

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE INTERFERÊNCIA DE RISERS
RÍGIDOS VERTICAIS

Elton Jorge Bragança Ribeiro

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

Aprovada por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Prof. Luis Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

Prof. Carlos Magluta, D.Sc.

Dr. Marcos Queija de Siqueira, D.Sc.

Prof. Antonio Carlos Fernandes, Ph.D.

Dr. Celso Kazuyuki Morooka, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

RIBEIRO, ELTON JORGE BRAGANÇA

Análise Numérica e Experimental de
Interferência de *Risers* Rígidos Verticais.

[Rio de Janeiro] 2007

XXX, 429 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, D. Sc.,
Engenharia Civil, 2007)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Interferência de *Risers*
2. Influência do VIV na Interferência de *Risers*
3. Efeito da Esteira de Vórtices na Interferência.

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedico a minha esposa, meus avós
(*in memoriam*) e ao meu filho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, já que ele é força motivadora de todos nós.

Aos Professores Gilberto Bruno Ellwanger, Marcos Queija de Siqueira e Luis Volnei Sudati Sagrilo pelos ensinamentos, estímulo e amizade ao longo da minha trajetória acadêmica.

Ao Engenheiro Cezar Augusto da Silva Paulo, que era o gerente da Tecnologia Submarina no Centro de Pesquisas da Petrobras na ocasião em que o meu curso de doutorado foi autorizado, pelo seu empenho em me proporcionar esta oportunidade de complementar a minha formação acadêmica e a Engenheira Louise Pereira Ribeiro, atual gerente da Tecnologia Submarina, por permitir que eu concluísse este trabalho.

Ao Professor Charles Dalton da Universidade de Houston que durante o curto período em que estive lá, somente um semestre, proporcionou-me conhecimento de hidrodinâmica importantes para a elaboração deste trabalho.

Aos colegas de trabalho do CENPES que indiretamente contribuíram para que eu terminasse este trabalho, acumulando alguns projetos que eu deveria ter coordenado, mas que inviabilizariam o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho.

Por último, não poderia esquecer os Engenheiros Marco Antônio Ladislau Petkovic e José Antônio de Figueiredo, chefes do antigo SEPRON (Setor de Projetos Navais) e DIPREX (Divisão de Projeto de Exploração) do CENPES, respectivamente. Já que foi durante a gestão deles que eu comecei a trabalhar no CENPES, o que me proporcionou a oportunidade de realizar o Mestrado e agora o fechamento de minha formação acadêmica, com a conclusão do Doutorado.

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

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE INTERFERÊNCIA DE RISERS RÍGIDOS VERTICAIS

Elton Jorge Bragança Ribeiro

Dezembro/2007

Orientador: Gilberto Bruno Ellwanger

Programa: Engenharia Civil

O objetivo deste trabalho é o estudo da interferência de *risers* rígidos verticais de produção em plataformas do tipo *Spar buoy*, Monocoluna e TLP (*Tension Leg Platform*). A necessidade de estudar a interferência de *risers* surgiu quando foram instaladas as primeiras plataformas destes dois tipos em lâminas d'água profundas no Golfo do México.

Nesta tese, buscou-se um melhor entendimento do fenômeno hidrodinâmico quando há escoamento em torno de 2 cilindros próximos, caso dos *risers*, visto que o comportamento hidrodinâmico de um cilindro isolado, que já é bastante complexo devido ao fenômeno de desprendimento de vórtices, pode mudar completamente quando este é colocado próximo de outro cilindro.

Baseada em uma pesquisa bibliográfica, simulações numéricas e resultados experimentais, foi estudado ao longo deste trabalho o comportamento hidrodinâmico de dois *risers* próximos, alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5 vezes o diâmetro, isto é, quando o *riser* de jusante está completamente mergulhado na esteira gerada pelo *riser* de montante.

Complementando o trabalho, foi feita uma comparação dos resultados experimentais e numéricos com o clássico efeito de sombra proposto por Erling Huse e adotado em inúmeros programas para análise global de *risers*.

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

EXPERIMENTAL AND NUMERIC INVESTIGATION OF VERTICAL RIGID
RISERS INTERFERENCE

Elton Jorge Bragança Ribeiro

December/2007

Advisor: Gilberto Bruno Ellwanger

Department: Civil Engineering

The main objective of this work is to investigate production vertical rigid risers interference to platforms *Spar buoy*, Monohull and TLP (*Tension Leg Platform*). Riser interference investigation became a very important design criteria when were early installed Spar buoy and TLP platforms in Gulf of Mexico in deeper water.

Along this work is attempted to understand the hydrodynamic behavior of flowing around two cylinders. When one cylinder is surrounded by fluid, its hydrodynamic behavior is very complex due to vortex shedding phenomenon. However, when a cylinder is placed in the wake of another one, its hydrodynamic behavior can change completely and become more complex than just one cylinder.

Based on bibliography research, computational simulation and experimental model test results, was investigated throughout this work the hydrodynamic behavior when there are two risers close to each other, aligned arrangement and spaced by 2, 3, 4 and 5 times the diameter, i.e, when the downstream riser is completely immersed on the wake generated by upstream riser.

Finally, is presented a comparison between experimental and numerical results with shielding effect as proposed originally by Erling Huse.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA INTERFERÊNCIA	1
1.1 Motivação da Tese	1
1.2 Objetivos da Tese	4
1.3 Descrição dos Capítulos	8
CAPÍTULO 2	10
DESENVOLVIMENTO ATUAL DOS ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA	10
2.1 Histórico dos Estudos de Interferência	10
2.2 Análise de Alguns Artigos Publicados	12
2.3 Análise das Recomendações das Normas	16
CAPÍTULO 3	27
ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE FLUIDO AO REDOR DOS <i>RISERS</i>	27
3.1 Introdução	27
3.2 Estudo do Desprendimento de Vórtices	27
3.2.1 Frequências Naturais dos <i>Risers</i> Típicos em Lâmina D'água de 1000m	33
3.2.1.1 Umbilical com 5 funções hidráulicas mais cabo elétrico (5F + CE) com configuração em catenária livre	33
3.2.1.2 <i>Riser</i> Flexível para Exportação de Gás de 11.13” em catenária livre	34
3.2.1.3 <i>Riser</i> Rígido Vertical de Produção de uma TLP com 10” de Diâmetro Externo	35
3.2.1.4 <i>Riser</i> Rígido Vertical de Perfuração com 21 polegadas de diâmetro externo	36
3.3 Impacto da Interação Hidrodinâmica nos Estudos de Interferência	37
3.4 Estudos Experimentais da Interação Hidrodinâmica	37
3.4.1 Descrição dos Estudos Experimentais	37
3.4.1.1 Estudos Experimentais Realizados no NMRI do Japão	38
3.4.1.1.1 Descrição do Tanque de Ensaio	38
3.4.1.1.2 Descrição do Modelo	40
3.4.1.1.3 Determinação da Frequência Natural do Sistema	42

3.4.1.1.3.1 Cálculo das Frequências Naturais dos Modelos na água e no ar a partir do Teste de Decaimento	42
3.4.1.1.4 Aparato para Medição das Forças, Deslocamentos e Velocidade.	45
3.4.1.1.5 Procedimento e Estudos Realizados.	47
3.4.1.2 Estudos Experimentais Realizados pela Shell	49
3.4.1.2.1 Descrição do Tanque	49
3.4.1.2.2 Descrição do Modelo	50
3.4.1.2.3 Procedimento e Estudos Realizados.	52
3.4.2 Resultados dos Estudos Experimentais	53
3.4.2.1 Escoamento ao Redor de um <i>Riser</i> Isolado	53
3.4.2.1.1 Velocidade de 1.0 m/s	55
3.4.2.1.1.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal	56
3.4.2.1.1.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	59
3.4.2.1.2 Velocidade de 1.1 m/s	59
3.4.2.1.2.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal	60
3.4.2.1.2.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	63
3.4.2.1.3 Velocidade de 1.2 m/s	64
3.4.2.1.3.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal	64
3.4.2.1.3.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	67
3.4.2.1.4 Velocidade de 1.4 m/s	68
3.4.2.1.4.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal	69
3.4.2.1.4.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	71
3.4.2.1.5 Velocidade de 1.5 m/s	72
3.4.2.1.5.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal	73
3.4.2.1.5.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	76
3.4.2.1.6 Velocidade de 1.6 m/s	76
3.4.2.1.6.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal	77
3.4.2.1.6.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	80
3.4.2.1.7 Velocidade de 1.7 m/s	81
3.4.2.1.7.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal	82
3.4.2.1.7.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	85
3.4.2.2 Resumo e Análise dos Resultados	85
3.4.2.2.1 Frequência de Oscilação, Coeficiente de Massa de Água Adicionada e Número de Strouhal Obtido no Ensaio	88

