92 x 10^3
(Solt4.qd)
```



Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=436 representa o instante inicial

```
Np := 436
j := Np..B - 1
F<sup>j-Np</sup> := Ac<sup>(j)</sup> - Ac<sup>(0)</sup>
F<sup>j-Np</sup> := Ac<sup>(j)</sup> - 0.005
```

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.84 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \text{ N/m}$$

$$k = 32.56$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

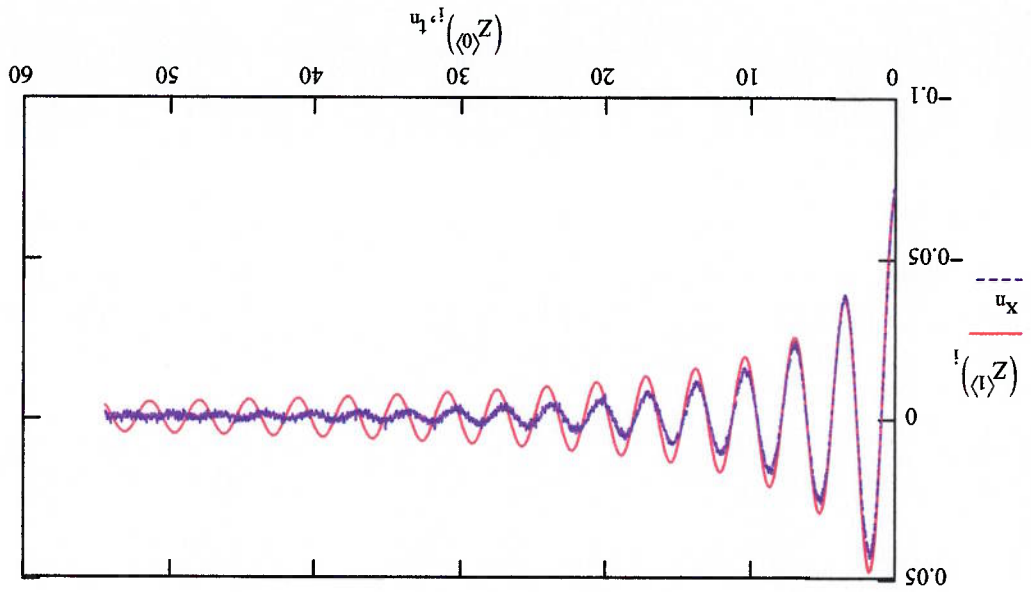
$$bL2 := 4.78$$

Coefficiente de amortecimento bL2 obtido da resolução analítica

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática

Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrado com tirantes (Solt)

Ac :=



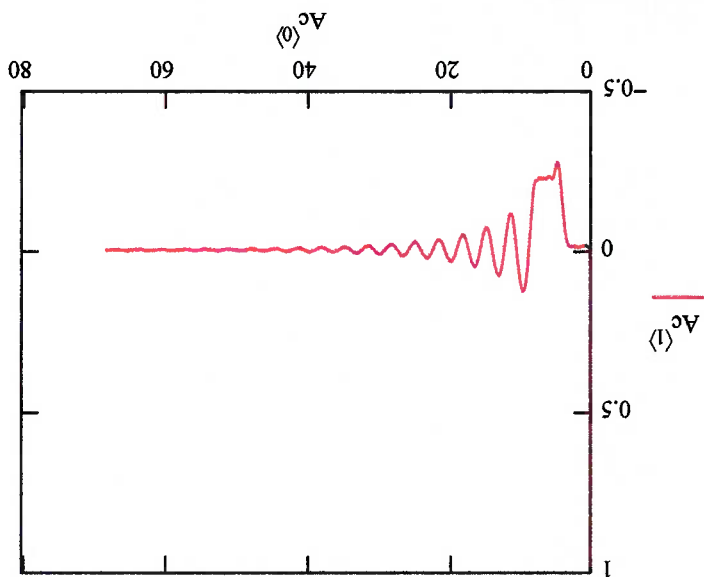
C:\Solt5a.dat

(Solt5.qd)

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>)

B = 4.36 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais
Até j=498 representa o instante inicial

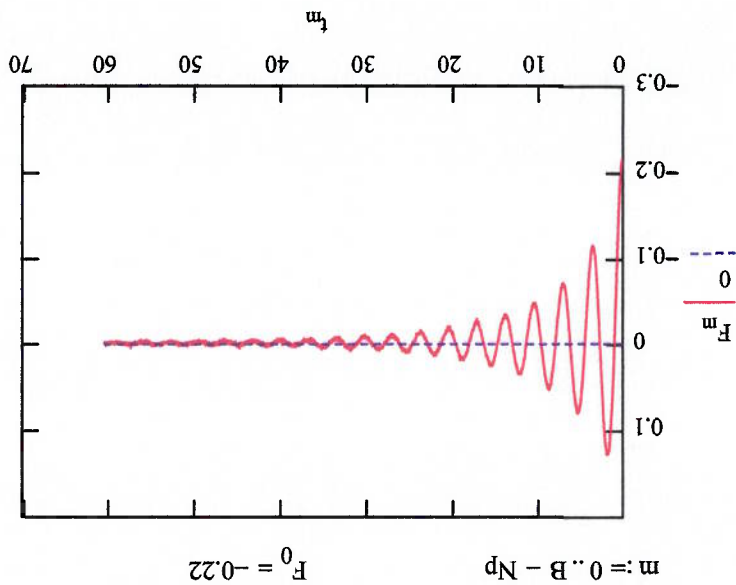
Np := 498

j := Np..B - 1

t_{j-Np} := (Ac<0>)_j - (Ac<0>)_{Np}

F_{j-Np} := (Ac<1>)_j + 0.0042969

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero



m := 0..B - Np

F₀ = -0.22

frequência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.84 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$$k = 30.24$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

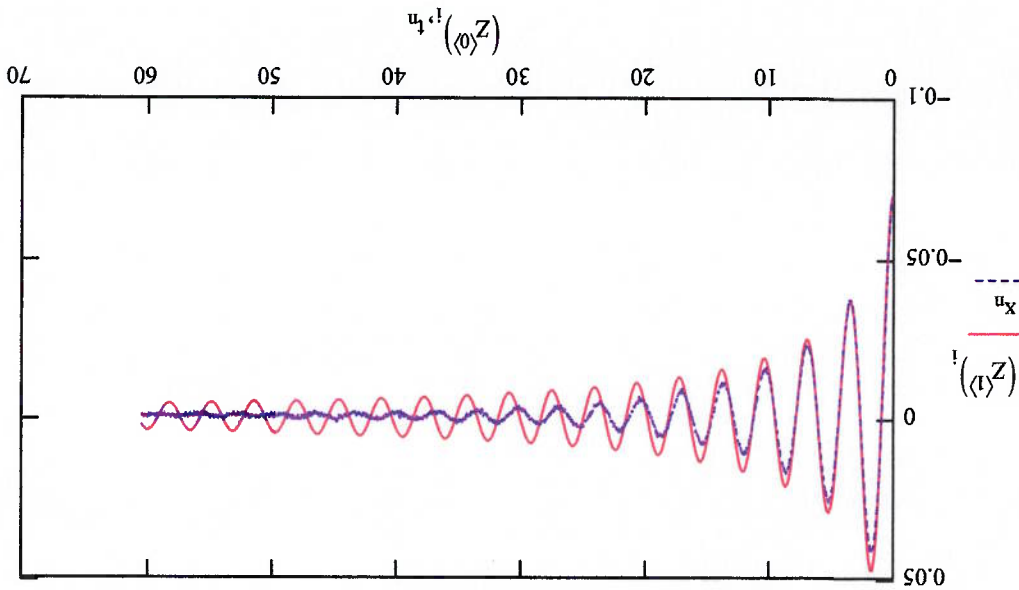
$$bl2 := 4.87$$

Coefficiente de amortecimento bl2 obtido da resolução analítica

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bl2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

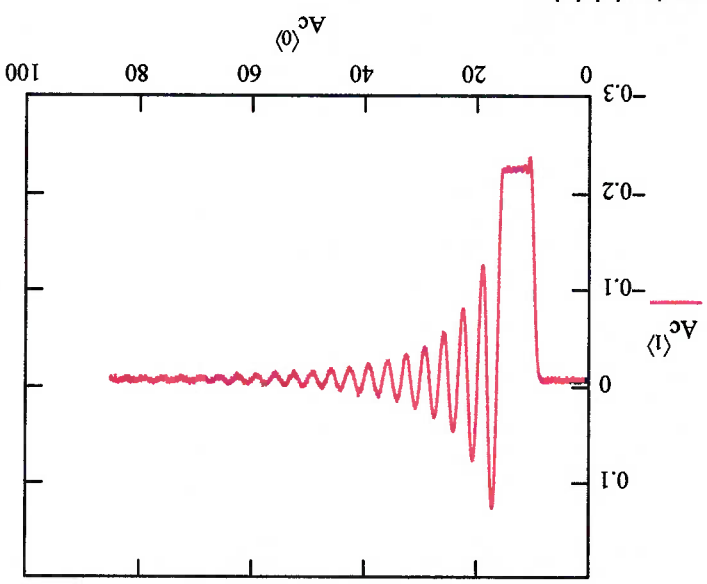
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrado com tirantes (Solt)

Ac :=
 C:\Solt6a.dat
 (Solt6_qd)

comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(j)})$
 $B = 5.42 \times 10^3$



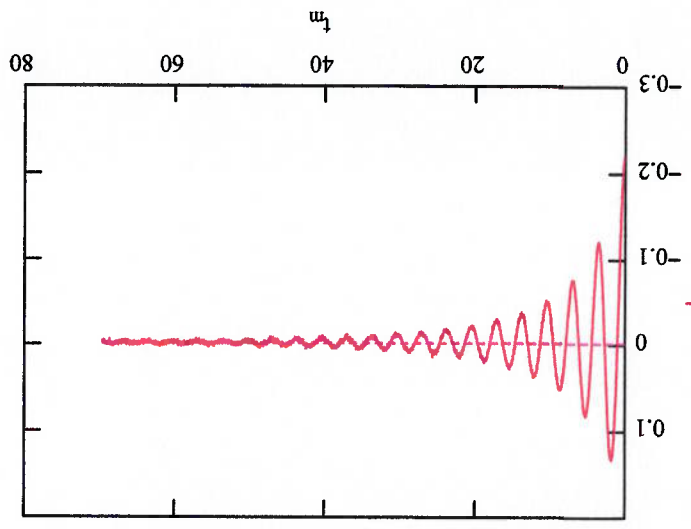
Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=978 representa o instante inicial

$Np := 978$
 $j := Np..B - 1$

$t_{j-Np} := Ac^{(j)}$
 $F_{j-Np} := Ac^{(j)}_j + 0.0042969$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.219$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.82 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{L} \text{ N/m}$$

$$k = 30.63$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07$ m
 Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

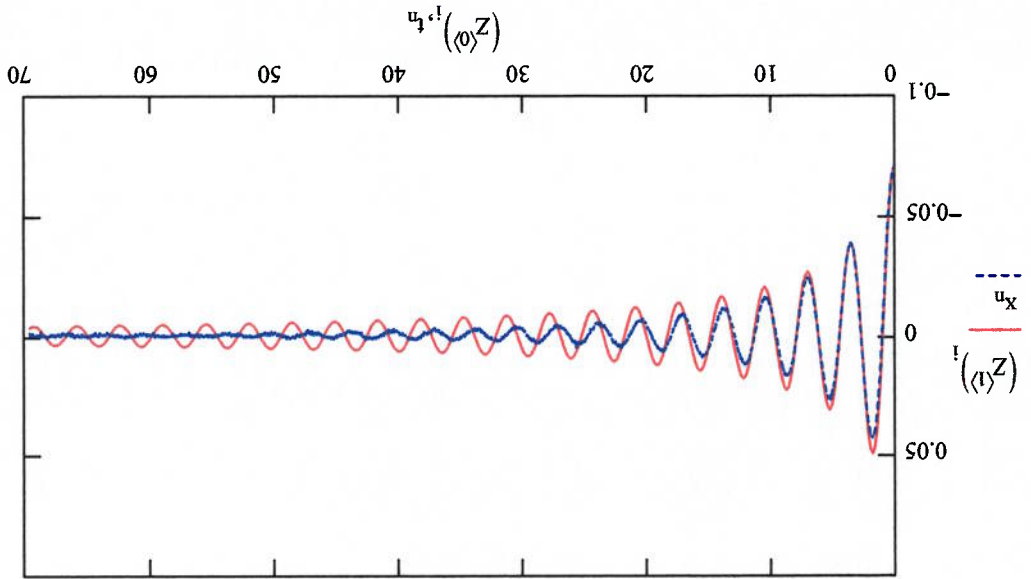
$$bL2 := 4.47$$

Coefficiente de amortecimento bL2 obtido da resolução analítica

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



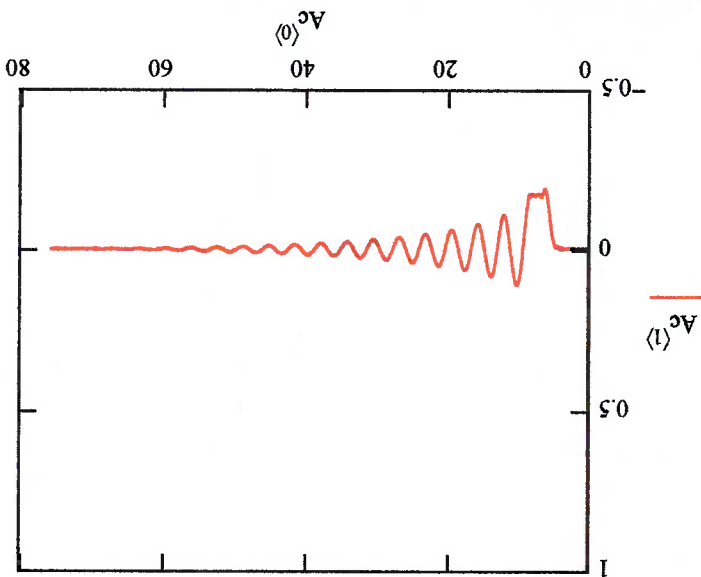
Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrurado com tirantes (Sov)

Ac :=  C:\SOV1a.dat (Sov1.qd)

comprimento do vetor

$$B := \text{length}(Ac^{(0)})$$

$$B = 4.837 \times 10^3$$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=520 representa o instante inicial

$$Np := 520$$

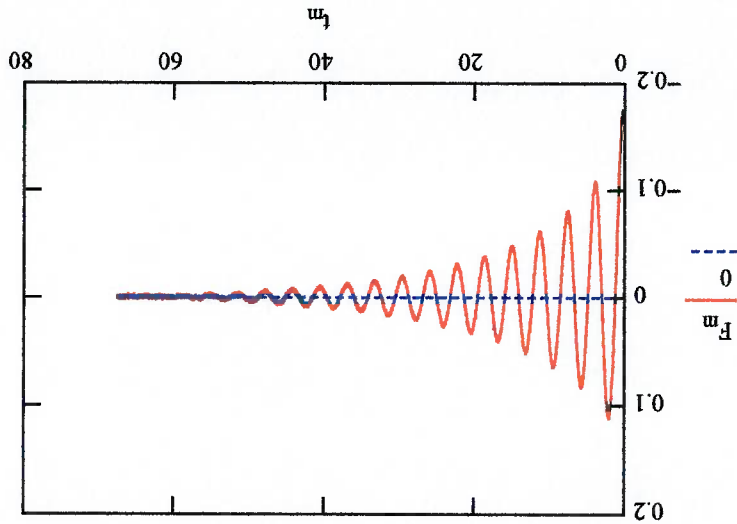
$$j := Np..B - 1$$

$$t_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$$

$$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j + 0.003$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$$m := 0..B - Np \quad F_0 = -0.169$$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.7 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$$k = 23.698$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A1 := t_{B-Np-1}$$

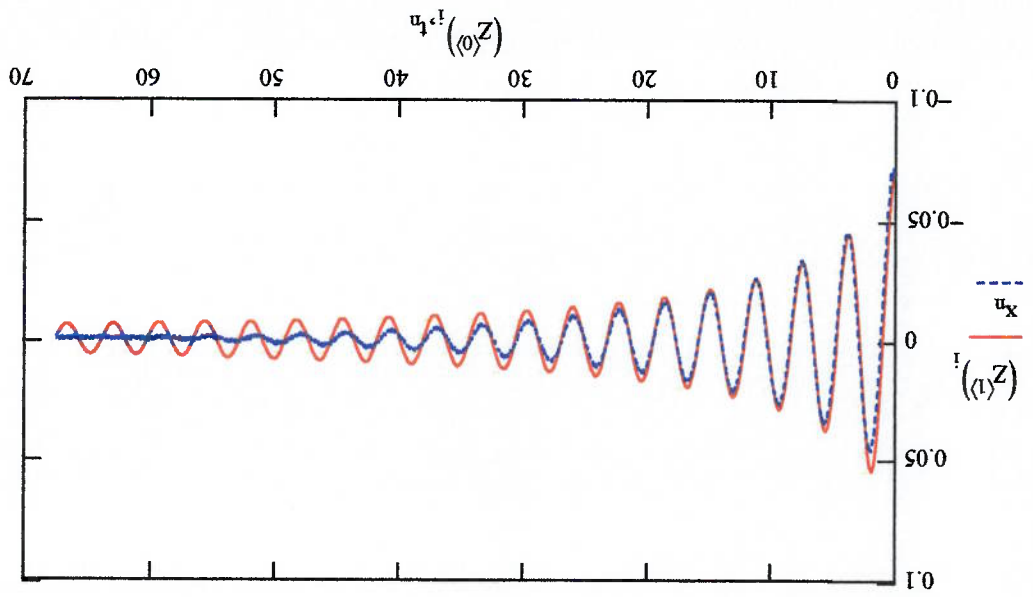
Coefficiente de amortecimento bl obtido da resolução analítica

$$bl2 := 3.09$$

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} -bl2 \cdot (|y_1| \cdot y_1) \\ y_1 \end{bmatrix} - wn^2 \cdot y_0$$

Z := rkfixed(y,A,A1,400,D)

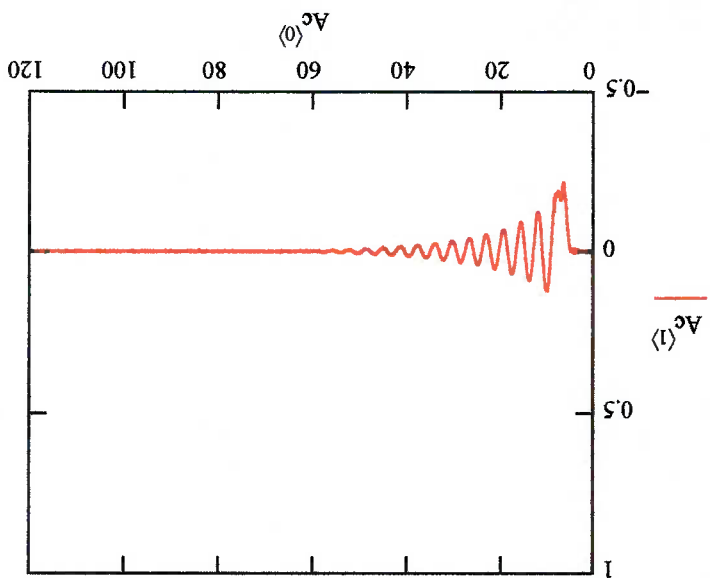
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrado com tirantes (Sov)

```
Ac :=
C:\Sov2a.dat
(Sov2_lq)
```

comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 7.68 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até $j=509$ representa o instante inicial
 $Np := 509$
 $j := Np..B - 1$