3.4.2.2.2	Comparação com Resultados Disponíveis na Literatura	90
3.4.2.2.3	Comparação com o Programa SHEAR 7	92
3.4.2.2.4	Coeficientes Hidrodinâmicos	93
3.4.2.2.5	Análise Crítica dos Resultados	93
3.4.2.3	Escoamento ao Redor de Dois <i>Risers</i> Alinhados	94
3.4.2.3.1	Espaçamento 2D	94
3.4.2.3.1.1	Velocidade de 1.0 m/s	94
3.4.2.3.1.1.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	98
3.4.2.3.1.2	Velocidade de 1.2 m/s	99
3.4.2.3.1.2.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	103
3.4.2.3.1.3	Velocidade de 1.4 m/s	104
3.4.2.3.1.3.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	108
3.4.2.3.1.4	Velocidade de 1.5 m/s	108
3.4.2.3.1.4.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	112
3.4.2.3.1.5	Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 2D	113
3.4.2.3.1.5.1	Caracterização da Interação Hidrodinâmica para um Espaçamento de 2D	114
3.4.2.3.1.5.2	Comparação com Resultados encontrados na Literatura	118
3.4.2.3.1.5.3	Variação do Coeficiente de Arrasto Médio	122
3.4.2.3.1.5.4	Verificação da Interferência	124
3.4.2.3.2	Espaçamento 3D	126
3.4.2.3.2.1	Velocidade de 1.4 m/s	126
3.4.2.3.2.1.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	130
3.4.2.3.2.2	Velocidade de 1.5 m/s	131
3.4.2.3.2.2.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	135
3.4.2.3.2.3	Velocidade de 1.6 m/s	135
3.4.2.3.2.3.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	139
3.4.2.3.2.4	Velocidade de 1.7 m/s	140
3.4.2.3.2.4.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	143
3.4.2.3.2.5	Velocidade de 1.8 m/s	144
3.4.2.3.2.5.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	148
3.4.2.3.2.6	Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 3D	149

3.4.2.3.2.6.1	Caracterização da Interação Hidrodinâmica para um Espaçamento de 3D	150
3.4.2.3.2.6.2	Comparação com Resultados Encontrados na Literatura	155
3.4.2.3.2.6.3	Variação do Coeficiente de Arrasto Médio	159
3.4.2.3.2.6.4	Verificação da Interferência	161
3.4.2.3.3	Espaçamento 4D	162
3.4.2.3.3.1	Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 4D	163
3.4.2.3.3.1.1	Comparação com os Resultados encontrados na Literatura	165
3.4.2.3.3.1.2	Variação do Coeficiente de Arrasto	166
3.4.2.3.4	Espaçamento 5D	167
3.4.2.3.4.1	Velocidade de 1.4 m/s	167
3.4.2.3.4.1.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	171
3.4.2.3.4.2	Velocidade de 1.6 m/s	172
3.4.2.3.4.2.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	175
3.4.2.3.4.3	Velocidade de 1.7 m/s	176
3.4.2.3.4.3.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	179
3.4.2.3.4.4	Velocidade de 1.8 m/s	180
3.4.2.3.4.4.1	Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos	184
3.4.2.3.4.5	Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 5D	185
3.4.2.3.4.5.1	Caracterização da Interação Hidrodinâmica para um Espaçamento de 5D	186
3.4.2.3.4.5.2	Comparação com os Resultados encontrados na Literatura	190
3.4.2.3.4.5.3	Variação do Coeficiente de Arrasto Médio	191
3.4.2.4	RESUMO FINAL DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	192
CAPÍTULO 4		196
ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO DE FLUIDO AO REDOR DE <i>RISERS</i>		196
4.1	Introdução	196
4.2	Descrição da Modelagem Numérica	197

4.3	Descrição dos Estudos Paramétricos Numéricos	200
4.4	Resultado dos Estudos Paramétricos usando a metodologia CFD para um <i>Riser</i> Isolado	202
4.4.1	<i>Riser</i> Isolado Usando Modelagem 2D	202
4.4.1.1	Estudos Paramétricos para <i>Riser</i> Isolado	205
4.4.1.1.1	Definição do Regime de Escoamento	206
4.4.1.1.2	Ajuste no Modelo de Turbulência	210
4.4.1.2	Comparação das Simulações 2D x 3D	211
4.4.1.3	Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico do <i>Riser</i> Isolado	213
4.4.1.4	Análise Crítica dos Resultados para <i>Riser</i> Isolado	215
4.4.2	Dois Risers Alinhados e Estacionários	216
4.4.2.1	Espaçamento de 2D	216
4.4.2.1.1	Comparação com os Resultados Experimentais	217
4.4.2.1.2	Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 2D.	218
4.4.2.1.3	Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 2D	220
4.4.2.2	Espaçamento de 3D	220
4.4.2.2.1	Comparação com os Resultados Experimentais	221
4.4.2.2.2	Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 3D.	222
4.4.2.2.3	Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 3D	223
4.4.2.3	Espaçamento de 4D	223
4.4.2.3.1	Comparação com Resultados Experimentais	224
4.4.2.3.2	Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 4D.	225
4.4.2.3.3	Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 4D	227
4.4.2.4	Espaçamento de 5D	227
4.4.2.4.1	Comparação com Resultados Experimentais	228
4.4.2.4.2	Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 5D.	229
4.4.2.4.3	Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 5D	231
4.4.3	Comprimento do Efeito de Sombra	231
4.5	Interação Fluido-Estrutura	232

4.5.1 Descrição da Metodologia para Simulação de uma Interação Fluido-Estrutura (FSI) Expedita	233
4.5.1.1 Introdução	233
4.5.1.2 Formulação e Técnica de Movimentação da Malha	233
4.5.2 Resultados considerando FSI expedita na Direção Transversal para um <i>Riser</i> Isolado.	235
CAPÍTULO 5	239
ESTUDO DO EFEITO DE SOMBRA	239
5.1 Introdução	239
5.2 Metodologia Proposta por Huse para Determinação da Velocidade de Escoamento na Esteira de um <i>Riser</i> - Efeito de Sombra.	240
5.2.1 Comparação da Formulação Proposta por Huse com os Resultados Numéricos	245
5.2.2 Comparação da Formulação Proposta por Huse com os Resultados Experimentais	249
CAPÍTULO 6	252
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	252
6.1 Introdução	252
6.2 Conclusões	252
6.3 Trabalhos Futuros	258
CAPÍTULO 7	260
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	260
ANEXO A	265
DETERMINAÇÃO DA RAZÃO DE MASSA PARA RISERS	265
ANEXO B	269
DESCRIÇÃO DA FORMAÇÃO E DESPRENDIMENTO DOS VÓRTICES E ESTUDO DA CAMADA LIMITE	269

ANEXO C	277
RESULTADOS DOS ESTUDOS EXPERIMENTAIS	277
ANEXO D	414
ARQUIVO DE ENTRADA E SAÍDA DE DADOS DO PROGRAMA SHEAR 7	414
ANEXO E	423
DESCRIÇÃO DO PROGRAMA ANSYS-CFX	423
ANEXO F	425
ESTUDO DA TURBULÊNCIA	425

Índice de Figuras

Figura	Título	Pág.
1.1	Vista Superior do Arranjo dos <i>risers</i> em uma plataforma <i>Spar buoy</i> .	2
1.2	Sistema de tensionadores de um <i>riser</i> rígido vertical de produção de plataformas TLP e Monocoluna [3].	3
1.3	Sistema de tensionadores de um <i>riser</i> rígido vertical de produção de uma plataforma <i>Spar buoy</i> .	3
1.4	Geometria dos <i>risers</i> alinhados (<i>tandem</i>).	5
1.5	Geometria dos <i>risers</i> lado a lado (<i>side by side</i>).	6
1.6	Geometria dos <i>risers</i> oblíqua (<i>staggered</i>).	6
1.7	Esquema de desprendimento dos vórtices em função do Número de Reynolds [6].	7
1.8	Linhas de Corrente em torno de um Agrupamento de Cilindros para Número de Reynolds de 6400, ver referência [7].	8
2.1	Esquema do Aparato de Ensaio [12].	13
2.2	Arranjo dos modelos de <i>risers</i> [12].	14
2.3-	Perfis de Corrente obtidos nos Ensaios [12].	15
2.4	Sistema de coordenadas e redução da velocidade para o <i>riser</i> de jusante [8].	18
2.5	Variação do Coeficiente de Arrasto Médio (CD) para o <i>Riser</i> de Jusante, em função da Posição Relativa dos <i>Risers</i> (X/D e Y/D) [8].	19
2.6	Variação do Coeficiente de Sustentação Médio (CL_{medio}) para o <i>Riser</i> de Jusante, em função da Posição Relativa dos <i>Risers</i> (X/D e Y/D) [8].	19
2.7	Força de Sustentação Média, devida ao Efeito de Esteira.	20
3.1	Fluxo uniforme em torno de um <i>riser</i> para $Re = 0.16$.	28
3.2	Escoamento ao redor de um <i>riser</i> para $Re = 1.54$.	28
3.3	Escoamento ao redor de um <i>riser</i> para $Re = 9.6$.	29
3.4	Escoamento ao redor de um <i>riser</i> para $Re = 26$.	29
3.5	Escoamento ao redor de um <i>riser</i> para $Re = 2000$.	29
3.6	Escoamento ao redor de um <i>riser</i> para $Re = 10000$.	29
3.7	Número de Strouhal (St) x Número de Reynolds (Re) [6].	31
3.8	Vista Geral do Tanque de Reboque.	38
3.9	Dimensões da Estrutura de Suportação do Modelo.	39

3.10	Esquema do Aparato de Ensaio.	39
3.11	Detalhe dos Apoios dos Modelos.	42
3.12	Posicionamento das Câmeras para Medição dos Deslocamentos.	46
3.13	Marcadores para Medição dos Deslocamentos para o Caso de um <i>Riser</i> e para o Caso de dois <i>Risers</i> .	46
3.14-	Posicionamento do Medidor da Velocidade Horizontal.	47
3.15	Vista em Planta, Dimensões e Seção Transversal do Tanque da Shell.	50
3.16	Esquema da Montagem Final do Ensaio.	51
3.17	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.0\text{m/s}$.	55
3.18	Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.0\text{m/s}$.	56
3.19	Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.	57
3.20	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.0\text{m/s}$.	59
3.21	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.1\text{ m/s}$.	60
3.22	Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.1\text{ m/s}$.	61
3.23	Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.	61
3.24	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.1\text{ m/s}$.	62
3.25	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.2\text{ m/s}$.	64
3.26	Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.2\text{ m/s}$.	65
3.27	Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.	65
3.28	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal, quando $V = 1.2\text{ m/s}$.	67
3.29	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.4\text{ m/s}$.	68
3.30	Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.4\text{ m/s}$.	69

3.31	Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.	69
3.32	Trajectoria dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.4$ m/s.	71
3.33	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.5$ m/s.	72
3.34	Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.5$ m/s.	73
3.35	Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.	74
3.36	Trajectoria dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.5$ m/s.	76
3.37	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.6$ m/s.	77
3.38	Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.6$ m/s.	78
3.39	Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.	78
3.40	Trajectoria dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.6$ m/s.	80
3.41	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.7$ m/s.	81
3.42	Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.7$ m/s.	82
3.43	Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.	83
3.44	Trajectoria dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.7$ m/s.	84
3.45	Gráfico de $(Ax/D)_{sig} \times V_R$ para os Modelos 1,2 e 3.	87
3.46	Gráfico de $(Ay/D)_{sig} \times V_R$ para os Modelos 1, 2 e 3.	87
3.47	Gráfico de $Ca \times V_r$.	89
3.48	Comparação das Respostas de Vibrações Transversais Obtidas no NMRI com as Obtidas por Vikestad e Gopalkrishnan.	92
3.49	Coefficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para os Modelos 1, 2 e 3 ensaiados.	93
3.50	Espectro do Deslocamento Transversal para o <i>Riser 2</i> e Longitudinal para os <i>Risers 1</i> e 2 e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz para	95

	o Modelo 3.	
3.51	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1</i> e <i>2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	96
3.52	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	96
3.53	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	97
3.54	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinais x Transversais do <i>Riser 2</i> do Modelo 3- Velocidade de 1m/s.	98
3.55	Espectro do Deslocamento Transversal para o <i>Riser 2</i> e Longitudinal para os <i>Risers 1</i> e <i>2</i> e Detalhe nas Faixas de Frequência de 0 a 2 Hz e 2 a 4.5 Hz para o Modelo 3.	100
3.56	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1</i> e <i>2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	100
3.57	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado. Detalhes na faixa de frequência de 1 a 2 Hz e 2 a 3.25 Hz.	101
3.58	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado. Detalhes na faixa de frequência de 1 a 2 Hz e 2 a 3.25 Hz.	102
3.59	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal do Modelo 3- Velocidade de 1.2 m/s.	103
3.60	Espectro do Deslocamento Transversal para o <i>Riser 2</i> e Longitudinal para os <i>Risers 1</i> e <i>2</i> e Detalhe nas Faixas de Frequência de 0 a 4 Hz e 1.5 a 3 Hz para o Modelo 3.	104
3.61	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1</i> e <i>2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	105
3.62	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	106
3.63	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	106
3.64	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal do Modelo 3, para Velocidade de 1.4 m/s.	107

3.65	Espectro do Deslocamento Transversal para o <i>Riser 2</i> e Longitudinal para os <i>Risers 1</i> e <i>2</i> e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz para o Modelo 3.	109
3.66	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1</i> e <i>2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	110
3.67	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	110
3.68	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	111
3.69	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal do Modelo 3- Velocidade de 1.5 m/s.	112
3.70	Comparação do Gráfico de $A/D_{sig} \times V_R$ para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 1.	115
3.71	Comparação do Gráfico de $A/D_{sig} \times V_R$ para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 3.	116
3.72	Comparação do Gráfico de $RMS_{Fx} \times Re$ para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 3.	117
3.73	Comparação do Gráfico de $RMS_{Fy} \times Re$ para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 3.	117
3.74	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 1 com os Apresentados na Referência [11].	119
3.75	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 3 com os Apresentados na Referência [11].	120
3.76	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Longitudinal x Velocidade Reduzida.	121
3.77	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Transversal x Velocidade Reduzida.	122
3.78	Coefficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um <i>Riser</i> Isolado (Modelos 1, 2 e 3) e para 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2D (Modelos 1 e 3).	123
3.79	Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para	123

	para 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2D (Modelos 1 e 3) ensaiados no NMRI e os Valores Apresentados na Referência [11].	
3.80	Série temporal de deslocamentos para $V= 1\text{m/s}$ e indicação se há colisão.	124
3.81	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.2\text{ m/s}$ e indicação se há colisão.	124
3.82	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.4\text{ m/s}$ e indicação se há colisão.	125
3.83	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.5\text{ m/s}$ e indicação se há colisão.	125
3.84	Espectro do Deslocamento Transversal para o <i>Riser 2</i> e Longitudinal para os <i>Risers 1 e 2</i> e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4 Hz para o Modelo 3.	127
3.85	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1 e 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	128
3.86	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	128
3.87	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	129
3.88	Trajectoria dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser 2</i> do Modelo 3- Velocidade de 1.4 m/s.	130
3.89	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os <i>Risers 1 e 2</i> e Detalhe nas Faixas de Frequência de 0 a 4.5 Hz para o Modelo 3.	131
3.90	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1 e 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	132
3.91	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	133
3.92	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	133
3.93	Trajectoria dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser 2</i> do Modelo 3- Velocidade de 1.5 m/s.	134
3.94	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os <i>Risers 1 e 2</i> e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz, para o Modelo 3.	136

3.95	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1</i> e <i>2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	138
3.96	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	138
3.97	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	138
3.98	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser 2</i> do Modelo 3- Velocidade = 1.6 m/s.	139
3.99	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os <i>Risers 1</i> e <i>2</i> e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz, para o Modelo 3.	140
3.100	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1</i> e <i>2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	141
3.101	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	142
3.102	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	142
3.103	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser 2</i> do Modelo 3- Velocidade de 1.7 m/s.	143
3.104	Espectro do Deslocamento Transversal para o <i>Riser 2</i> e Longitudinal para os <i>Risers 1</i> e <i>2</i> e Detalhes nas Faixas de Frequência de 0 a 4.5, 1.5 a 3 Hz, para o Modelo 3.	145
3.105	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do <i>Riser 2</i> e longitudinal dos <i>Risers 1</i> e <i>2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	146
3.106	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do <i>Riser 1</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	146
3.107	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser 2</i> do Modelo 3 com o <i>Riser</i> Isolado.	146
3.108	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser 2</i> do Modelo 3- Velocidade de 1.8 m/s.	148
3.109	Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados com Espaçamento de 3D – Modelo 1.	151
3.110	Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x	152