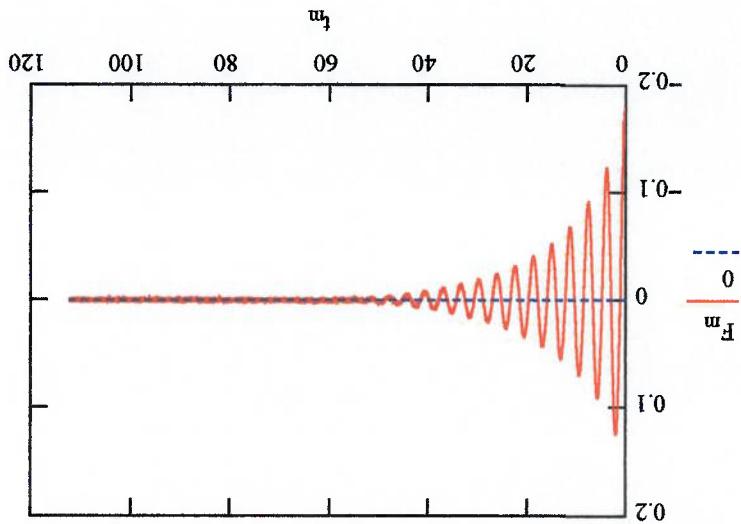
$$F_{j-Np}^{(1)} := Ac^{(0)}(j) - Ac^{(0)}(Np)$$

$$F_{j-Np}^{(1)} := Ac^{(1)}(j) + 0.003$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$$m := 0..B - Np$$

$$F_0 = -0.18$$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.69 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$$k = 24.9$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} 0 \\ x_0 \end{pmatrix}$$

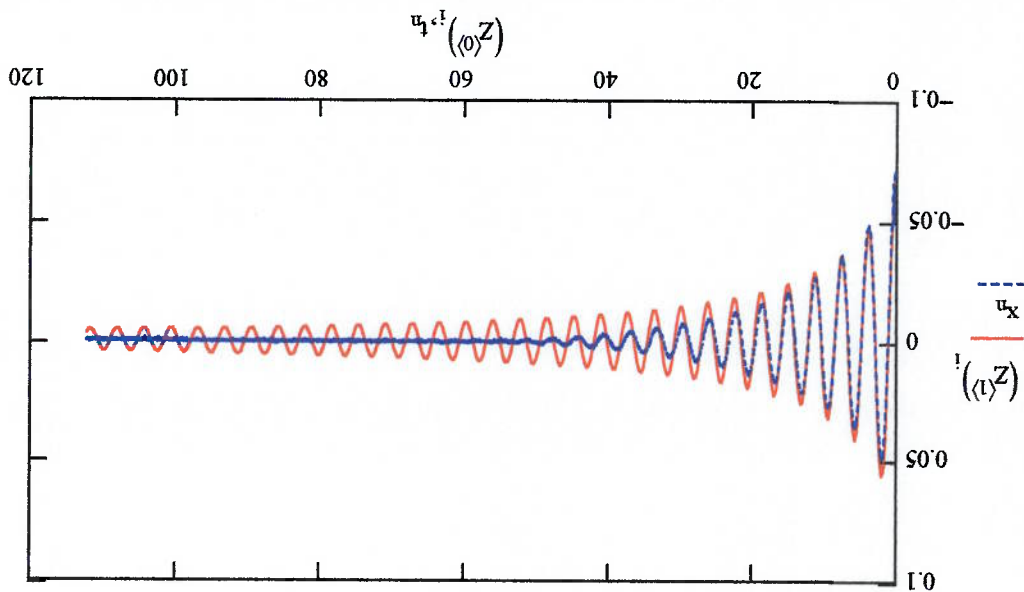
Coefficiente de amortecimento bl obtido da resolução analítica

$$bl2 := 2.52$$

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bl2 \cdot |y_1| \cdot y_1] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrado com tirantes (Sov)

(Sov3_qp)

C:\Sov3a.dat

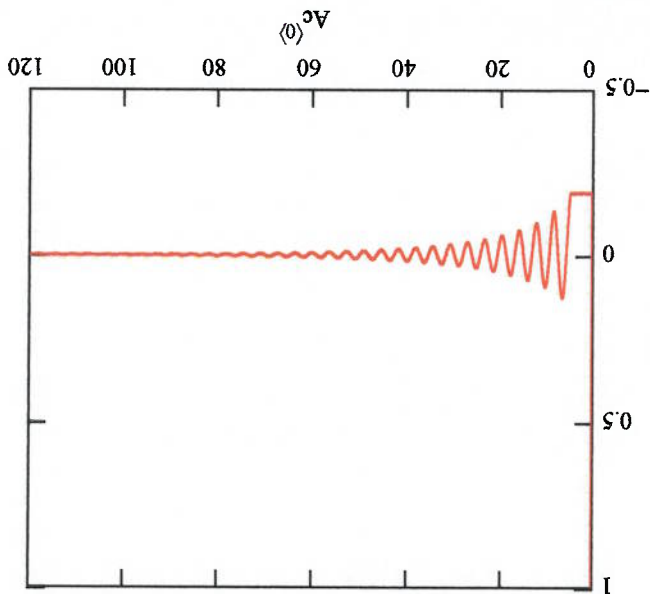
Ac :=



comprimento do vetor

$B := \text{length}(Ac^{(0)})$

$B = 7.685 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até $j=292$ representa o instante inicial

$Np := 292$

$j := Np..B - 1$

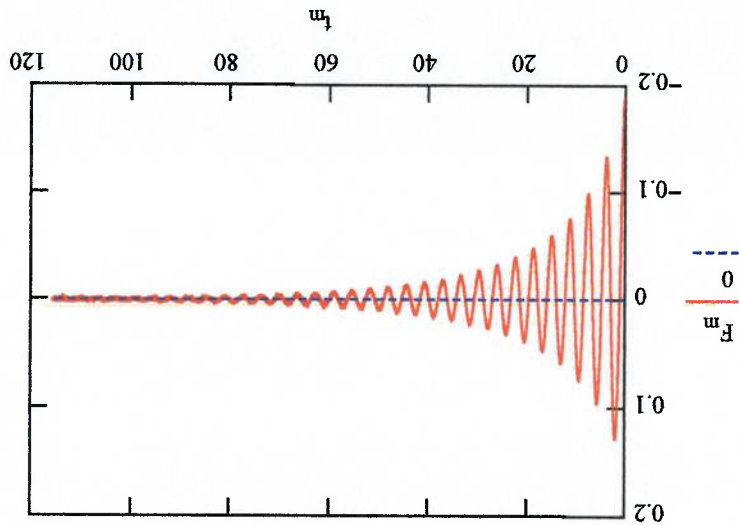
$t_{j-Np} := Ac^{(0)}(j) - Ac^{(0)}(Np)$

$F_{j-Np} := Ac^{(1)}(j) + 0.002$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.19$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.71 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$$k = 26.572$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

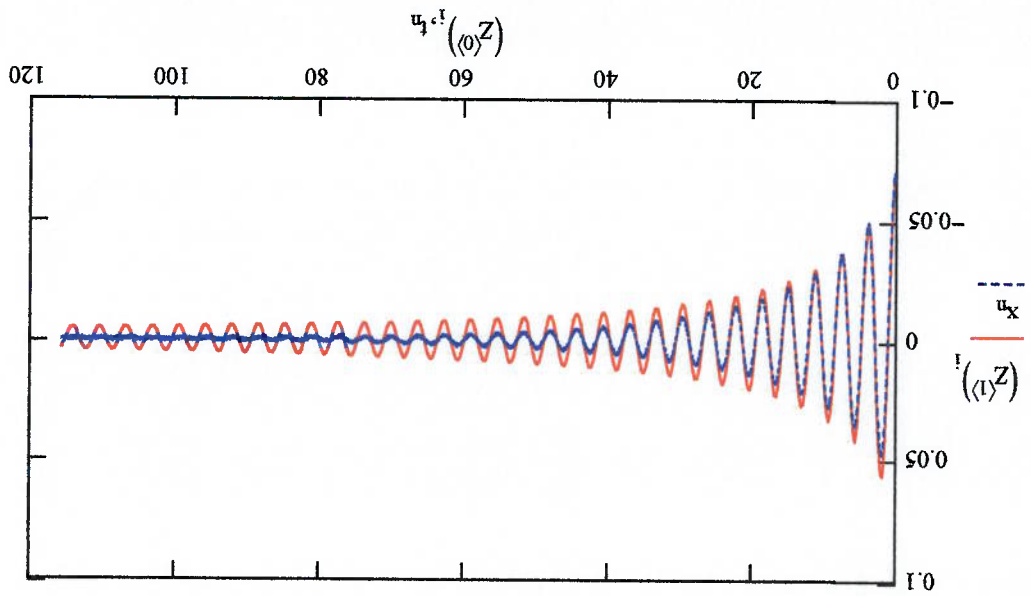
Coefficiente de amortecimento obtido da resolução analítica

$$bL2 := 2.39$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} -[bL2 \cdot |y_1| \cdot y_1] - \omega_n^2 \cdot y_0 \\ y_1 \end{bmatrix}$$

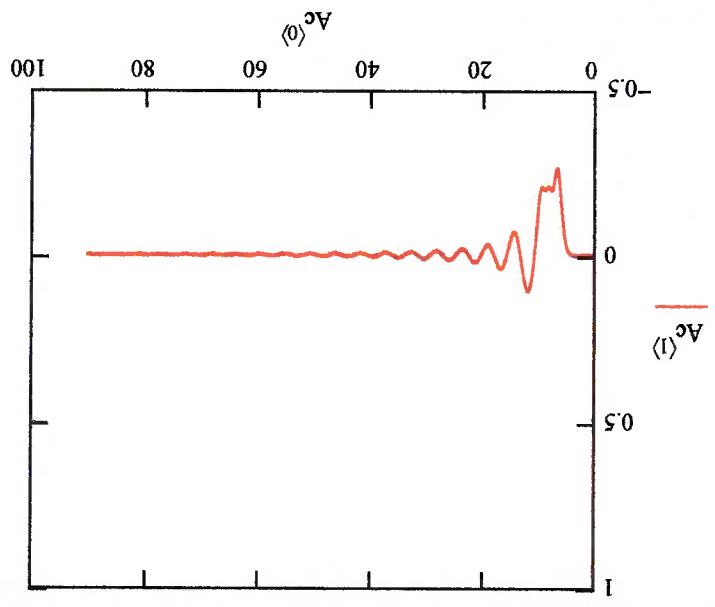
Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estrado com tirantes (Sott)

```
Ac :=
C:\Sott1x.dat
comprimento do vetor
B := length(Ac<0>)
B = 5.76 x 103
(Sott_qd)
```

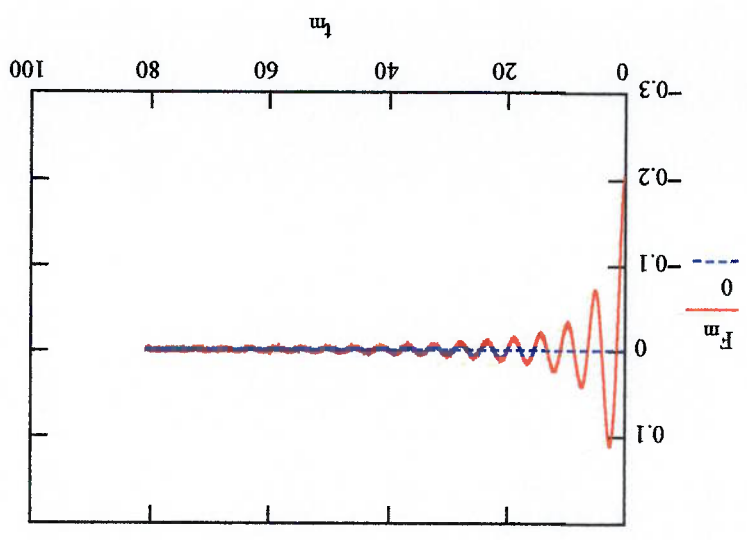


Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=608 representa o instante inicial

```
Np := 608
j := Np..B - 1
F<0> := Ac<0> - Ac<0>[Np]
F<1> := Ac<1> + 0.006
```

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

```
m := 0..B - Np
F<0> = -0.2
```



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.31 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \text{ N/m}$$

$$k = 28.47$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

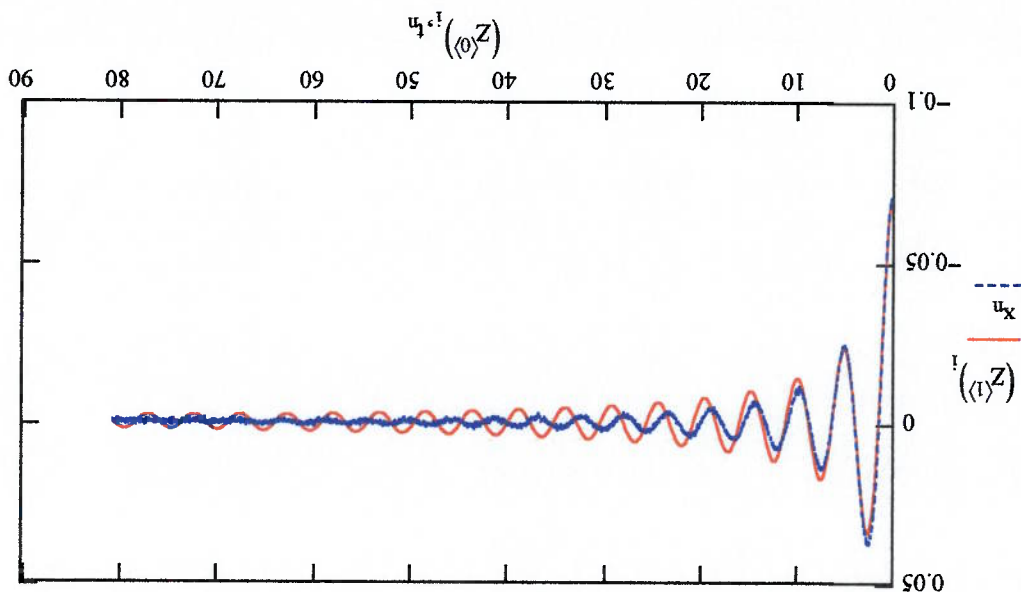
Coefficiente de amortecimento bl obtido da resolução analítica

$$bl2 := 10.40$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} Y_1 \\ -[bl2 \cdot Y_1 - |Y_1| \cdot Y_1] - \omega_n^2 \cdot Y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

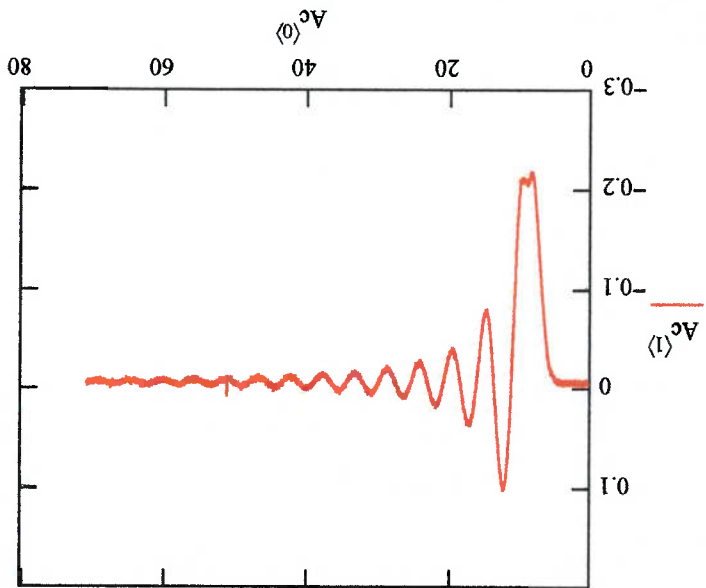
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estritado com tirantes (Sott)

Ac :=
 C:\Sott2a.dat
 (Sott2.qd)

comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 4.51 \times 10^3$



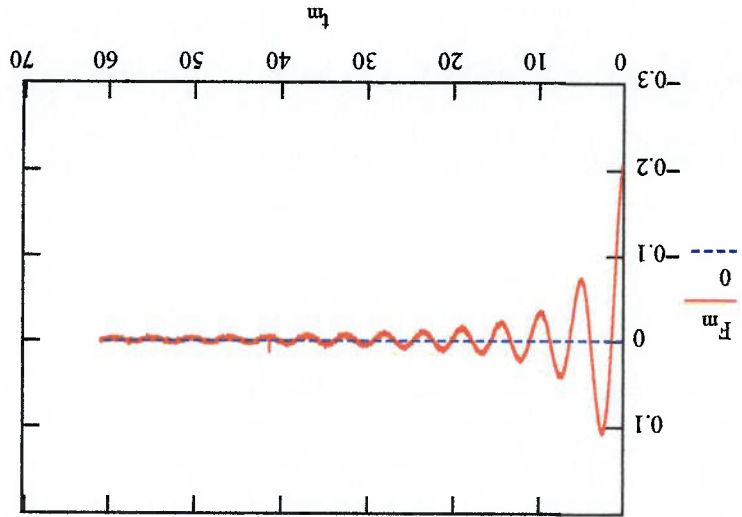
Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=617 representa o instante inicial

$Np := 617$
 $j := Np..B - 1$

$F_{j-Np}^{(1)} := Ac^{(0)}(j) - Ac^{(0)}(Np)$
 $F_{j-Np}^{(1)} := Ac^{(1)}(j) + 0.00526123$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.2$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.30 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{N/m} = 28.25$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07$ m

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_B - Np - 1 \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

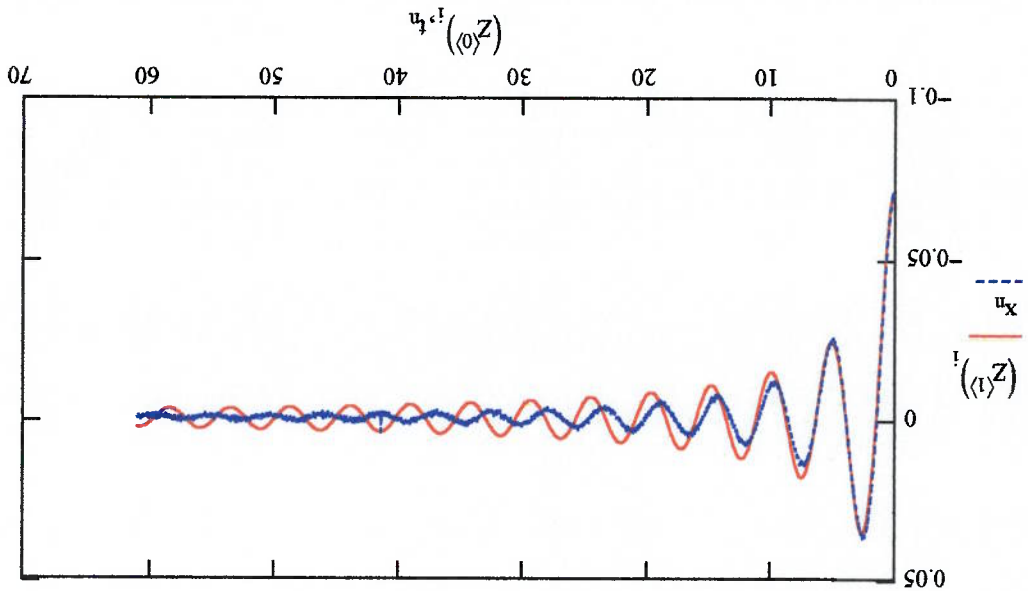
Coefficiente de amortecimento bl obtido da resolução analítica

$$bl2 := 9.86$$

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} -[bl2 \cdot y_1] - [y_1 \cdot y_1] \\ y_1 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

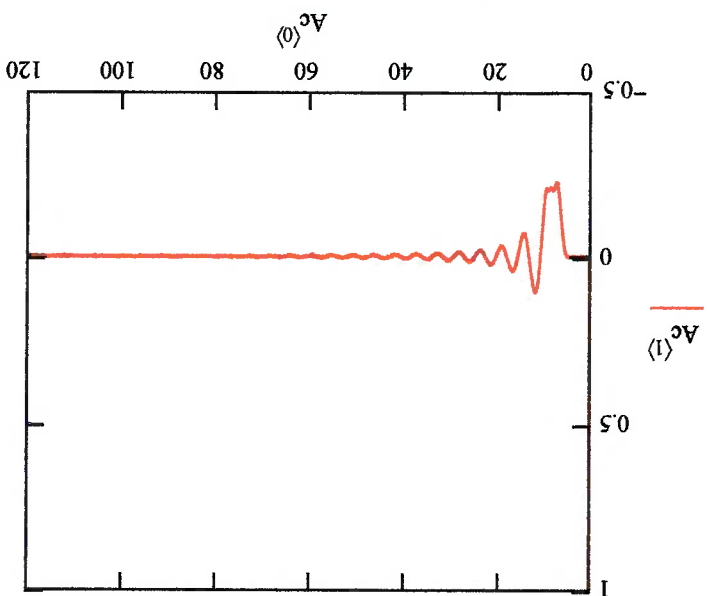
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, filtrado com tirantes (Sott)

Ac :=  C:\Sott3a.dat (Sott3.qd)

comprimento do vetor $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 7.68 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=592 representa o instante inicial