	Velocidade Reduzida para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados com Espaçamento de 3D – Modelo 2.	
3.111	Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados com Espaçamento de 3D – Modelo 3.	153
3.112	Comparação do Gráfico de RMS_{Fx} x Re para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 3D para Modelo 3.	154
3.113	Comparação do Gráfico de RMS_{Fy} x Re para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 3D para Modelo 3.	154
3.114	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 1 com os Apresentados na Referência [11].	156
3.115	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 2 com os Apresentados na Referência [11].	157
3.116	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para os Modelo 3 com os Apresentados na Referência [11].	157
3.117	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Longitudinal x Velocidade Reduzida.	158
3.118	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Transversal x Velocidade Reduzida.	159
3.119	Coefficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um <i>Riser</i> Isolado (Modelo 1, 2 e 3) e para 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 3D (Modelo 1, 2 e 3).	160
3.120	Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para para 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 3D (Modelo 1, 2 e 3) ensaiados no NMRI e os Valores Apresentados na Referência [11].	160
3.121	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.4$ m/s e indicação se há colisão.	161
3.122	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.5$ m/s e indicação se há colisão.	161
3.123	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.6$ m/s e indicação se há colisão.	162

	colisão.	
3.124	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.7$ m/s e indicação se há	162
	colisão.	
3.125	Série temporal de deslocamentos para $V= 1.8$ m/s e indicação se há	162
	colisão.	
3.126	Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x	164
	Velocidade Reduzida para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados com	
	Espaçamento de 4D – Modelo 1.	
3.127	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 1 com os	166
	Apresentados na Referência [11].	
3.128	Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um <i>Riser</i> Isolado	166
	e para 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 4D.	
3.129	Espectro do Deslocamento Transversal para o <i>Riser</i> 2 e Longitudinal	168
	para os <i>Risers</i> 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 4.5Hz.	
3.130	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal	169
	dos <i>Risers</i> 1 e 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	
3.131	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do <i>Riser</i> 1	169
	com o <i>Riser</i> Isolado.	
3.132	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal	170
	do <i>Riser</i> 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	
3.133	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser</i> 2-	171
	Velocidade de 1.4 m/s.	
3.134	Espectro do Deslocamento Transversal do <i>Riser</i> 2 e Longitudinal para os	172
	<i>Risers</i> 1 e 2 e Detalhe nas Faixas de Frequências de 0 a 4.5 Hz.	
3.135	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal	173
	dos <i>Risers</i> 1 e 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	
3.136	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do <i>Riser</i> 1	173
	com o <i>Riser</i> Isolado.	
3.137	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal	174
	do <i>Riser</i> 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	
3.138	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser</i> 2-	175
	Velocidade de 1.6 m/s.	
3.139	Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os <i>Risers</i> 1 e	176

	2 e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 4.5 Hz.	
3.140	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos <i>Risers</i> 1 e 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	177
3.141	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do <i>Riser</i> 1 com o <i>Riser</i> Isolado.	178
3.142	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser</i> 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	178
3.143	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o <i>Riser</i> 2- Velocidade de 1.7 m/s.	179
3.144	Espectro do Deslocamento Transversal do <i>Riser</i> 2 e Longitudinal para os <i>Risers</i> 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 4.5 Hz.	181
3.145	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos <i>Risers</i> 1 e 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	182
3.146	Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do <i>Riser</i> 1 com o <i>Riser</i> Isolado.	182
3.147	Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do <i>Riser</i> 2 com o <i>Riser</i> Isolado.	183
3.148	Trajetória dos Deslocamentos Longitudinais e Transversais para o <i>Riser</i> 2- Velocidade de 1.8 m/s.	184
3.149	Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados com Espaçamento de 5D – Modelo 1.	187
3.150	Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados com Espaçamento de 5D – Modelo 3.	188
3.151	Comparação do Gráfico de RMS_Fx x Re para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 5D para Modelo 3.	189
3.152	Comparação do Gráfico de RMS_Fy x Re para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 5D para Modelo 3.	189
3.153	Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 3 com os Apresentados na Referência [11].	191
3.154	Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um <i>Riser</i> Isolado e para dois <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 5D.	192

3.155	Amplitude Adimensional Longitudinal em Função da Velocidade Reduzida para Diferentes Espaçamentos.	193
3.156	Amplitude Adimensional Transversal do <i>Riser 2</i> (Jusante) em Função da Velocidade Reduzida para Diferentes Espaçamentos.	194
3.157	Coefficiente de Arrasto Médio em Função do Espaçamento para Modelo 1.	195
3.158	Coefficiente de Arrasto Médio em Função do Espaçamento para Modelo 3.	196
4.1	Dimensões do Domínio Fluido e Detalhe da Malha de Volumes Finitos na Região do <i>Riser</i> para o caso de um Espaçamento Horizontal de 2D e Alinhados.	198
4.2	Mapa de Iso- contorno da Vorticidade para Escoamento em torno de um <i>Riser</i> com Velocidade de 1m/s.	203
4.3	Campo de Velocidades no Domínio Fluido em torno do <i>Riser</i> - Velocidade de escoamento de 0.5 m/s.	203
4.4 A	Detalhe do Ponto de Descolamento da Camada Limite na Parte Superior do <i>Riser</i> .	204
4.4 B	Detalhe do Ponto de Descolamento da Camada Limite na Parte Inferior do <i>Riser</i> .	204
4.5	Referência para Medição dos Ângulos de Descolamento.	205
4.6	Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 0.5 m/s.	206
4.7	Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 1 m/s.	207
4.8	Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 1.5 m/s.	207
4.9	Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 2 m/s.	208
4.10	Comparação dos Coeficientes de Arrasto Médios para <i>Risers</i> com	209

	Escoamento Turbulento, usando modelo SST, e Laminar.	
4.11	Comparação dos Coeficientes de Sustentação para <i>Risers</i> com Escoamento Turbulento, usando modelo SST, e Laminar.	209
4.12	Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio (CD) Numérico com os Valores Obtidos Experimentalmente.	211
4.13	Detalhe da Malha Usada na Simulação 3D.	212
4.14	Vórtices formados em 3 Planos Horizontais e o Acoplamento com o Plano Vertical.	213
4.15	Série temporal das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Velocidade de Escoamento de 1 m/s.	214
4.16	Espectro das Forças Transversais e Longitudinais para Velocidade de 1m/s.	214
4.17	Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio Numérico x Experimental – <i>Riser 1</i> .	217
4.18	Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio Numérico x Experimental – <i>Riser 2</i> .	217
4.19	Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.	219
4.20	Espectro das Forças Transversais e Longitudinais para os <i>Risers 1 e 2</i> - Espaçados de 2D e com Velocidade de 1m/s.	219
4.21	Comparação do CD Numérico x Experimental- <i>Riser 1</i> .	221
4.22	Comparação do CD Numérico x Experimental- <i>Riser 2</i> .	221
4.23	Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.	222
4.24	Espectro das Forças Transversais e Longitudinais para os <i>Risers 1 e 2</i> - Espaçados de 3D e com Velocidade de 1m/s.	222
4.25	Comparação do CD Numérico x Experimental- <i>Riser 1</i> .	224
4.26	Comparação do CD Numérico x Experimental- <i>Riser 2</i> .	225
4.27	Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.	226
4.28	Espectro das Forças Transversais e Longitudinais para os <i>Risers 1 e 2</i> - Espaçados de 3D e com Velocidade de 1m/s.	226
4.29	Comparação do CD Numérico x Experimental- <i>Riser 1</i> .	228

4.30	Comparação do CD Numérico x Experimental- <i>Riser 2</i> .	228
4.31	Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.	229
4.32	Espectro das Forças Transversais e Longitudinais para os Risers 1 e 2- Espaçados de 5D e com Velocidade de 1m/s.	230
4.33	Determinação do CD para o Riser de Jusante x Espaçamento.	231
4.34	Força Adimensionalizada na Direção x (f_D) para <i>Riser</i> Isolado, considerando uma Interação Fluido- Estrutura Expedita.	236
4.35	Força Adimensionalizada na Direção y (f_L) e Deslocamento Transversal para <i>Riser</i> Isolado, considerando uma Interação Fluido- Estrutura Expedita.	236
5.1	Componente da Velocidade Gerada por um Vórtice em um ponto P qualquer na Esteira dos Vórtices.	239
5.2a	Perfil da redução de velocidades gerada pela esteira do <i>riser</i> de montante.	242
5.2b	Definição de meia largura do perfil da redução de velocidade , é igual à semi-largura da esteira gerada pelo <i>riser</i> de montante.	242
5.3	Definição do Posicionamento de uma Fonte Virtual.	242
5.4	Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para uma Distância Relativa de 2D, como mostrado na Figura 5.3.	243
5.5	Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para Distâncias Relativas de 4 e 6D.	244
5.6	Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para Distâncias Relativas de 8 e 10D.	244
5.7	Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para Distâncias Relativas de 12 e 14D.	245
5.8	Locação do Plano para Determinação do Perfil de Redução da Velocidade.	246
5.9	Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 2D.	246
5.10	Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 3D.	247

5.11	Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 4D.	247
5.12	Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 5D.	248
5.13	Variação Paramétrica do Coeficiente de Arrasto para o <i>Riser</i> de Montante na Formulação proposta por HUSE.	249
6.1	Comparação da $(Ax/D)_{sig} \times V_R$, para um riser isolado e os risers 1 e 2 espaçado de 2, 3 e 5D.	254
6.2	Comparação da $(Ay/D)_{sig} \times V_R$, para um riser isolado e os risers 1 e 2 espaçado de 2, 3 e 5D.	255
6.3	Gráfico de RMS_Fx x Re para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2, 3 e 5D para Modelo 3.	256
6.4	Gráfico de RMS_Fy x Re para um <i>Riser</i> Isolado e 2 <i>Risers</i> Alinhados e Espaçados de 2, 3 e 5D para Modelo 3.	256