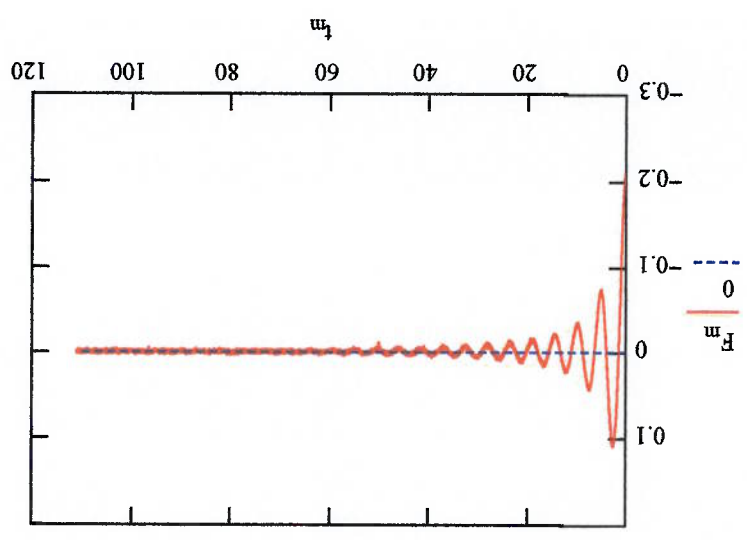
$Np := 592$
 $j := Np..B - 1$

$$F_{j-Np}^{(1)} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$$

$$F_{j-Np}^{(1)} := (Ac^{(1)})_j + 0.00526123$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.21$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.31 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 0.980} \text{ N/m}$$

$$k = 29.18$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

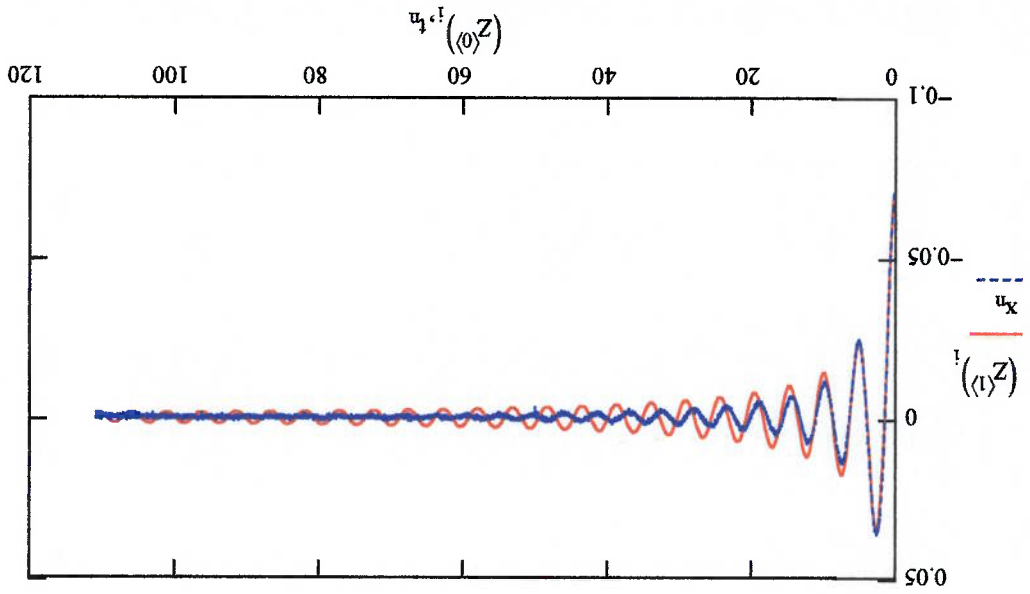
$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$bL2 := 10.15$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL2 \cdot |y_1| \cdot y_1] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática

Aquisição dos dados de movimento rotacional no momento, esmiuado com tirantes (Sorr)

Ac :=



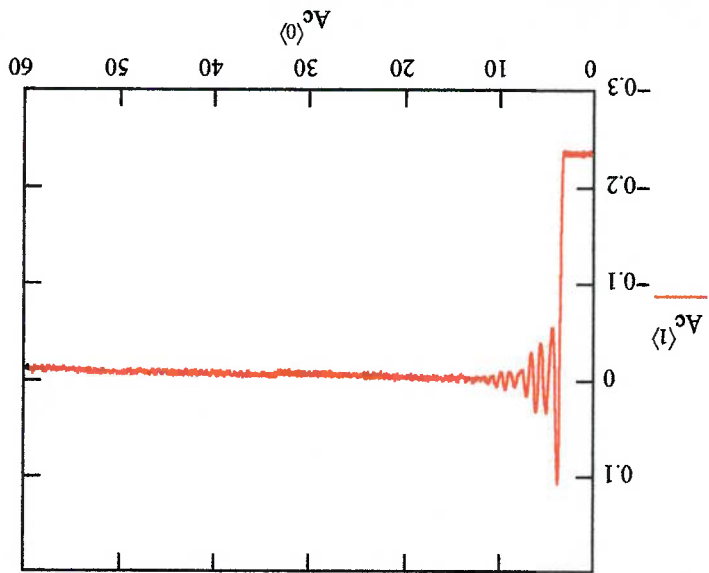
C:\Sorr06.txt

(Sorr.qd)

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>)

B = 1.2 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=64 representa o instante inicial

Np := 64

j := Np..B - 1

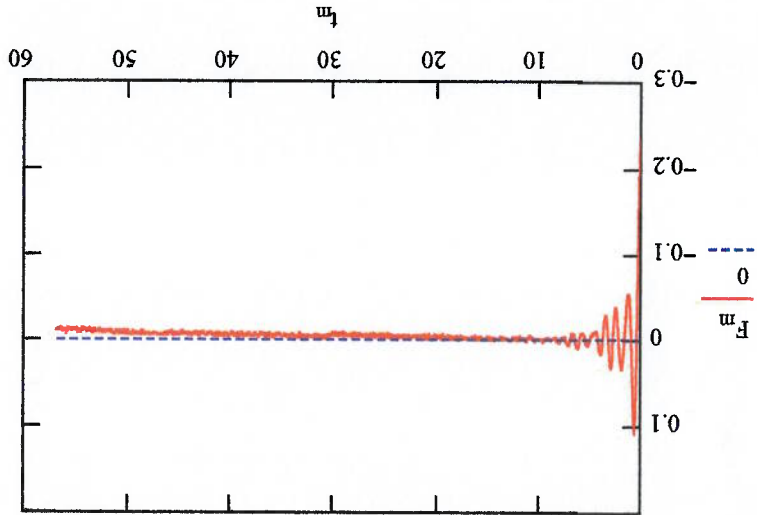
t_{j-Np} := (Ac<0>)_j - (Ac<0>)_{Np}

F_{j-Np} := (Ac<1>)_j + 0.00

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

m := 0..B - Np

F₀ = -0.23



frequência natural (obtida da análise anterior)

$\omega_n := 5.23 \text{ rad/s}$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 0.980} \text{ N/m}$$

$k = 32.81$

$n := 0..B - Np - 1$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

$L := 0.265$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_B - Np - 1 \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

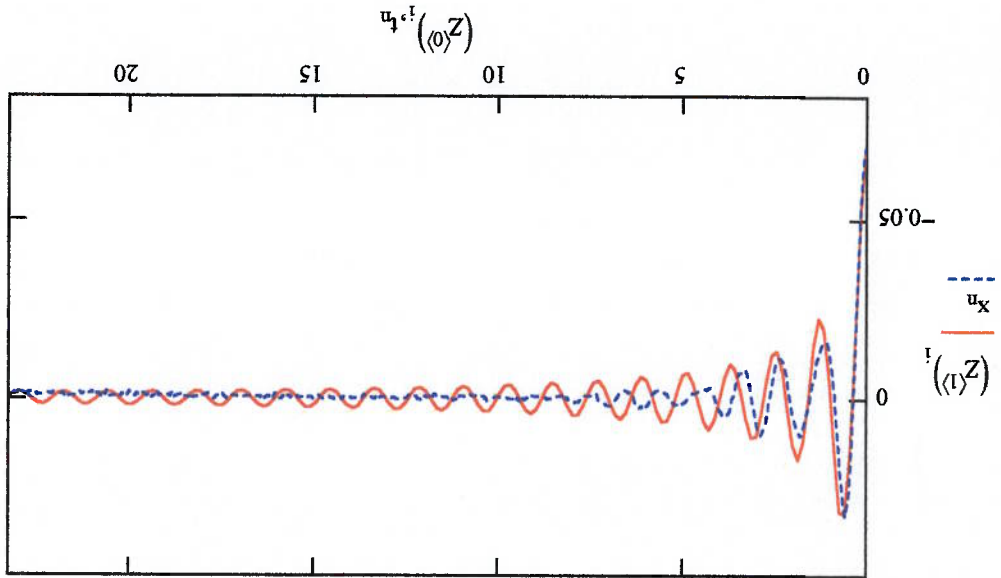
Coefficiente de amortecimento bl obtido da resolução analítica

$bl2 := 10.95$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -bl2 \cdot (|y_1| \cdot y_1) - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

$Z := \text{rkfixed}(y, A, A1, 400, D)$

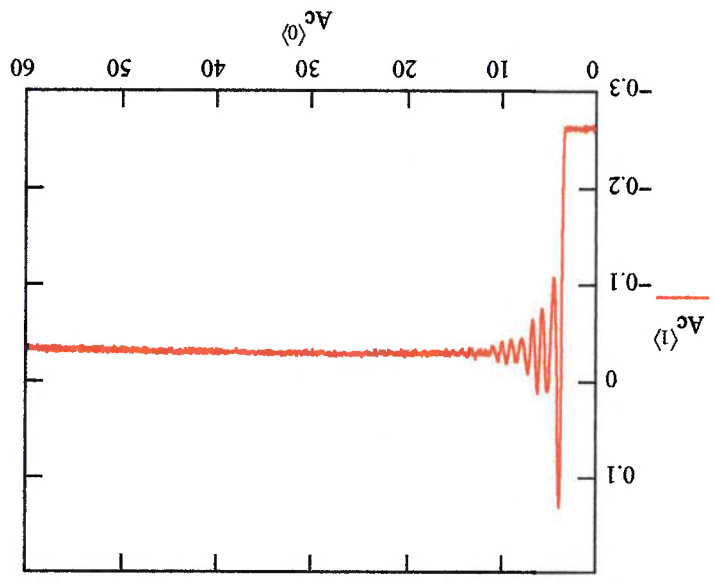
$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento rotacional do modelo, estrado com tirantes (Sorr)

```
Ac :=
C:\Sorr07.txt
(Sorr_qd)
```

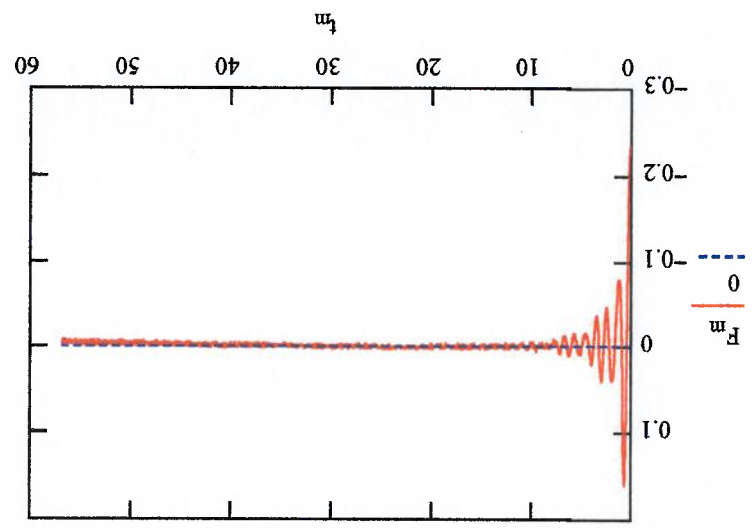
comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 1.2 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até $j=64$ representa o instante inicial

```
Np := 64
j := Np..B - 1
tj-Np := (Ac<sup>(0)</sup>)_j - (Ac<sup>(0)</sup>)_Np
Fj-Np := (Ac<sup>(1)</sup>)_j + 0.0276569
```

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero
 $F_0 = -0.23$
 $m := 0..B - Np$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 5.15 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \text{ N/m}$$

$$k = 32.87$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

$$F_n := 9.8$$

$$L := 0.265$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} 0 \\ x_0 \end{pmatrix}$$

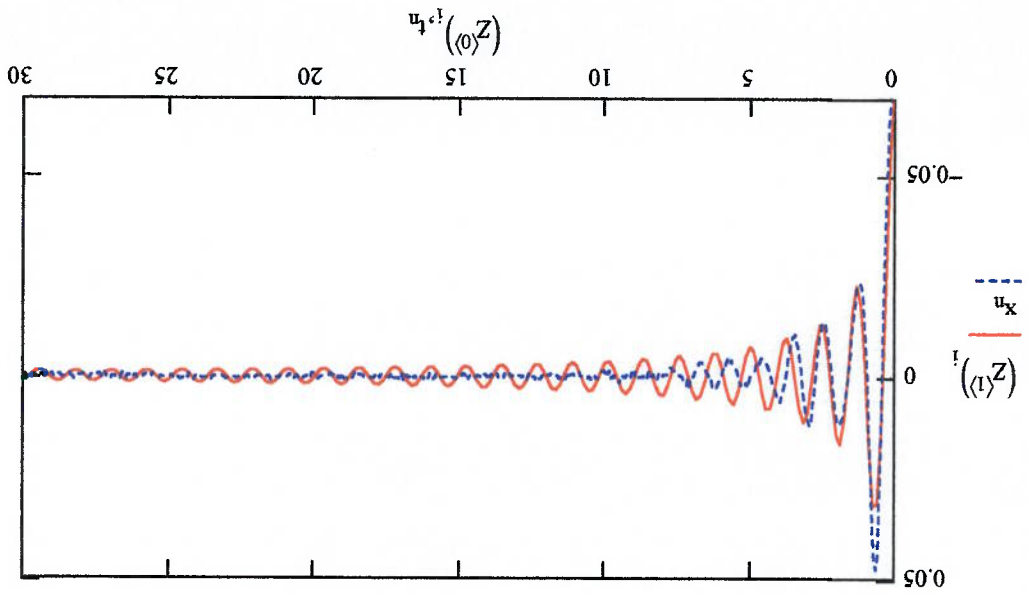
Coefficiente de amortecimento bl obtido da resolução analítica

$$bl2 := 10.95$$

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} -[bl2 \cdot |y_1| \cdot y_1] - \omega_n^2 \cdot y_0 \\ y_1 \end{bmatrix}$$

$$Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)$$

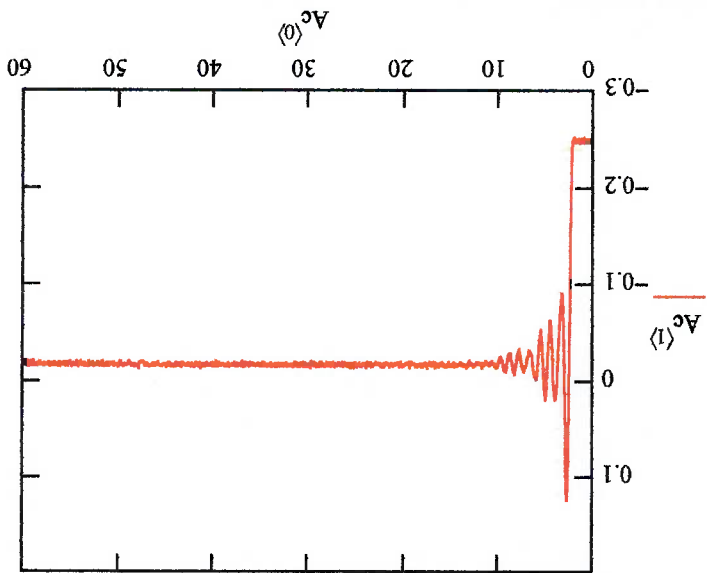
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a aproximação quadrática
 Aquisição dos dados do movimento rotacional do modelo, estrado com tirantes (Sorr)

Ac :=
 C:\Sorr08.txt
 (Sorr_qd)

comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 1.2 \times 10^3$



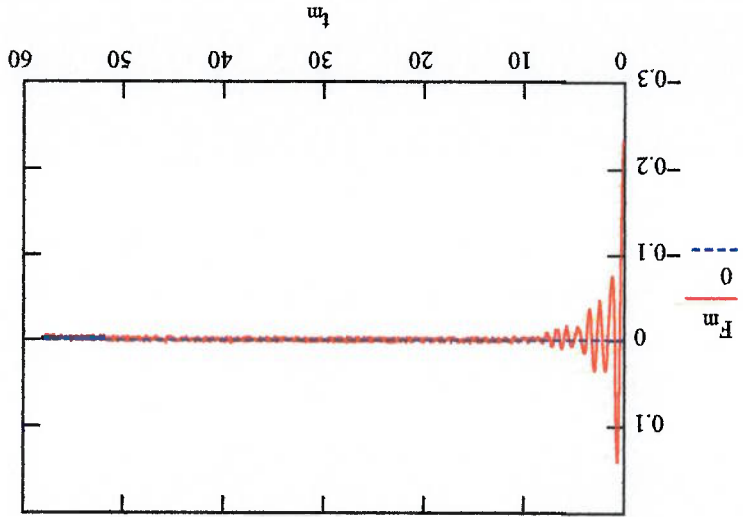
Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=39 representa o instante inicial

$Np := 39$
 $j := Np..B - 1$
 $t_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$

$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j + 0.015$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.233$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 5.25 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$$k = 32.592$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

$$L := 0.265$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A_1 := t_{B-Np-1} \quad A := t_0$$

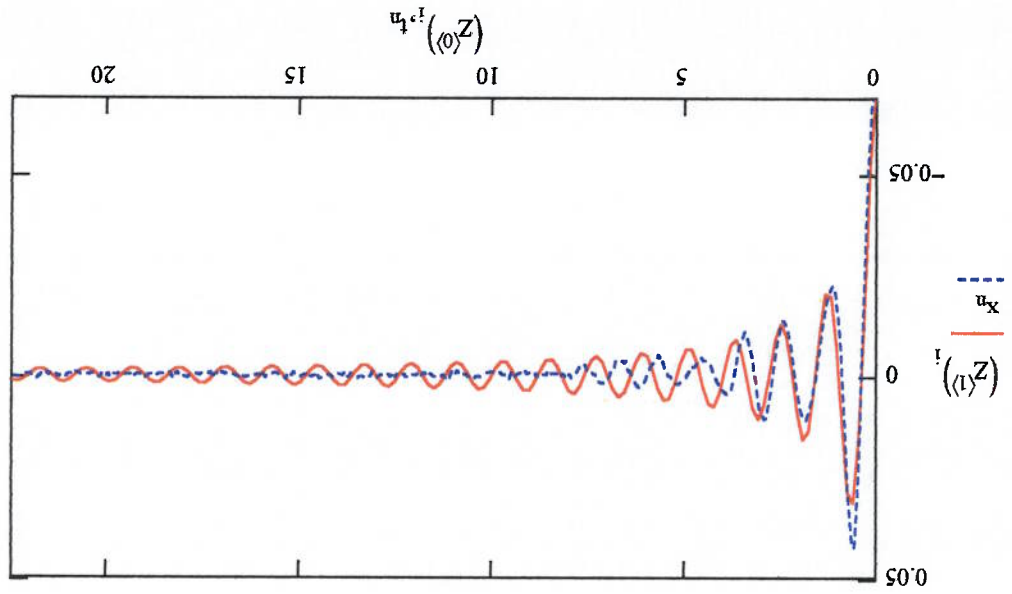
Coefficiente de amortecimento obtido da resolução analítica

$$bL2 := 11.74$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} -[bL2 \cdot |y_1| \cdot y_1] - \omega_n^2 \cdot y_0 \\ y_1 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



DADOS DA ANÁLISE DO AMORTECIMENTO USANDO A COMBINAÇÃO
DAS FORMAS DE APROXIMAÇÃO LINEAR E QUADRÁTICA.

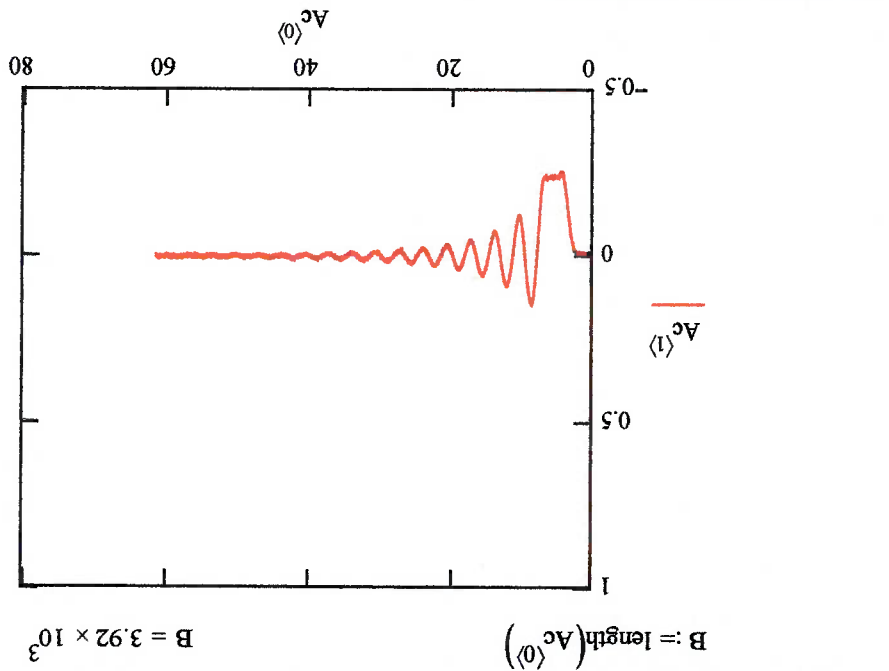
APÊNDICE V

SUMÁRIO

| | |
|----|---|
| 01 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT4 |
| 03 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT5 |
| 05 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação longitudinal para o ensaio SOLT6 |
| 07 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação vertical para o ensaio SOVI |
| 09 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação vertical para o ensaio SOV2 |
| 11 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação vertical para o ensaio SOV3 |
| 13 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação transversal para o ensaio SOTT1 |
| 15 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação transversal para o ensaio SOTT2 |
| 17 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação transversal para o ensaio SOTT3 |
| 19 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR6 |
| 21 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR7 |
| 23 | Análise do amortecimento usando a combinação das formas de aproximação linear e quadrática na movimentação rotacional de rumo para o ensaio SORR8 |

Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrado com tirantes (Solt)

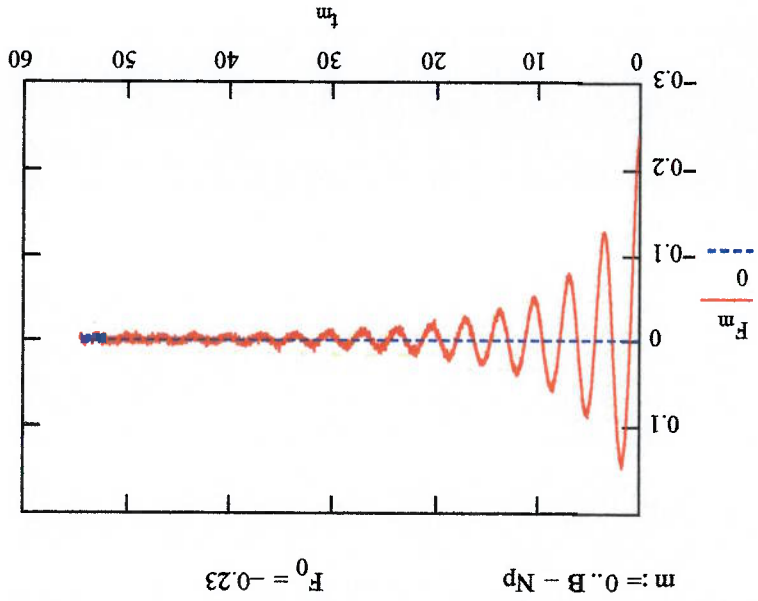
Ac :=  C:\Solt4.dat
 comprimento do vetor B := length(Ac) $B = 3.92 \times 10^3$
 (Solt4_lq)



$$F_{j-Np} := (Ac_{(0)})_j - (Ac_{(0)})_{Np}$$

$$F_{j-Np} := (Ac_{(1)})_j - 0.005$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero



frequência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.84 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 980} \text{ N/m}$$

$$k = 32.56$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

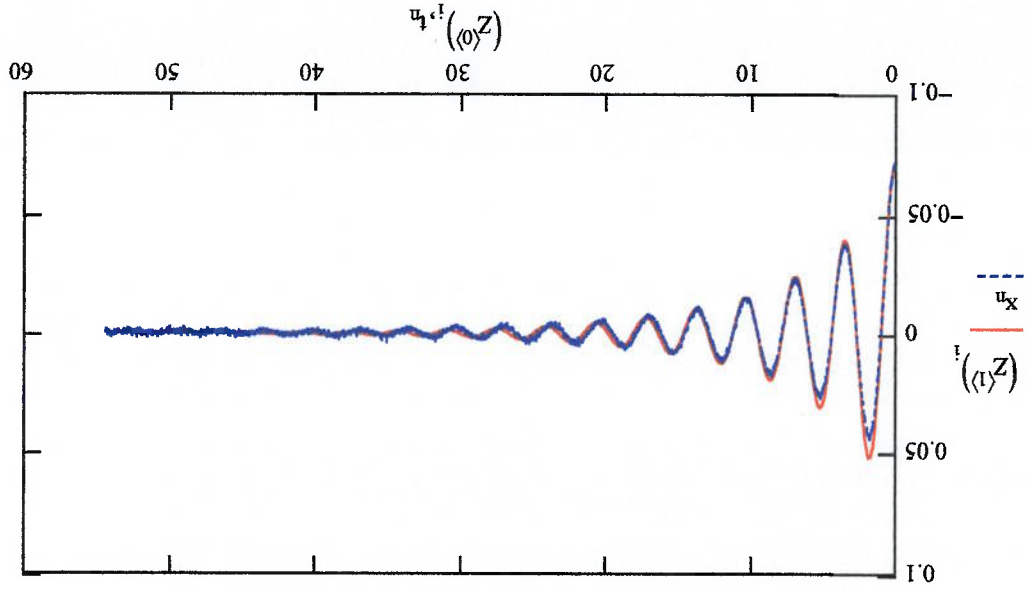
$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad A := t_0$$

$$bL1 := 0.22 \quad bL2 := 1.40$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

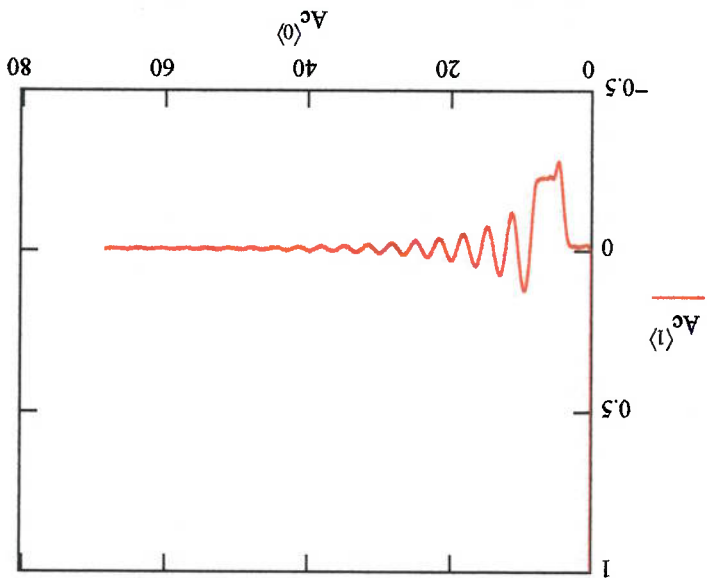
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrurado com tirantes (Solt)

Ac :=
 C:\Solt5a.dat
 (Solt5_lq)

comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 4.36 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=498 representa o instante inicial

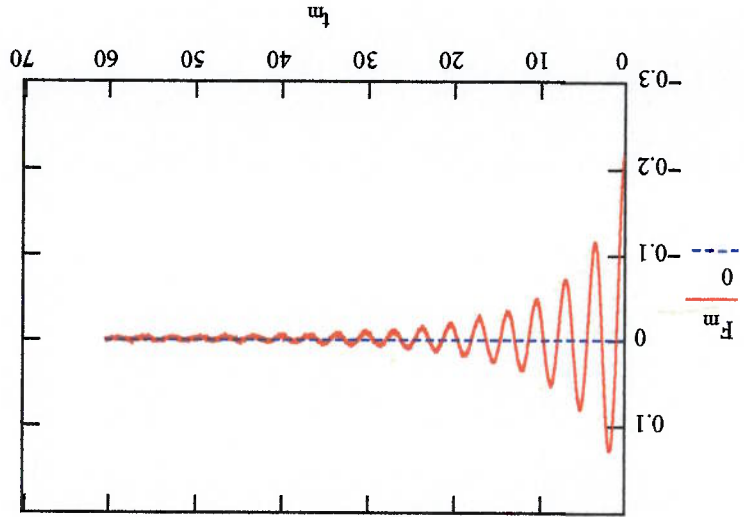
$Np := 498$

$j := Np..B - 1$

$F_{j-Np}^{(0)} := Ac^{(0)}(j) - Ac^{(0)}(Np)$
 $F_{j-Np}^{(1)} := Ac^{(1)}(j) + 0.0042969$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.22$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.84 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 0.980} \text{ N/m}$$

$$k = 30.24$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

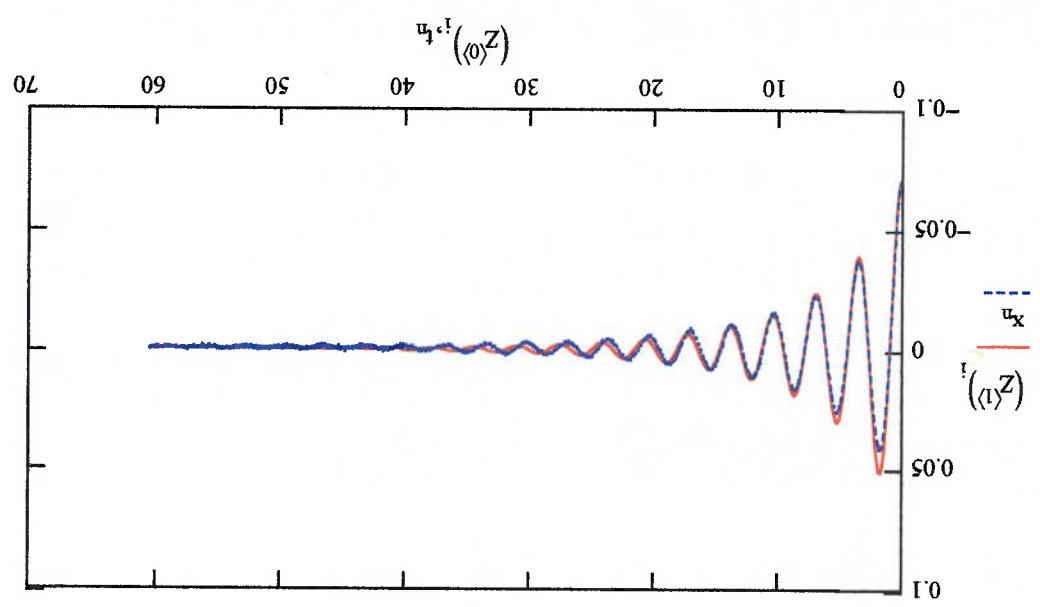
$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A1 := t_{B-Np-1}$$

$$bL1 := 0.22 \quad bL2 := 1.50$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

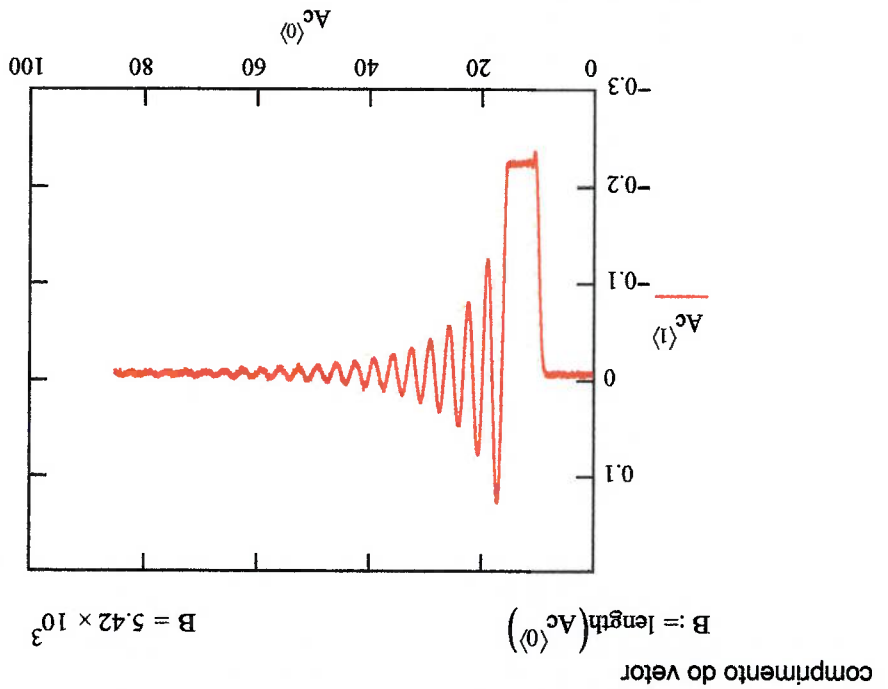
Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento longitudinal do modelo, estrurado com tirantes (Solt)

Ac :=
 C:\Solt6a.dat
 (Solt6_lq)



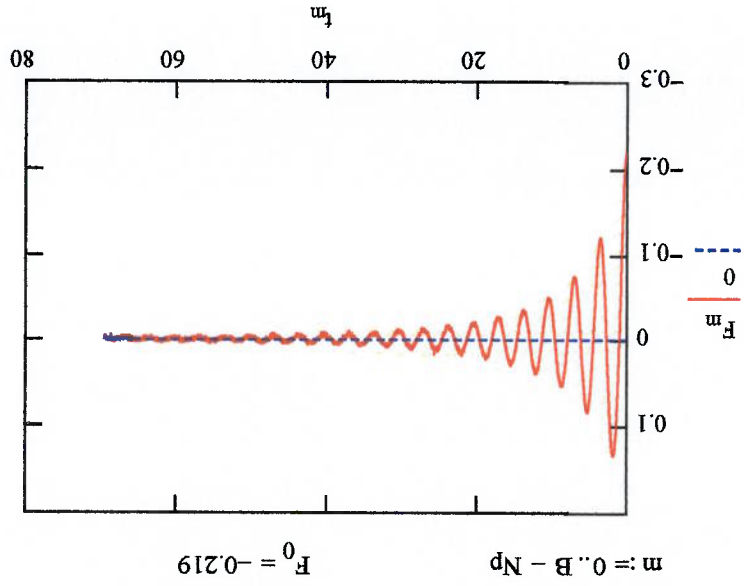
Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=978 representa o instante inicial

Np := 978
 j := Np..B - 1

$$F_{j-Np} := Ac<0>_j - Ac<0>_{Np}$$

$$F_{j-Np} := Ac<1>_j + 0.0042969$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.82 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{L} \text{ N/m}$$

$$k = 30.63$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$F_n := 9.8$$