Simbologia e Nomenclatura

Letras Romanas

A/D	Amplitude adimensionalizada. Relação entre a amplitude de vibração e o diâmetro do <i>riser</i> .
$(A_x/D)_{sig}$	Amplitude adimensionalizada significativa na direção x (longitudinal). Dada pela expressão $\sqrt{2}(A_x/D)$.
$(A_y/D)_{sig}$	Amplitude adimensionalizada significativa na direção y (transversal). Dada pela expressão $\sqrt{2}(A_y/D)$.
$(A_x/D)_i / (A_y/D)_i$	Amplitude adimensionalizada significativa na direção longitudinal /transversal do <i>riser</i> isolado.
$A_x/D_{r1} / (A_y/D)_{r1}$	Amplitude adimensionalizada significativa na direção longitudinal /transversal do <i>riser</i> 1 (Montante).
$A_x/D_{r2} / (A_y/D)_{r2}$	Amplitude adimensionalizada significativa na direção longitudinal /transversal do <i>riser</i> 2 (Jusante).
CD	Coefficiente de arrasto. Obtido através da determinação do valor médio da série temporal da força adimensionalizada na direção x (f_D).
CD_{DIN}	Flutuação em torno do valor médio do coeficiente de arrasto. Obtido através do desvio padrão da série temporal da força adimensionalizada na direção x (f_D).
CL	Coefficiente de sustentação. Obtido através da determinação da raiz média quadrática (RMS) da série temporal da força adimensionalizada na direção y (f_L).
D	Diâmetro do <i>riser</i> .
d_j	Distância entre o centro de um vórtice e um ponto qualquer do domínio fluido.
f_D	Força adimensionalizada na direção x (arrasto).
f_L	Força adimensionalizada na direção y (sustentação).
f_{NAT}	Frequência natural do modelo.
f_{R1}	Deflexão estática do <i>riser</i> 1 (montante).
f_{R2}	Deflexão estática do <i>riser</i> 2 (jusante).

f_{ST}	Frequência de Strouhal ou de desprendimento de vórtices.
L	Comprimento do <i>riser</i> .
m, M	Massa do <i>riser</i> ou do fluido interno.
m^*	Razão de massa.
RMS	<i>Root Mean Square</i> .
S, S_{num}	Número de Strouhal. O índice num indica que o valor foi obtido numericamente, através das simulações com o programa CFX.
U, V	Velocidade de escoamento ao longe.
V_R	Velocidade reduzida, expressa através da fórmula $U / f_{NAT} * D$.
$V_{R,CRIT}$	Velocidade reduzida crítica. Obtida no ponto em A/D que é máximo.
u, v e w	Componentes cartesianas do vetor velocidade (U).
u', v', w'	Componentes cartesianas das flutuações do vetor velocidade para um escoamento turbulento.
<i>Overpull</i>	Esforço de tração efetivo, existente na base de um <i>riser</i> de perfuração ou completação seca, como os usados em plataformas do tipo <i>Spar buoy</i> e TLP.
<i>Tension Factor</i>	Fator multiplicador sobre o peso submerso de um <i>riser</i> de perfuração ou completação seca. O valor da carga de <i>overpull</i> é função deste fator.
VIV	Vibrações Induzidas por desprendimento de Vórtices.
WIO	Vibrações Induzidas pela Esteira.

Letras Gregas

ρ	Massa específica da água.
μ	Viscosidade dinâmica da água.
ν	Viscosidade cinemática da água.
Γ_j	Circulação de um vórtice. O índice j indica o número do vórtice considerado.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA INTERFERÊNCIA

1.1 Motivação da Tese

A necessidade de se produzir campos de petróleo localizados em águas profundas, envolve diversas áreas do conhecimento humano, e entre estas áreas, o comportamento global dos *risers* se destaca por apresentar grandes desafios. Dentre os tópicos desafiadores, tem-se as análises para verificação estrutural quando os *risers* estão submetidos à carga extrema, carga de operação (fadiga) e as análises de interferência entre dois ou mais *risers*.

As análises de interferência estão assumindo grande importância à medida que a produção de petróleo no mar caminha para águas mais profundas. Estas análises consistem em determinar os espaçamentos mínimos requeridos que garantam a não existência de contato entre os *risers*, ou na impossibilidade de evitar o contato entre eles, que mantenham os choques com intensidade e frequência suficientemente baixos para não gerar danos à tubulação.

Os *risers* são tubulações que ligam a cabeça de poço no fundo do mar com a plataforma [1]. Podem ser classificados, como *risers* de produção/ injeção, perfuração e completação. Os *risers* de produção/ injeção são do tipo rígido ou flexível, podendo ser instalados em diferentes configurações (catenária livre, configurações com flutuadores, verticais etc). Já os *risers* de perfuração e completação, são sempre rígidos e instalados, em geral, na vertical.

Em plataformas do tipo TLP (*Tension Leg Platform*), *Spar buoy* e uma nova concepção, denominada de Monocoluna, foco deste trabalho, os *risers* de produção/ injeção são rígidos e aproximadamente verticais. O arranjo dos *risers* no convés da plataforma e no fundo do mar visa otimizar as dimensões finais da plataforma e ao mesmo tempo evitar a interferência entre eles, seja na fase de instalação ou de operação. A Figura 1.1 mostra um arranjo no fundo e no convés de uma plataforma *Spar buoy*.

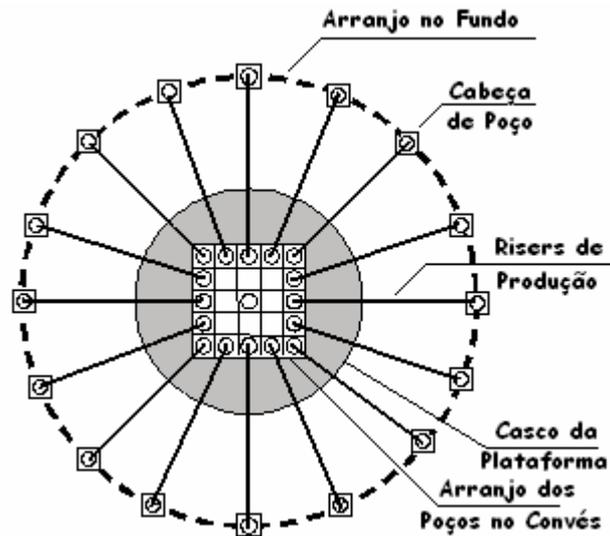


Figura 1.1- Vista Superior do Arranjo dos *risers* em uma plataforma *Spar buoy*.

Os *risers* encontram-se submetidos a carregamentos de natureza estática, como peso próprio e empuxo, e a carregamentos dinâmicos de origem ambiental, como corrente marinha e onda. A forma usual de análise da ação da corrente marinha considera que ela gera nos *risers* somente cargas estáticas, contudo há, também, efeitos dinâmicos gerados pelo desprendimento de vórtices na esteira formada na interação do *riser* com o fluido escoando ao seu redor. As ondas geram predominantemente cargas dinâmicas, seja através de sua ação diretamente sobre os *risers*, gerada pela variação da pressão dinâmica devida às elevações da superfície livre em uma posição fixa [2], seja através de sua ação sobre as plataformas gerando movimentos da mesma nos seis graus de liberdade e transmitido aos *risers* nos pontos de conexão.

Os *risers* de produção das plataformas *TLP* e *Monocoluna*, são tracionados no topo por um sistema de tensionadores similares aos adotados nos *risers* de perfuração de plataformas semi-submersíveis e navios sonda, conforme é mostrado na Figura 1.2. Quanto aos *risers* de produção das plataformas *Spar buoy*, a tração no topo dos *risers* é fornecida por tanques de flutuação de aço, denominados de *buoyancy can*, conforme é mostrado na Figura 1.3.

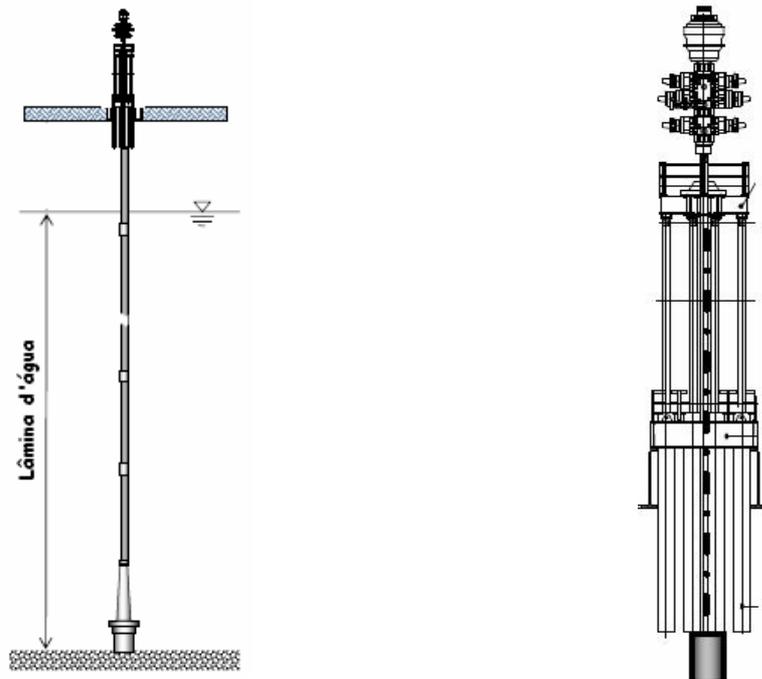
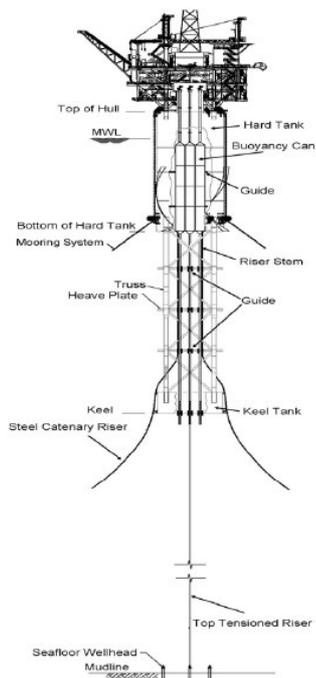
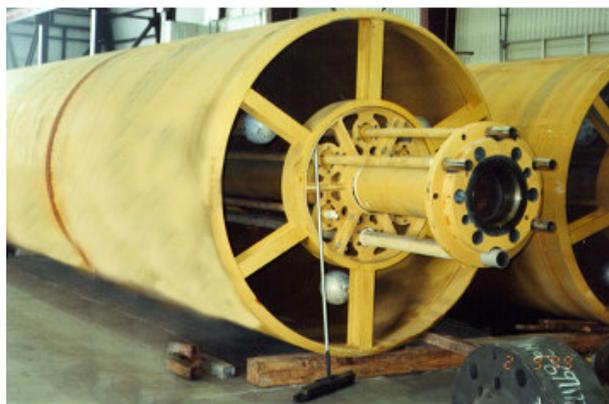


Figura 1.2- Sistema de tensionadores de um *riser* rígido vertical de produção de plataformas TLP e Monocoluna [3].



Vista Geral da Plataforma [4].



Detalhe da Câmara de Flutuação (*Buoyancy Can*).

Figura 1.3 – Sistema de tensionadores de um *riser* rígido vertical de produção de uma plataforma *Spar buoy*.

Nas bacias produtoras de petróleo no Brasil, não há, ainda, plataformas do tipo TLP e *Spar buoy* em operação, contudo estas plataformas viabilizam o uso de completação seca [1], e estão sendo analisadas para a produção de campos com óleo pesado. Uma nova concepção de plataforma, denominada Monocoluna, está em desenvolvimento e, numa das opções, irá usar *riser* rígido vertical de produção e perfuração, bastante similares aos usados nas plataformas TLP e *Spar buoy*.

A análise de interferência entre *risers* assumiu grande importância quando da instalação em outras regiões do mundo das plataformas TLP e *Spar buoy*, conforme será descrito com maiores detalhes no Capítulo 2 deste trabalho. Esta análise terá forte impacto no custo final da plataforma, já que há inúmeros poços instalados (numa unidade de completação seca há somente um *riser* por poço e em unidade de completação submarina há 3 *risers* por poço – produção, anular e umbilical); um dos critérios para definir o tipo, dimensão final e sistema de ancoragem de uma plataforma é dado pela quantidade de *risers* associado ao espaçamento requerido entre eles. Portanto, um critério de interferência muito restritivo, isto é com grandes distâncias entre os *risers*, pode inviabilizar um empreendimento e no caso contrário, poderá trazer conseqüências catastróficas, como por exemplo o choque entre os *risers* gerando danos locais que podem provocar uma ruptura pela intensidade do impacto ou gerar concentrações de tensões e, conseqüentemente, uma redução da vida à fadiga do *riser*.

É importante salientar que o estudo da interferência entre *risers*, também é necessário em projetos de plataformas de produção do tipo semi-submersível e FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), não sendo porém tão crítico, já que os *risers* usados nestas unidades são predominantemente flexíveis, os quais são menos sensíveis ao contato devido à presença de uma camada plástica externa protetora que amortece os impactos entre eles.

1.2 Objetivos da Tese

A análise de interferência é normalmente tratada como uma análise estática, considerando que a presença de um *riser* a montante do outro cause um efeito de sombra com relação à velocidade de corrente que incide sobre o *riser* de jusante, como recomendado por Huse [5], o que certamente irá gerar uma tendência de colisão entre os *risers*. A velocidade de corrente atuante sobre o *riser* de jusante é menor do que a

velocidade atuante no *riser* de montante, sendo esta velocidade função de fatores como rugosidade dos tubos, diâmetro, distância e da intensidade da corrente.

Contudo, o estudo da interferência entre *risers* é um problema mais complexo de hidrodinâmica, já que a ação da corrente marinha sobre o *riser* não se limita somente à parcela estática da força de arrasto, com o coeficiente de arrasto estático sendo obtido em função do número de Reynolds. A eventual existência de vibrações nos *risers* causadas pelo desprendimento de vórtices, poderá gerar ampliações nos coeficientes de arrastos estáticos. Além das vibrações transversais ao fluxo de corrente, que geram as ampliações mencionadas, há, também, vibrações no plano de interferência em que a corrente encontra-se atuando, chamadas de vibrações *in line*, estas com tendência a reduzir ainda mais à distância entre os *risers*.

O problema se torna mais complexo, quando se consideram os diferentes comportamentos hidrodinâmicos dos *risers* em função da geometria do conjunto, que depende da disposição e do espaçamento entre eles. Quanto à disposição dos *risers*, pode ser alinhados (*tandem*), ver Figura 1.4, quando eles estão paralelos à direção da corrente, ou lado a lado (*side by side*), ver Figura 1.5, ou ainda oblíqua (*staggered*), ver Figura 1.6. O arranjo geométrico dos *risers* normalmente utilizado, considera a existência de um espaçamento estático entre os *risers* superior a 10 vezes o diâmetro do maior *riser*, contudo a resposta estática e dinâmica dos *risers* torna este espaçamento variável no tempo e inferior ao valor inicial.

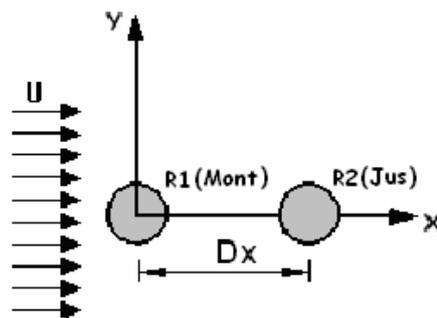


Figura 1.4 – Geometria dos *risers* alinhados (*tandem*).

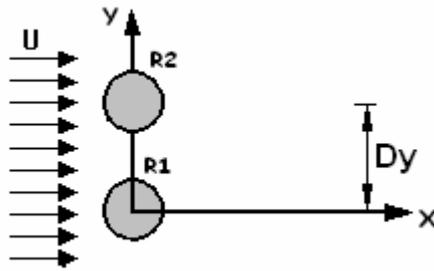


Figura 1.5 - Geometria dos *risers* lado a lado (*side by side*).

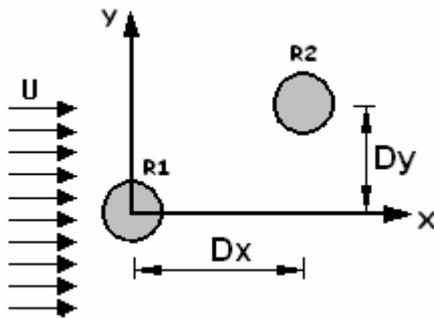


Figura 1.6 - Geometria dos *risers* oblíqua (*staggered*).

Os perfis de correntes marinhas, sejam eles operacionais ou extremos, associados às dimensões transversais dos risers, recaem no intervalo do número de Reynolds com ordem de grandeza entre 10^4 e 10^6 , conforme está mostrado no Capítulo 3 deste trabalho . Para esta ordem de grandeza do número de Reynolds, a esteira de vórtices é totalmente turbulenta, conforme está mostrado na Figura 1.7.