$$x_n := \frac{k}{F_n}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

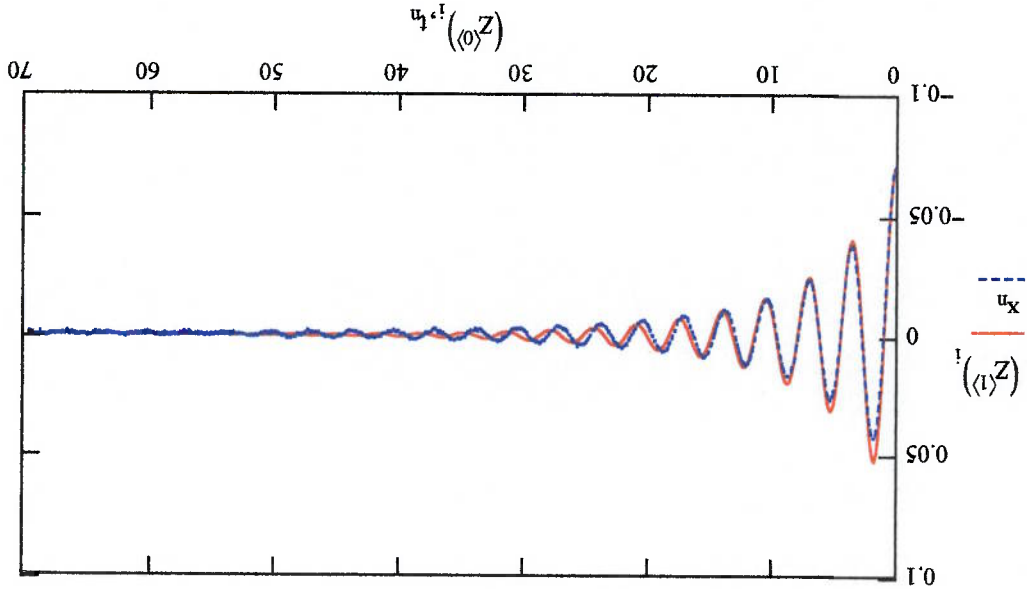
$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A1 := t_{B-Np-1}$$

$$B1 := 0.21 \quad B2 := 1.40$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

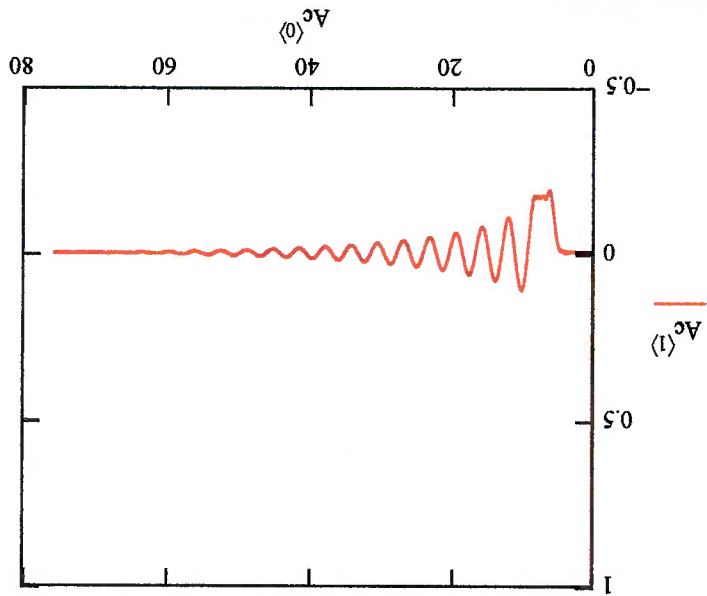
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrado com tirantes (Sov)

Ac :=  C:\Sov1a.dat
 comprimento do vetor $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 (Sov_lq)

$B = 4.837 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=520 representa o instante inicial

$Np := 520$

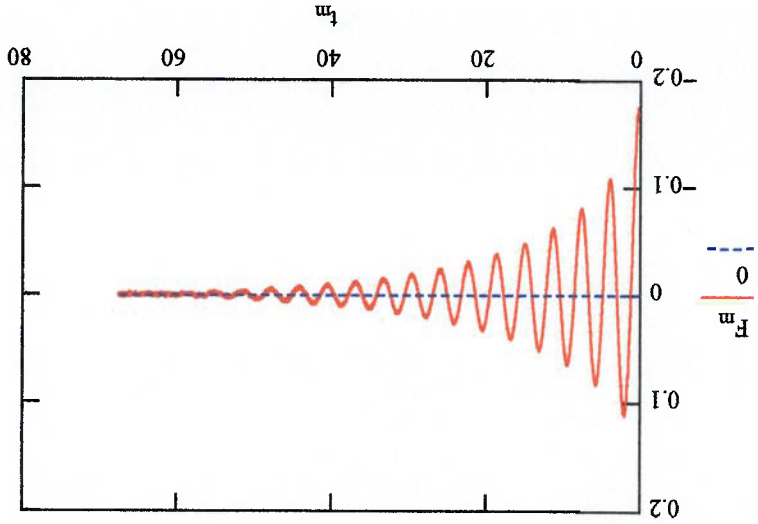
$j := Np..B - 1$

$$F_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$$

$$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j + 0.003$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$ $F_0 = -0.169$



frequência natural (obtida da análise anterior)

$\omega_n := 1.7$ rad/s

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

k = 23,698

n := 0..B - Np - 1

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07$ m

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

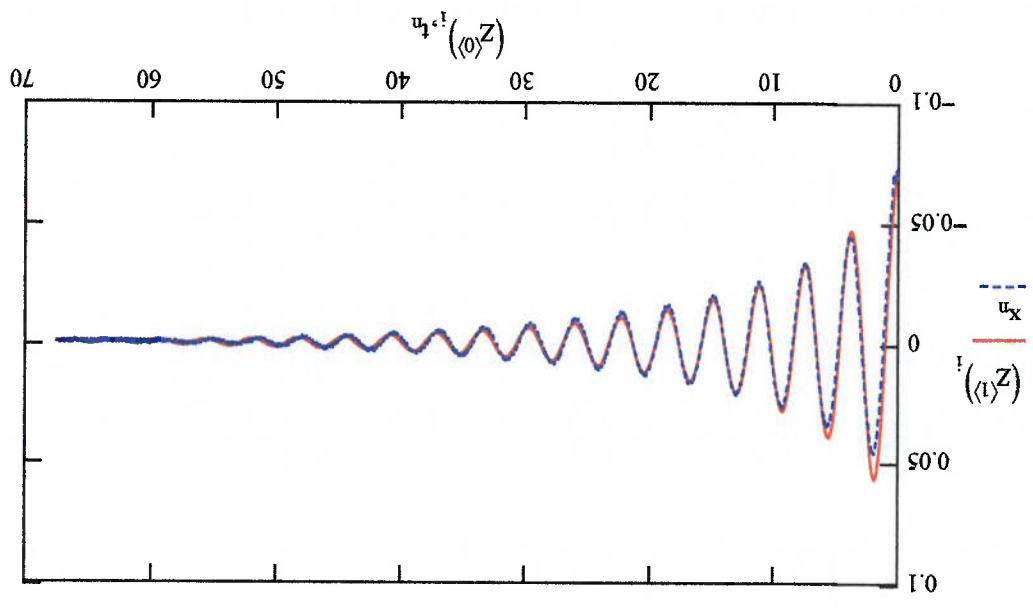
A := t_0 A1 := t_B - Np - 1

bL1 := 0.12 bL2 := 1.19

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

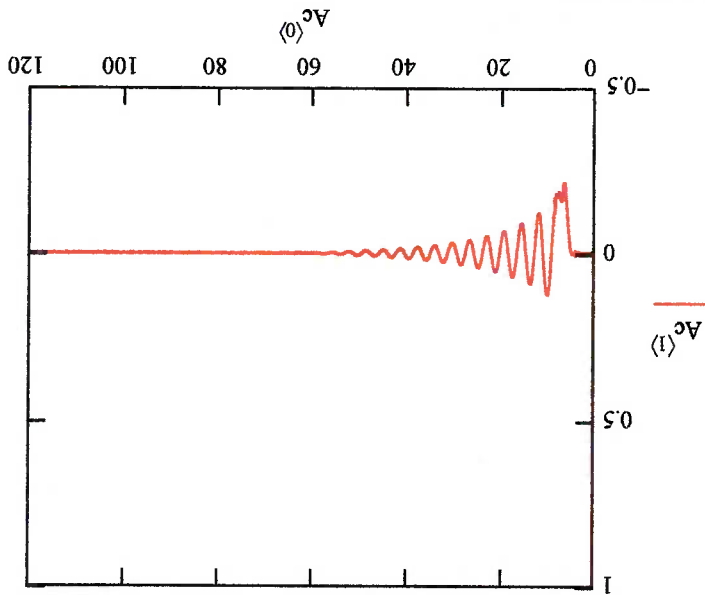
i := 0..400 n := 0..B - Np - 1



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrado com tirantes (Sov)

Ac :=  C:\Sovza.dat (Sov_lq)

comprimento do vetor $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 7.68 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=509 representa o instante inicial

$Np := 509$

$j := Np..B - 1$

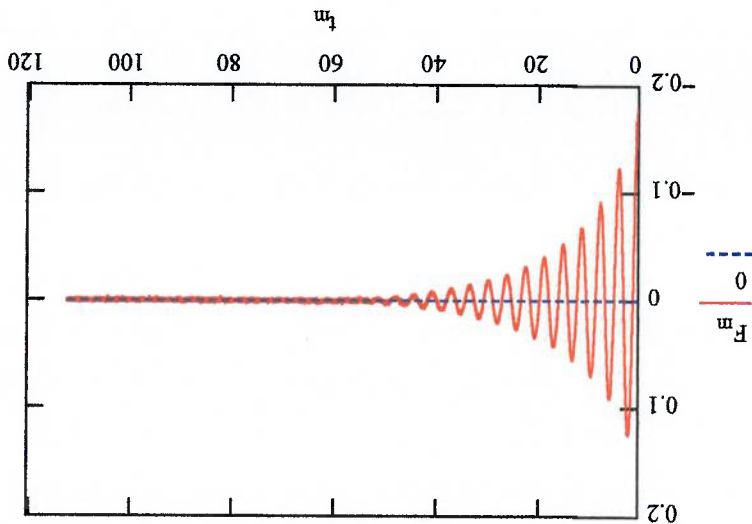
$$t_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$$

$$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j + 0.003$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$

$F_0 = -0.18$



frequência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.69 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 0.980} \text{ N/m}$$

$$k = 24.9$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$F_n := 9.8$$

$$x_n := \frac{k}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

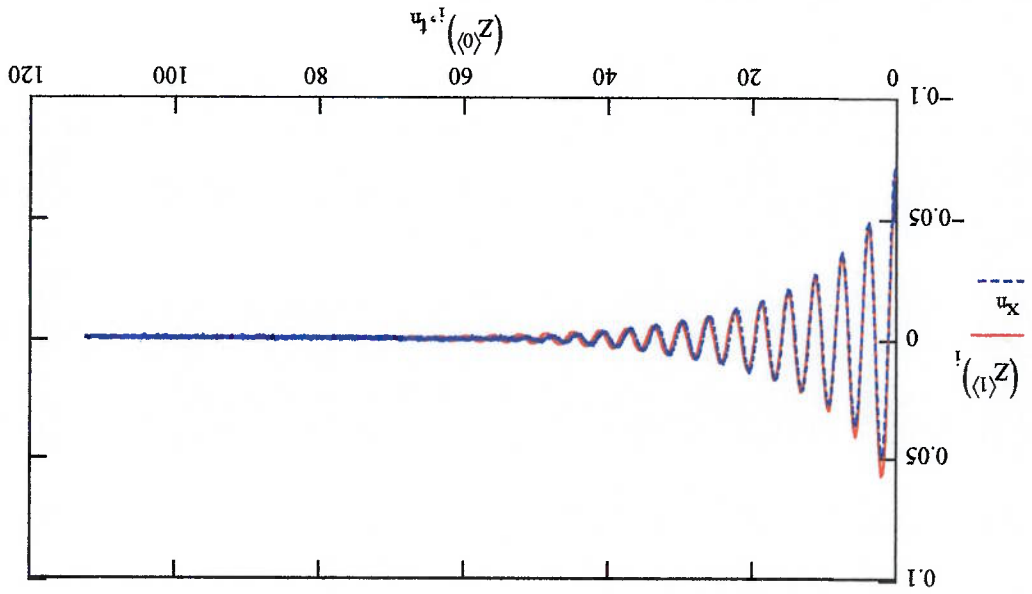
$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$bL1 := 0.12 \quad bL2 := 0.95$$

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

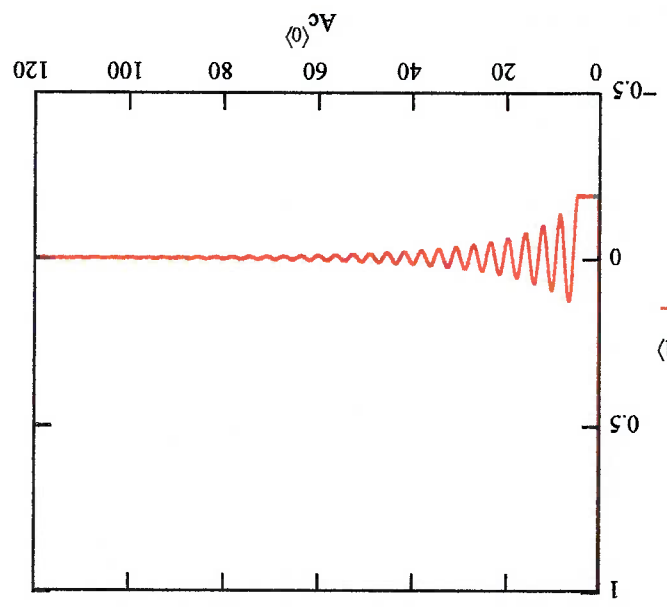
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento vertical do modelo, estrado com tirantes (Sov)

Ac :=  C:\Sov3a.dat (Sov_lq)

comprimento do vetor $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 7.685 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=292 representa o instante inicial

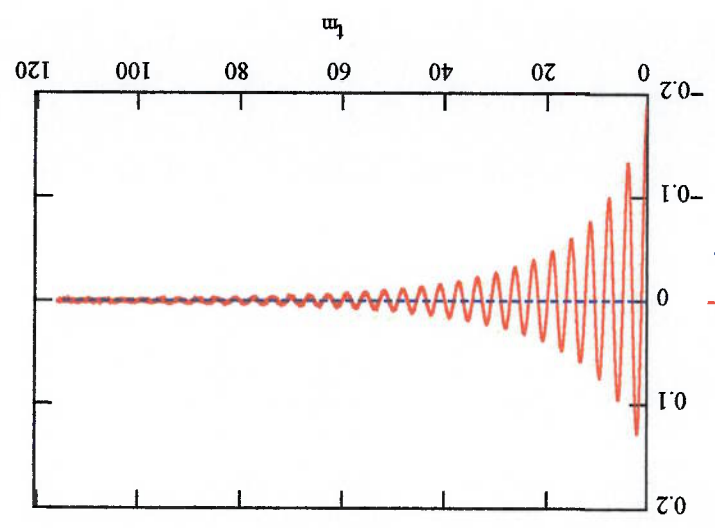
$Np := 292$

$j := Np..B - 1$

$$F_{j-Np}^{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(1)})_j + 0.002$$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.19$



frequência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.71 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$$k = 26.572$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

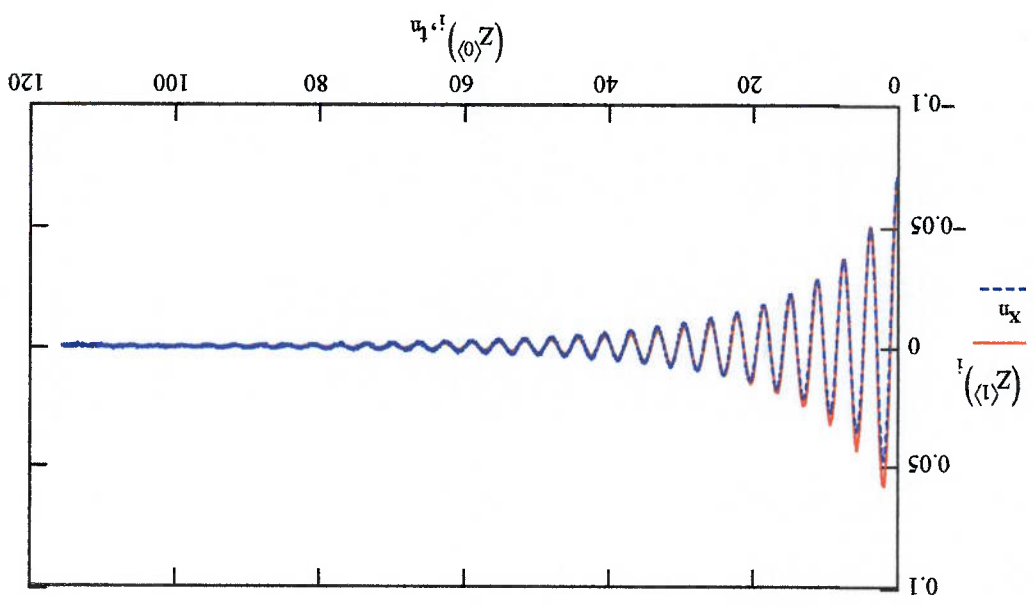
$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad A := t_0$$

$$bL1 := 0.11 \quad bL2 := 0.83$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

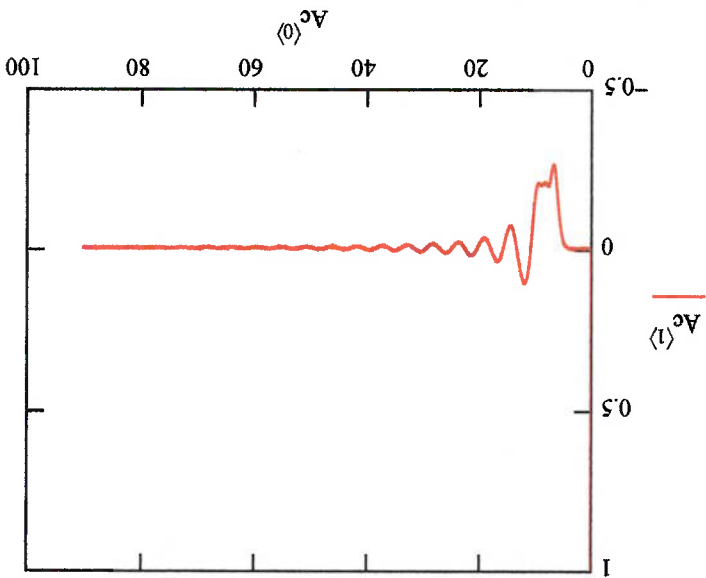
$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estrado com tirantes (Sott)

Ac :=
 C:\Sott1x.dat
 (Sott_lq)

comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 5.76 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=608 representa o instante inicial

$Np := 608$

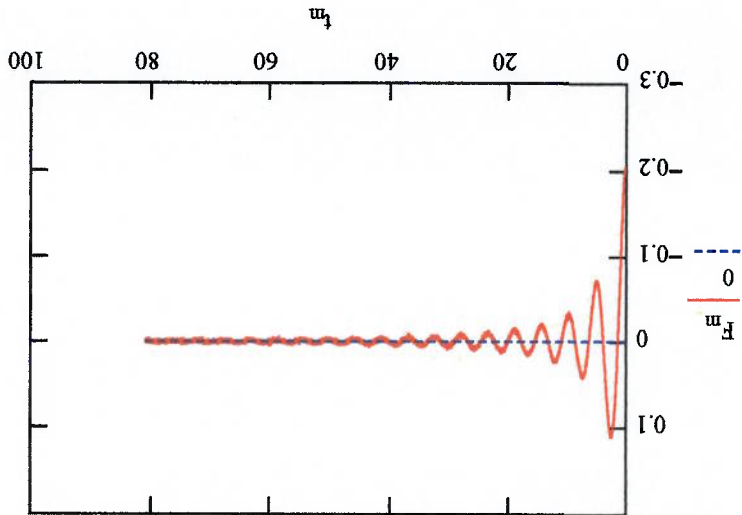
$j := Np..B - 1$

$t_{j-Np} := Ac^{(0)}(j) - Ac^{(0)}(Np)$

$F_{j-Np} := Ac^{(1)}(j) + 0.006$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.2$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$\omega_n := 1.31 \text{ rad/s}$

Cálculo de k

$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$