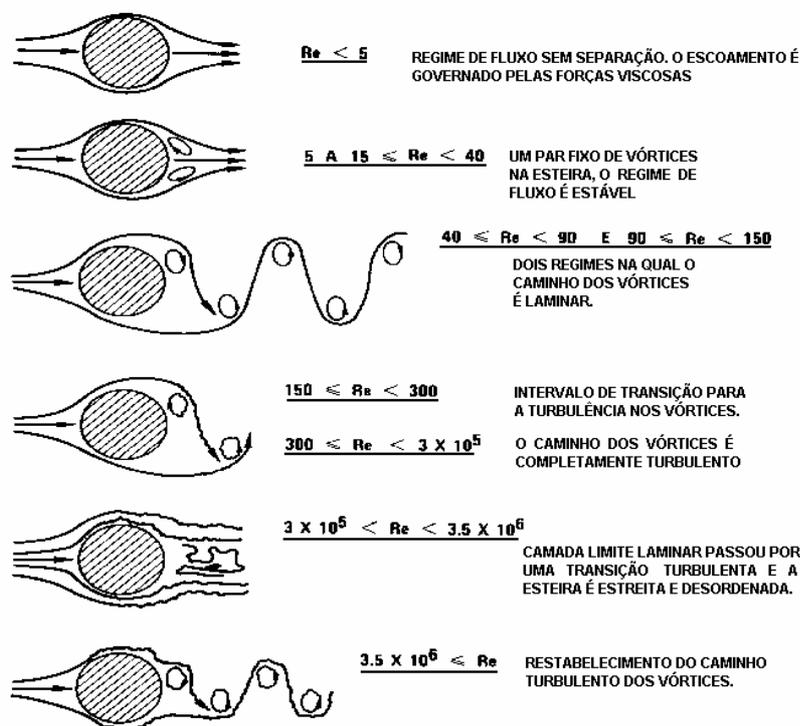


Figura 1.7 – Esquema de desprendimento dos vórtices em função do Número de Reynolds [6].

Diante do exposto, vê-se a necessidade de desenvolver este trabalho para investigar o comportamento hidrodinâmico quando há dois risers alinhados e com um pequeno espaçamento entre eles.

Esta investigação constitui-se de estudos experimentais, realizados no National Maritime Research Institute (NMRI), do Japão, e simulações numéricas usando a metodologia denominada de dinâmica dos fluidos computacional, ou como é mais conhecida pela sigla em inglês CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Através destes estudos, visa-se caracterizar o comportamento hidrodinâmico quando há dois risers alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5 vezes o diâmetro, isto é, os efeitos gerados pelas vibrações induzidas por vórtices e pela esteira gerada pelo *riser* de montante.

A Figura 1.8 obtida na referência [7], dá uma idéia da complexidade do fenômeno. Embora, apresente as linhas de corrente para um escoamento com baixo número de Reynolds, igual a 6400, pode-se observar a intensidade da turbulência gerada pelo arranjo dos *risers*.

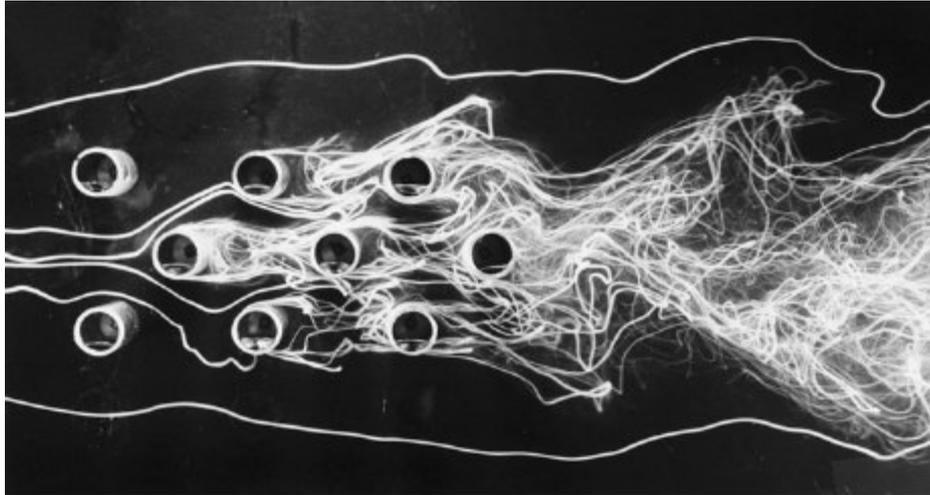


Figura 1.8 – Linhas de Corrente em torno de um Agrupamento de Cilindros para Número de Reynolds de 6400, ver referência [7].

É importante salientar que o arranjo dos *risers* das plataformas do tipo TLP, Monocoluna e Spar buoy é similar ao arranjo de cilindros apresentado na Figura 1.8.

1.3 Descrição dos Capítulos

No Capítulo 2 deste trabalho, é apresentado um resumo do estado da arte atual deste assunto, mostrando desde os artigos precursores, como os escritos pelo engenheiro Erling Huse do Marintek, aos mais atuais e as recomendações das normas em suas últimas revisões, focando no projeto de norma DNV-RP-F203 [8] e nas normas, DNV OS-F201 [9] e API 2RD [10].

Os demais Capítulos deste trabalho, estão descritos a seguir:

Capítulo 3– Neste Capítulo, é feita uma descrição detalhada do fenômeno de despreendimento de vórtices e caracterizado o regime de escoamento que atua sobre os *risers*, mostrando que os mesmos estão sujeitos a ocorrência deste fenômeno. É apresentada uma descrição dos estudos experimentais feitos no tanque de reboque do NMRI para um modelo de *riser* isolado e dois modelos de *risers* alinhados (in tandem), assim como, uma descrição dos estudos experimentais feitos pela Shell, cujos resultados estão apresentados na referência [11].

Além disso, são apresentados os resultados para as condições em que os *risers* estão alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5 vezes o diâmetro. Procurando-se caracterizar o comportamento hidrodinâmico e o seu impacto na interferência.

Capítulo 4- Neste Capítulo, é feita uma descrição da metodologia da dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) e o seu uso como uma ferramenta para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos para um *riser* isolado e para o caso de dois *risers* alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5D, como foi feito nos estudos experimentais.

Capítulo 5- Neste Capítulo, é feita uma descrição do efeito de sombra proposto por Huse [5], mostrando inclusive sua validação experimental, conforme descrito no artigo [12] e comparando com os resultados dos estudos experimentais apresentados no Capítulo 3, e com os resultados das simulações numéricas apresentadas no Capítulo 4.

Capítulo 6- Conclusões e um resumo das recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 7- Referências bibliográficas consultadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Anexo A- Planilha de cálculo, usando o programa Mathcad, para obtenção da razão de massa dos *risers*.

Anexo B- Descrição da formação e desprendimento dos vórtices e estudo da camada limite.

Anexo C- Apresentação dos resultados dos estudos experimentais para *riser* isolado e para dois *risers*.

Anexo D- Arquivo de Entrada e Saída de Dados do Programa SHEAR 7.

Anexo E- Descrição Resumida do Programa ANSYS-CFX.

Anexo F- Estudo da Turbulência.

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO ATUAL DOS ESTUDOS DE INTERFERÊNCIA

2.1 Histórico dos Estudos de Interferência

O estudo de interferência entre *risers* de uma plataforma surgiu ainda nos anos 70, quando foi formado um JIP (*Joint Industry Project*) para o estudo de plataformas do tipo TLP (*Tension Leg Platform*). Estudos posteriores culminaram com a instalação em 1984 da TLP de *Hutton*, da companhia *Conoco*, no mar do norte em lâmina d'água de 148 metros. Posteriormente, outras TLPs, em maiores lâminas d'água, foram e serão instaladas, conforme está mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Histórico e Previsão da Instalação de plataformas do tipo TLP [13] e [14].

Plataforma	Localização	LDA (m)	Empresa Operadora	Ano de Instalação
Hutton	Mar do Norte	148	Sevmorneftegaz	1984
Oveng	Guiné Equatorial	271	HESS	2006
Snorre A	Mar do Norte	335	Norsk Hydro	1992
Heidrun	Mar do Norte	345	Statoil	1995
Prince	Golfo do México	449	El Paso	2001
Okume/Ebano	W. Africa	503	HESS	2006
Morpeth	Golfo do México	518	EnI	1998
Jolliet	Golfo do México	536	ConocoPhilips	1989
Typhoon	Golfo do México	639	Chevron Texaco	2001
Matterhorn	Golfo do México	859	Total Fina Elf	2003
Auger	Golfo do México	873	Shell	1994
Mars	Golfo do México	894	Shell	1996
Brutus	Golfo do México	910	Shell	2001
Ram Powell	Golfo do México	980	Shell	1997
Marlim	Golfo do México	988	BP	1999
W. Seno A	Indonésia	1006	Unocal	2003
Allegheny	Golfo do México	1021	EnI	1999
Ursa	Golfo do México	1158	Shell	1999
Kizomba A	Oestes da África	1177	Exxon Mobil	2003
Kizomba B	Oestes da África	1178	Exxon Mobil	2005
Neptune	Golfo do México	1296	BHP Biliton	2007
Marco Polo	Golfo do México	1311	El Paso	2003
Shenzi	Golfo do México	1311	BHP Biliton	2009
Magnolia	Golfo do México	1432	ConocoPhilips	2004

O uso das plataformas do tipo *Spar Buoy* a partir de 1996, que também usam *risers* rígidos verticais de produção tracionados no topo, reforçou a necessidade de realizar estudos de interferência. A Tabela 2.2 mostra as plataformas do tipo *spar buoy* instaladas e uma previsão de instalação até 2009:

Tabela 2.2 – Histórico e Previsão da Instalação de plataformas do tipo *Spar Buoy* [13] e [14].