$k = 28.47$

$n := 0..B - Np - 1$

$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

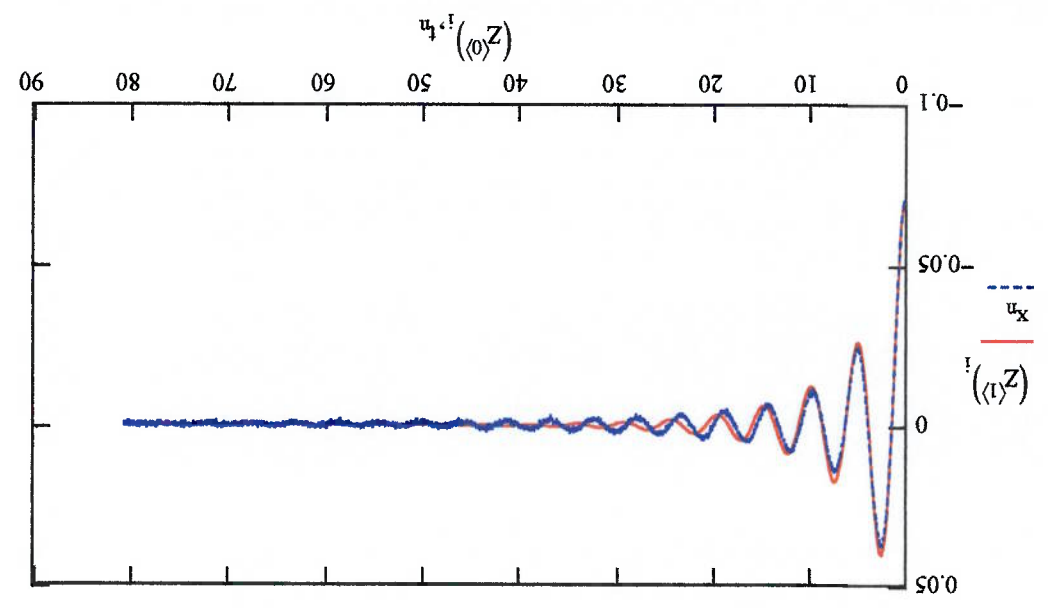
$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1}$
 $y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$

$bL1 := 0.24 \quad bL2 := 3.5$

$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$

$Z := \text{rkfixed}(y, A, A1, 400, D)$

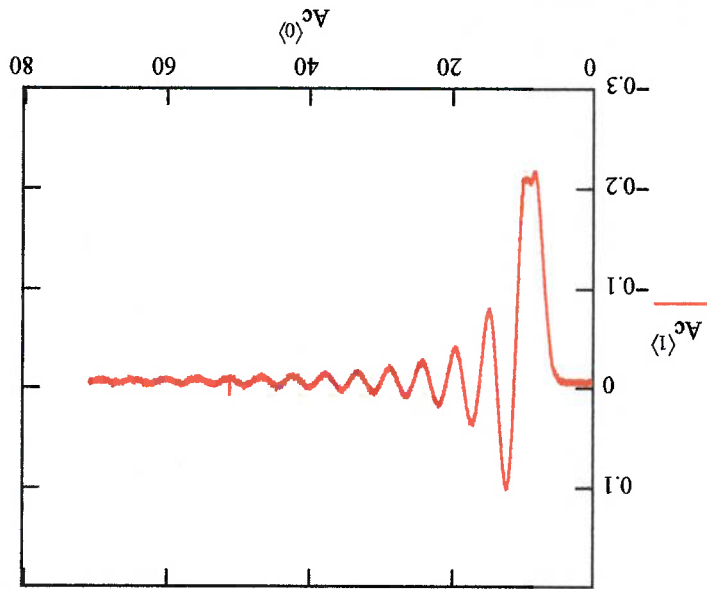
$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estrado com tirantes (Sott)

Ac :=
 C:\Sott2a.dat
 (Sott_lq)

comprimento do vetor
 $B := \text{length}(Ac^{(0)})$
 $B = 4.51 \times 10^3$

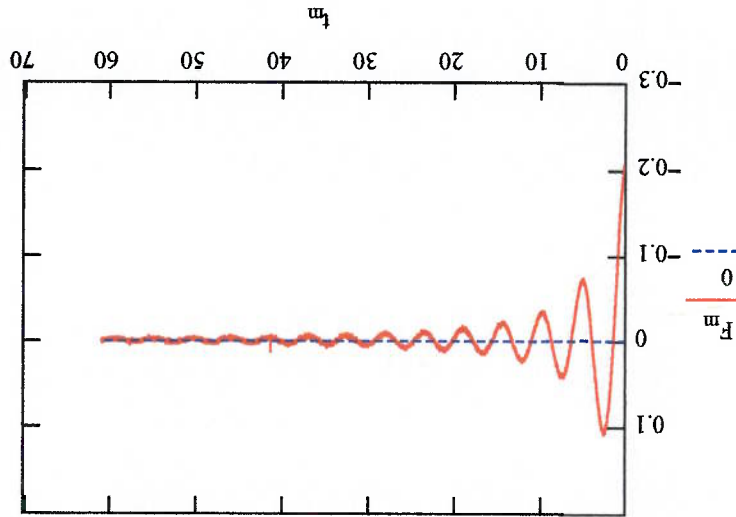


Exclusão dos pontos iniciais
 Até j=617 representa o instante inicial

$Np := 617$
 $j := Np..B - 1$
 $F_{j-Np}^{(1)} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$
 $F_{j-Np}^{(1)} := (Ac^{(1)})_j + 0.00526123$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$
 $F_0 = -0.2$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.30 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{7}{|F_0| \cdot 0.980} \text{ N/m}$$

$$k = 28.25$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$F_n := 9.8$$

$$x_n := \frac{k}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

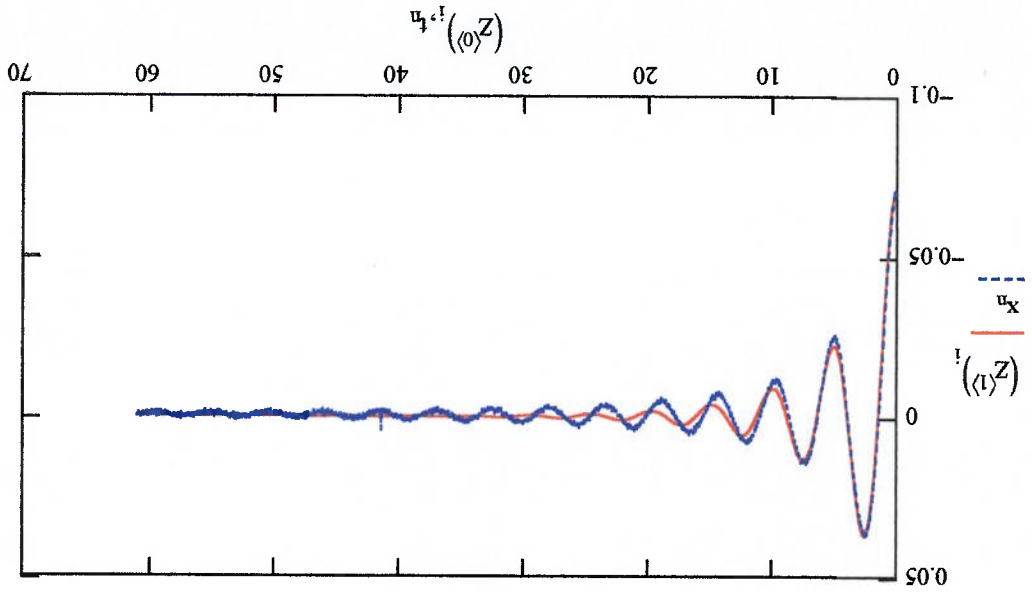
$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} 0 \\ x_0 \end{pmatrix}$$

$$bL1 := 0.32 \quad bL2 := 3.4$$

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



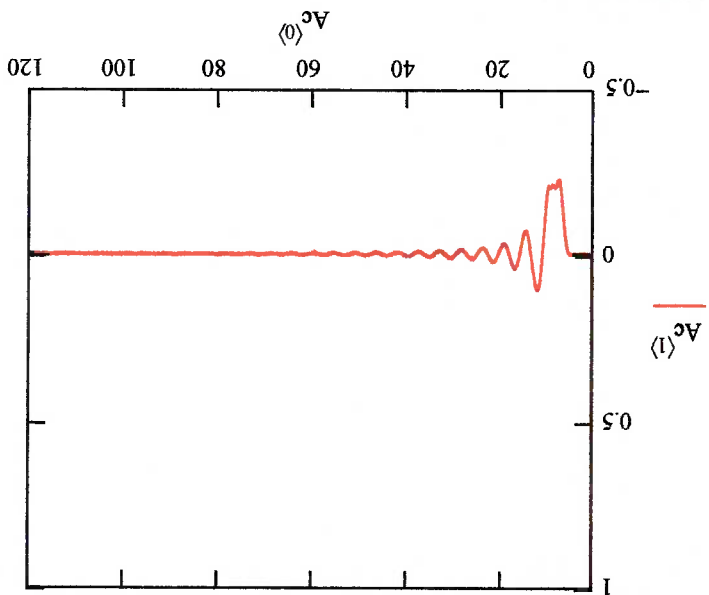
Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento transversal do modelo, estratido com tirantes (Sott)

Ac :=  C:\Sott3a.dat (Sott_lq)

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>)

B = 7,68 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=592 representa o instante inicial

Np := 592

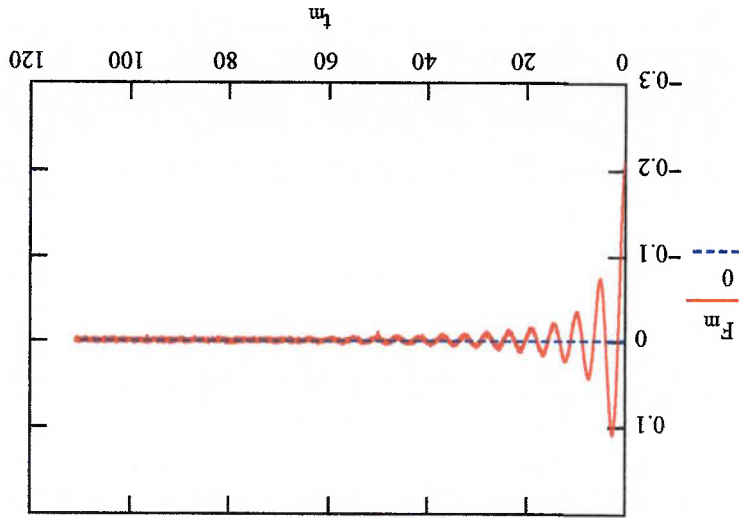
j := Np..B - 1

$F_{j-Np} := \text{Ac}\langle 0 \rangle_j - \text{Ac}\langle 0 \rangle_{Np}$

$F_{j-Np} := \text{Ac}\langle 1 \rangle_j + 0,00526123$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

m := 0..B - Np
 $F_0 = -0,21$



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 1.31 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{L} \text{ N/m}$$

$$k = 29.18$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

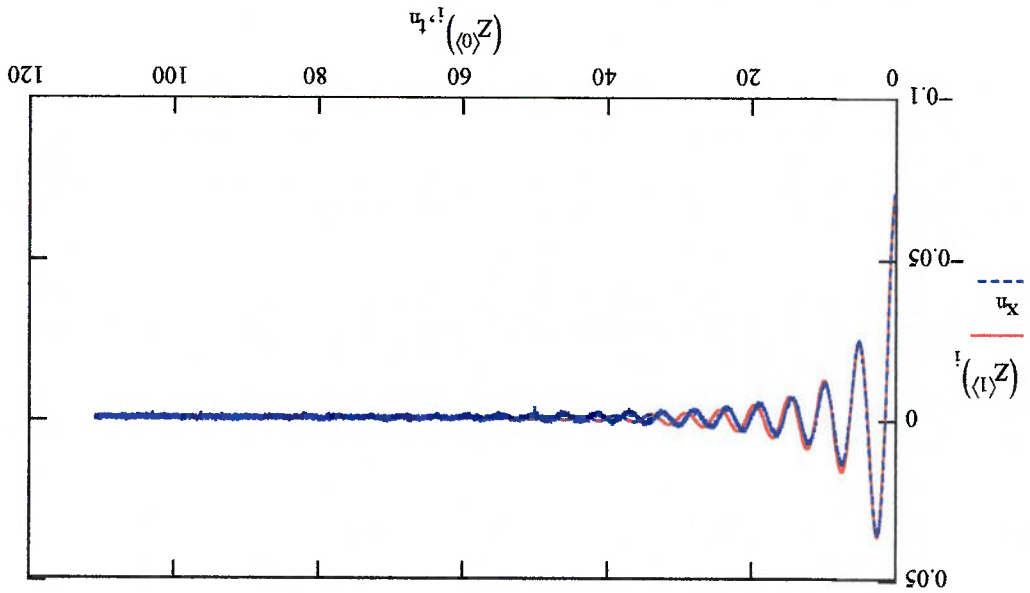
$$A := t_0 \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$bL1 := 0.15 \quad bL2 := 6.5$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



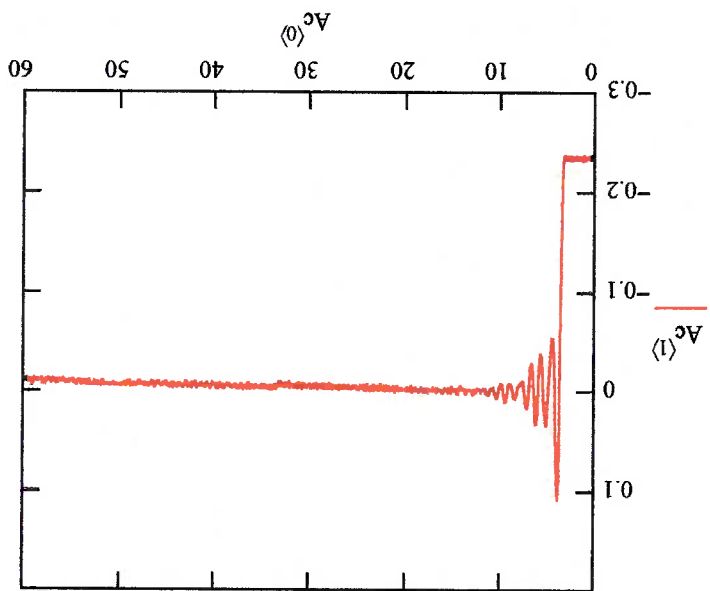
Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento rotacional do modelo, estrado com tirantes (Sorr)

Ac :=  C:\Sorr06.txt (Sorr_lq)

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>)

B = 1.2 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=64 representa o instante inicial

Np := 64

j := Np..B - 1

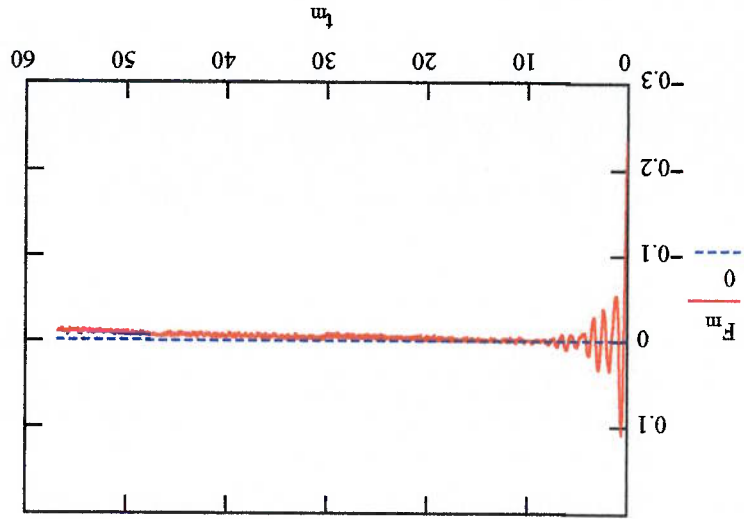
t_{j-Np} := (Ac<0>)_j - (Ac<0>)_{Np}

F_{j-Np} := (Ac<1>)_j + 0.00

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

m := 0..B - Np

F₀ = -0.23



freqüência natural (obtida da análise anterior)

$\omega_n := 5.23 \text{ rad/s}$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$k = 32.81$

$n := 0..B - Np - 1$

$$x_n := \frac{F \cdot 9.8}{k}$$

$L := 0.265$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$
 Velocidade inicial $v_0 = 0$

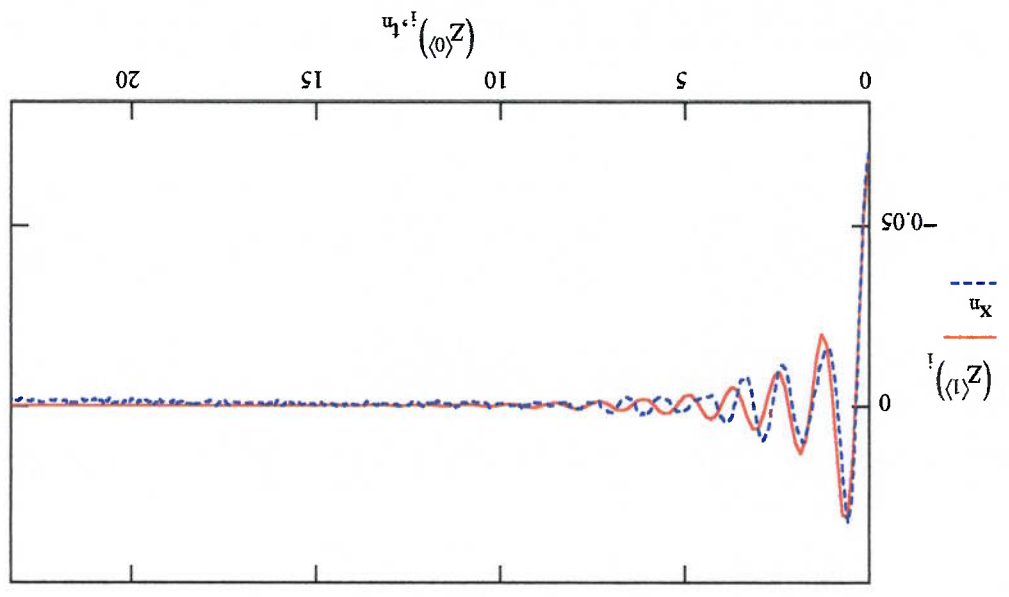
$$y := \begin{pmatrix} 0 \\ x_0 \end{pmatrix} \quad A1 := t_{B-Np-1} \quad A := t_0$$

$bl1 := 0.75 \quad bl2 := 7.9$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bl1 \cdot y_1 + bl2 \cdot (y_1 \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

$Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)$

$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento rotacional do modelo, estrizado com tirantes (Sorr)

Ac :=



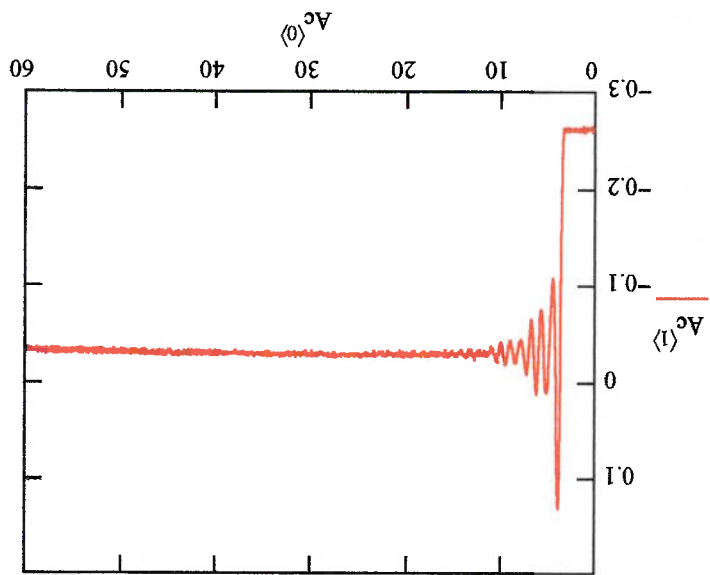
C:\Sorr07.txt

(Sorr_lq)

comprimento do vetor

B := length(Ac<0>)

B = 1.2 × 10³



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=64 representa o instante inicial

Np := 64

j := Np..B - 1

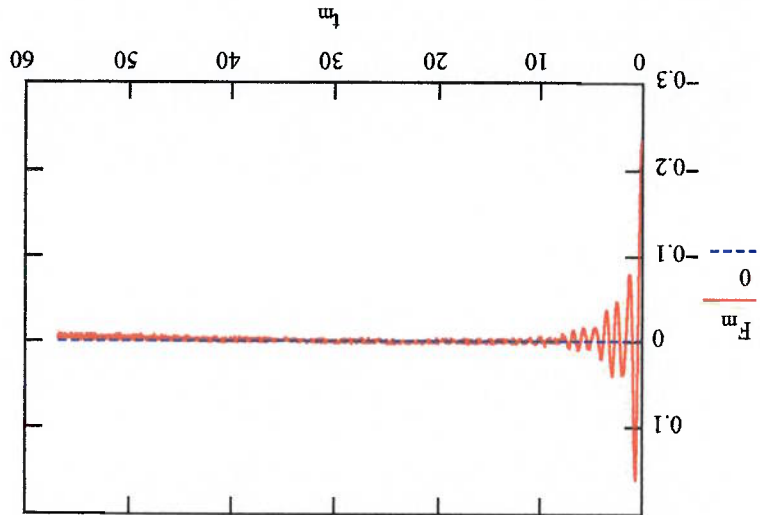
t_{j-Np} := (Ac<0>)_j - (Ac<0>)_{Np}

F_{j-Np} := (Ac<1>)_j + 0.0276569

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

m := 0..B - Np

F₀ = -0.23



frequência natural (obtida da análise anterior)

$\omega_n := 5.15 \text{ rad/s}$

Cálculo de k

$$k := \frac{|F_0| \cdot 980}{7} \text{ N/m}$$

$k = 32.87$

$n := 0..B - Np - 1$

$$x_n := \frac{F_n \cdot 9.8}{k}$$

$L := 0.265$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

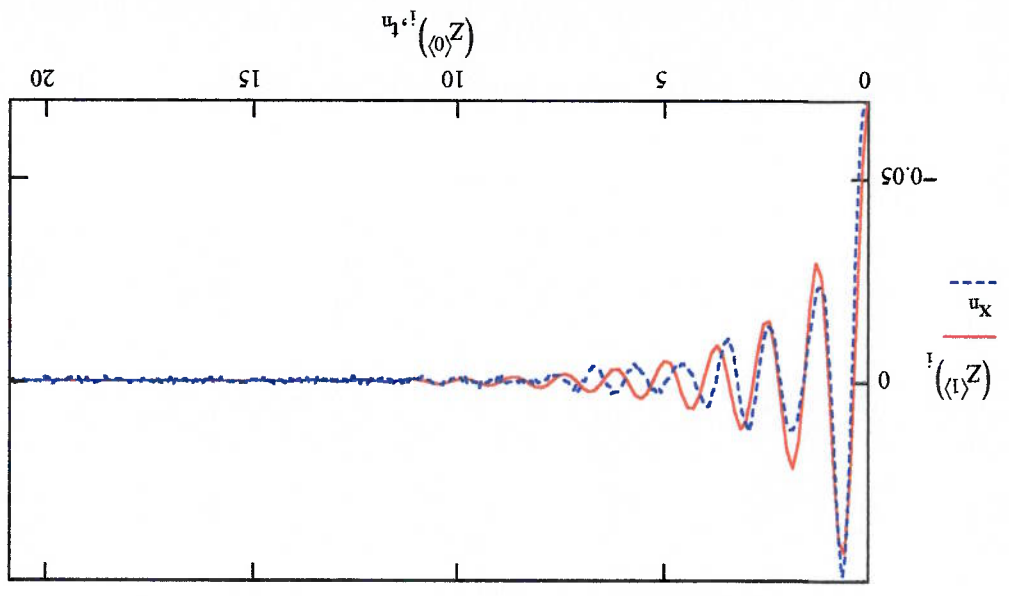
$$y := \begin{pmatrix} 0 \\ x_0 \end{pmatrix} \quad A_1 := t_{B-Np-1} \quad A := t_0$$

$bL1 := 0.75 \quad bL2 := 3.2$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[bL1 \cdot y_1 + bL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

$Z := \text{rkfixed}(y, A, A1, 400, D)$

$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$



Análise da massa adicional usando a combinação linear + quadrático
 Aquisição dos dados do movimento rotacional do modelo, estrado com tirantes (Sorr)

Ac :=



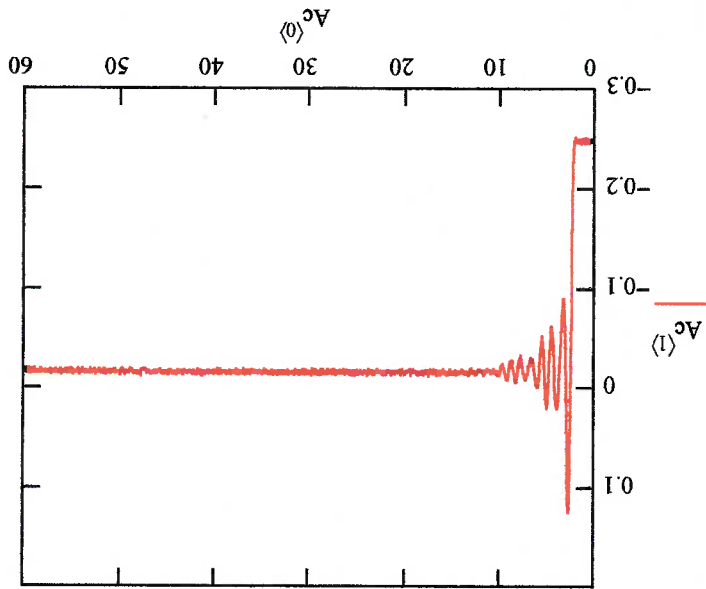
C:\Sorr08.txt

(Sorr_lq)

comprimento do vetor

$B := \text{length}(Ac^{(0)})$

$B = 1.2 \times 10^3$



Exclusão dos pontos iniciais

Até j=39 representa o instante inicial

$Np := 39$

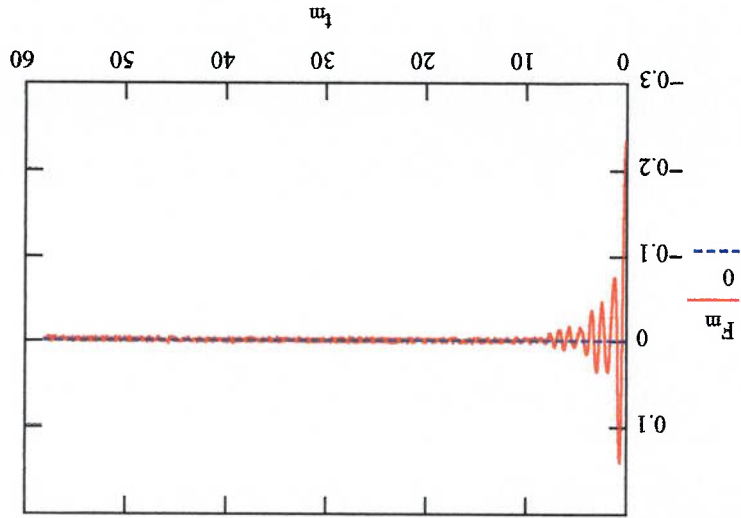
$j := Np..B - 1$

$t_{j-Np} := (Ac^{(0)})_j - (Ac^{(0)})_{Np}$

$F_{j-Np} := (Ac^{(1)})_j + 0.015$

cauda no zero = ajuste do eixo y em zero

$m := 0..B - Np$ $F_0 = -0.233$



frequência natural (obtida da análise anterior)

$$\omega_n := 5.25 \text{ rad/s}$$

Cálculo de k

$$k := \frac{F_0}{\Delta} \quad \text{N/m}$$

$$k = 32.592$$

$$n := 0..B - Np - 1$$

$$x_n := \frac{F_n}{k}$$

$$F_n \cdot 9.8$$

$$L := 0.265$$

"Resolução numérica via Runge-Kuta

Posição inicial $x_0 = -0.07 \text{ m}$

Velocidade inicial $v_0 = 0$

$$y := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

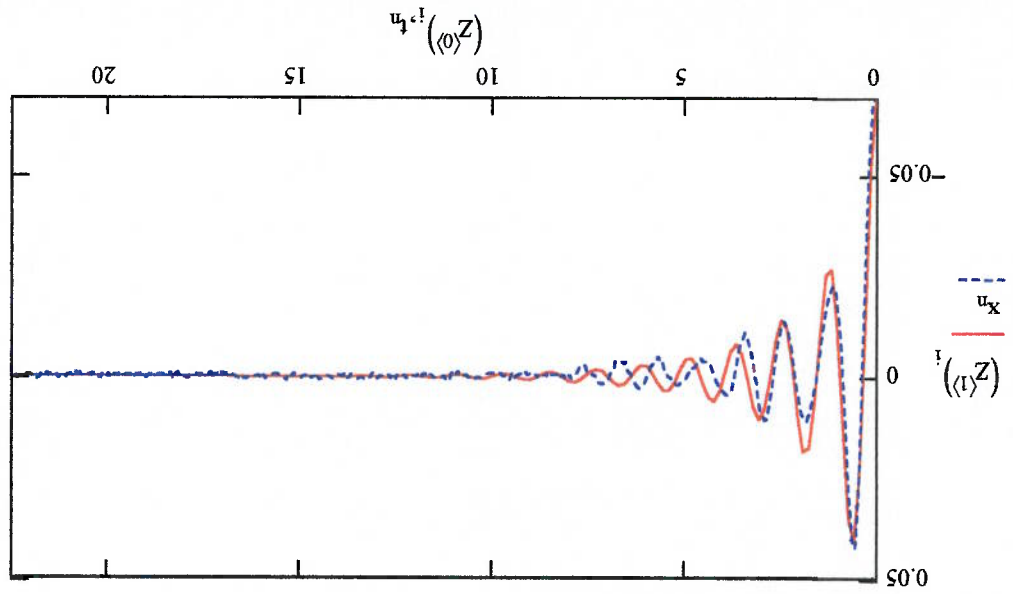
$$A1 := t_{B-Np-1}$$

$$BL1 := 0.75 \quad BL2 := 4.0$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ -[BL1 \cdot y_1 + BL2 \cdot (|y_1| \cdot y_1)] - \omega_n^2 \cdot y_0 \end{bmatrix}$$

Z := rkfixed(y, A, A1, 400, D)

$$i := 0..400 \quad n := 0..B - Np - 1$$



ESTUDO DOS FATORES DE CONVERSÃO DE ESCALA PARA OS
COEFICIENTES DE MASSA E AMORTECIMENTOS ENTRE O MODELO
REDUZIDO E O MODELO REAL DO SUBMERSÍVEL VSN-T-JAÚ I

APÊNDICE VI

SUMÁRIO

| | | |
|----|---|-----|
| 01 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 01 | DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE ESCALA | 2 |
| 01 | Fator de Escala entre o submersível e seu modelo reduzido para os coeficientes de Massa Adicional | 2.1 |
| 02 | Fator de Escala entre o submersível e seu modelo reduzido para o Momento de Inércia | 2.2 |
| 03 | Fator de Escala entre o submersível e seu modelo reduzido para os coeficientes de amortecimento linear dos movimentos de translação | 2.3 |
| 04 | Fator de Escala entre o submersível e seu modelo reduzido para os coeficientes de amortecimento quadráticos do movimento translação | 2.4 |
| 05 | Fator de Escala entre o submersível e seu modelo reduzido para os coeficientes de amortecimento linear do movimento rotacional | 2.5 |
| 06 | Fator de Escala entre o submersível e seu modelo reduzido para os coeficientes de amortecimento quadráticos do movimento rotacional | 2.6 |

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo, objetiva encontrar os respectivos fatores de conversão de escala para os diversos coeficientes de amortecimento viscoso e de massa adicional entre o modelo em escala reduzida do submersível VSNT- Jau I .

2 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE ESCALA

2.1 Fator de Escala entre o submersível real e seu modelo reduzido para os coeficientes de Massa Adicional

De acordo com o relatório contido no Anexo I, a relação entre as dimensões do Submersível real e seu modelo em escala reduzida é de 1 para 2,5 ($N = 2,5$), logo a relação entre o comprimento do submersível real (L_r) e o comprimento do modelo em escala (L_E), é dado pela expressão:

$$(2.1) \quad L_r = N.L_E$$

Da mesma forma, a relação entre seus volumes será:

$$(2.2) \quad (L_r)^3 = (N)^3.(L_E)^3$$

Sendo a densidade (ρ), a relação entre massa (M) e volume (L^3), tem-se:

$$(2.3) \quad \frac{\rho_r}{\rho_E} = \frac{M_r / (L_r)^3}{M_E / (L_E)^3}$$

logo:

$$(2.4) \quad \frac{M_R}{M_E} = \frac{(L^R)^3}{(L^E)^3}$$

ou ainda que:

$$(2.5) \quad \frac{M_R}{M_E} = \frac{(L^R)^3 \cdot (N^E)^3}{(L^E)^3}$$

portanto, a relação entre massas do submersível real e do seu modelo em

escala será:

$$(2.6) \quad M_R = N^3 M_E$$

2.2 Fator de Escala entre o submersível real e seu modelo reduzido

para o Momento de Inércia.

Tendo que o Momento de Inércia (I) é dado por:

$$(2.7) \quad I = M \cdot r^2$$

sendo r o braço

Tomando por base a equação (2.6), tem-se

$$(2.8) \quad r_R = r_E \cdot N$$

Substituindo as equações (2.6) e (2.8) em (2.7) tem-se que a relação será:

$$(2.9) \quad I_R = I_E \cdot N^5$$

2.3 Fator de Escala entre o submersível real e seu modelo reduzido

para os coeficientes de amortecimento lineares dos movimentos

de translação.

Para o caso de forças, podemos construir uma grandeza adimensional dada

por:

$$(2.10) \quad F = \frac{1}{2} \rho V^2 L^2$$

onde:

$$(2.11) \quad V = \sqrt{gL}$$

Assim, considerando $F = c\dot{x}$

$$(2.12) \quad \frac{1}{2} \rho \sqrt{gL_E} \sqrt{gL_E} L_E^2 = \frac{1}{2} \rho \sqrt{gL_R} \sqrt{gL_R} L_R^2$$

e substituindo a Equação (2.11) em (2.12) obtemos

$$(2.13) \quad \frac{1}{2} \rho \sqrt{gL_E} (L_E)^2 = \frac{1}{2} \rho \sqrt{gL_R} (L_R)^2$$

ou seja

$$(2.14) \quad \frac{c_R}{c_E} = \frac{\sqrt{L_R} (L_R)^2}{\sqrt{L_E} (L_E)^2}$$

de forma que

$$(2.15) \quad c_R = c_E N_{2,5}$$

2.4 Fator de Escala entre o submersível real e seu modelo reduzido para os coeficientes de amortecimento quadráticos dos movimentos de translação.

Igualmente, considerando as equações (2.10) e (2.11) e assim admitindo $F = dx^2$

$$(2.16) \quad \frac{d^2 x^2}{d^2 x^2} = \frac{\frac{1}{2} \rho \sqrt{g L_E} \sqrt{g L_E} L_E^2}{\frac{1}{2} \rho \sqrt{g L_R} \sqrt{g L_R} L_R^2}$$

e substituindo a Equação (2.11) em (2.16) obtemos

$$(2.17) \quad \frac{d^2 x^2}{d^2 x^2} = \frac{\frac{1}{2} \rho \sqrt{g L_E} \sqrt{g L_E} L_E^2}{\frac{1}{2} \rho \sqrt{g L_R} \sqrt{g L_R} L_R^2}$$

ou seja

$$(2.18) \quad \frac{d^2 x^2}{d^2 x^2} = \frac{d^2 x^2}{d^2 x^2}$$

de forma que

$$(2.19) \quad d^2 x^2 = d^2 x^2 N^2$$

2.5 Fator de Escala entre o submersível real e seu modelo reduzido para os coeficientes de amortecimento linear do movimento rotacional.

Tomando por base a igualdade da equação (2.13) tem-se:

$$(2.20) \quad \frac{c_E \psi_E}{c_R \psi_R} = \frac{\frac{1}{2} \rho V_E^2 (L_E)^2 L_E}{\frac{1}{2} \rho V_R^2 (L_R)^2 L_R}$$

$$(2.21) \quad \text{onde: } V = \sqrt{gL}$$

Logo:

$$(2.22) \quad \frac{c_E \psi_E}{c_R \psi_R} = \frac{g L_E L_E^3}{g L_R L_R^3}$$

Considerando que

$$(2.23) \quad \psi = \sqrt{\frac{L}{g}}$$

então:

$$(2.24) \quad \frac{c_E \sqrt{\frac{L_E}{g}}}{c_R \sqrt{\frac{L_R}{g}}} = \frac{L_E^4}{L_R^4}$$

ou seja

$$(2.25) \quad \frac{c_R}{L_R^4} = \frac{c_E}{L_E^4}$$

então:

$$(2.26) \quad c_R = c_E \cdot N^{4,5}$$

2.6 Fator de Escala entre o submersível real e seu modelo reduzido para os coeficientes de amortecimento quadrático do movimento rotacional.

Da mesma forma, tomando por base a igualdade da equação (2.13) tem-se:

$$(2.27) \quad \frac{d_E \psi_E^2}{d_R \psi_R^2} = \frac{\frac{1}{2} \rho V_E^2 (L_E)^2 L_E}{\frac{1}{2} \rho V_R^2 (L_R)^2 L_R}$$

$$(2.28) \quad \text{onde: } V = \sqrt{gL}$$

Logo:

$$(2.29) \quad \frac{d_E \psi_E^2}{d_R \psi_R^2} = \frac{g L_E L_E^3}{g L_R L_R^3}$$

Considerando que

$$(2.30) \quad \psi = \sqrt{\frac{L}{g}}$$

então:

$$(2.31) \quad \frac{d_E \frac{L_E}{g}}{d_R \frac{L_R}{g}} = \frac{L_E^4}{L_R^4}$$

ou seja

$$(2.32) \quad \frac{d_R}{L_R^5} = \frac{d_E}{L_E^5}$$

então:

$$(2.33) \quad d_R = d_E \cdot N_s^5$$