Plataforma / Tipo	Localização	LDA (m)	Empresa Operadora	Ano de Instalação
Neptune / Classic Spar	Golfo do México	588	Kerr McGee	1997
Medusa / Truss Spar.	Golfo do México	678	Murphy	2003
Genesis / Classic Spar	Golfo do México	792	Chevron Texaco	1999
Gunnison / Truss Spar	Golfo do México	945	Kerr McGee	2003
Front Runner / Truss Spar.	Golfo do México	1015	Murphy	2004
Boomvang / Truss Spar.	Golfo do México	1052	Kerr McGee	2002
Nansen / Truss Spar	Golfo do México	1121	Kerr McGee	2002
Telemark / MinDOC	Golfo do México	1219	ATP	2008
Tahiti / Truss Spar	Golfo do México	1250	Chevron Texaco	2008
Holstein / Truss Spar	Golfo do México	1324	BP	2003
Kikeh / Truss Spar	Malásia	1330	BP	2005
Mad Dog/ Truss Spar.	Golfo do México	1372	BP	2005
Hoover Diana / Classic Spar	Golfo do México	1463	Exxon Mobil	2000
Constitution / Truss Spar	Golfo do México	1515	Anadarko	2006
Red Hawk / Truss Spar	Golfo do México	1615	Anadarko	2004
Horn Mountain/ Truss Spar.	Golfo do México	1653	BP	2002
Devil's Tower / Truss Spar.	Golfo do México	1710	Dominion	2003
Perdido / Truss Spar	Golfo do México	2383	Shell	2009

Nota: Nas Tabelas 2.1 e 2.2 as plataformas estão ordenadas por lâminas d'água.

Visando um melhor conhecimento dos fatores que influenciam a interferência entre *risers*, inúmeros trabalhos experimentais e numéricos foram e estão sendo desenvolvidos em vários países. Dentre os trabalhos que mais se destacaram, tem-se os desenvolvidos pelo engenheiro Erling Huse do Marintek [5], [12], [15] e [16].

No trabalho intitulado “Drag in Oscillatory Flow Interpreted From Wake Considerations” [15], publicado em 1987, somente 3 anos após a instalação da 1ª TLP de *Hutton*, o autor baseando-se na formulação de Schlichting [17] apresenta uma metodologia preliminar para o efeito de sombra. Esta metodologia foi sendo aprimorada ao longo dos anos, para em 1993 chegar à forma como é usada nos dias de hoje, ver referência [18]. Este efeito de sombra será descrito com mais detalhes no Capítulo 5 deste trabalho.

Outros artigos do autor se seguiram para validação do efeito de sombra, como por exemplo, a referência [12] de 1996, que apresenta os resultados experimentais feitos com modelos de grandes dimensões em um *Fjord* da Noruega.

2.2 Análise de Alguns Artigos Publicados

Conforme foi mencionado anteriormente, inúmeros trabalhos foram e estão sendo desenvolvidos visando o entendimento e à obtenção de uma metodologia para tratar a interferência de *risers*. A maioria dos estudos foi conduzida na Noruega, através do MARINTEK, com a constituição de alguns programas de pesquisa; dentre eles, se destaca o Norwegian Deepwater Programme (NDP), os quais estão gerando excelentes resultados, tanto numéricos, quanto experimentais. As referências [5], [8], [12],[15] e [16] documentam parte destes resultados.

Dentre os estudos realizados pelo Marintek, deve ser dada uma atenção especial à referência [12], intitulada *Experimental Investigation of Deep Sea Riser Interaction*, que descreve os ensaios realizados em um *Fjord* e que está resumido a seguir.

No verão de 1993, foi realizada uma série de ensaios para validar os resultados numéricos obtidos para simular a interferência entre *risers*. Para a realização destes ensaios, foi escolhida a entrada de um *Fjord*, localizado na cidade de Skarnsund a 100 km ao norte de *Trondheim*, cujas dimensões são 550 m de largura por 190 m de profundidade, onde há uma velocidade de corrente superior a 2 nós (1,03 m/s) gerada pela maré.

Os modelos foram montados a partir de uma plataforma de trabalho ancorada em uma ponte próxima e um catamarã. No fundo, havia uma poita, fornecendo tração constante ao conjunto de modelos de *risers*, conforme está mostrado na Figura 2.1.

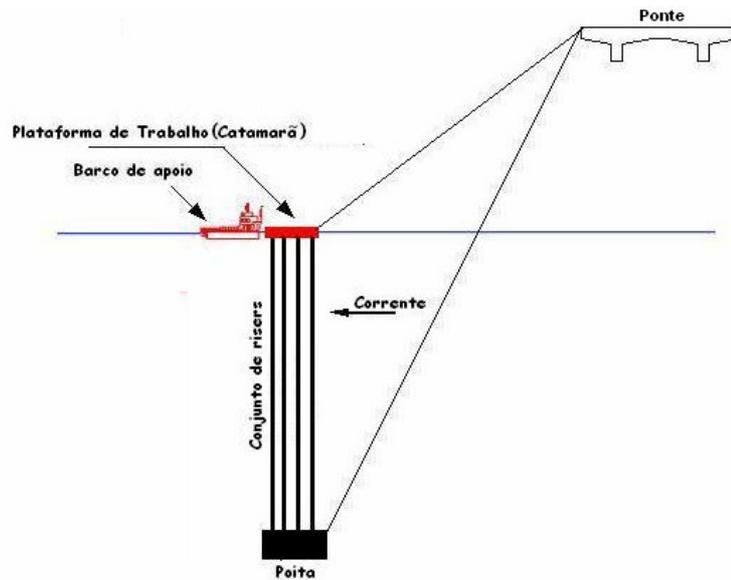


Figura 2.1- Esquema do Aparato de Ensaio [12].

Para a construção do modelo usado nos ensaios, foi considerada a seguinte premissa: o fenômeno das vibrações induzidas por desprendimento de vórtices deveria ocorrer, já que induz um acréscimo do coeficiente de arrasto e, conseqüentemente, da deflexão estática sofrida pelo modelo. Para que a premissa fosse atendida, a rigidez flexional do modelo associada a sua massa deveriam gerar frequências naturais dentro do intervalo do desprendimento de vórtices, o que foi feito considerando escala de velocidade 1:1, ou seja, mesma velocidade para o modelo e o protótipo; como conseqüência desta escolha, te-se que, usando o mesmo material no modelo e no protótipo, o módulo de elasticidade longitudinal será o mesmo ($E_{\text{PROTOTIPO}} = E_{\text{MODELO}}$), o que facilita o atendimento da rigidez flexional. A Tabela 2.3 mostra a lista completa dos fatores de escala para os diversos parâmetros. O fator de escala (λ) para o comprimento foi igual a 30, ver Tabela 2.4.

Tabela 2.3- Fatores de Escala para os diversos parâmetros.

Parâmetros	Fator de Escala
Comprimento	λ
Velocidade	1
Tempo	λ
Aceleração	λ^{-1}
Frequência	λ^{-1}
Força	λ^2
Massa	λ^3
Modulo de Elasticidade	1

O conjunto de modelos de *risers* utilizados nos ensaios teve por objetivo reproduzir o sistema de *riser* de uma plataforma do tipo TLP. O arranjo dos modelos de *risers* está mostrado na Figura 2.2.

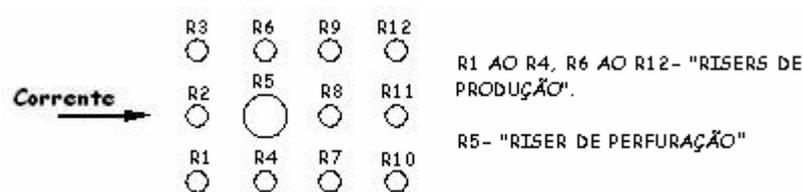


Figura 2.2 – Arranjo dos modelos de *risers* [12].

A Tabela 2.4 mostra as dimensões do modelo usado nos ensaios e do protótipo.

Tabela 2.4- Dimensões Modelo x Protótipo.

Parâmetros	Unidade	Modelo	Protótipo
Comprimento	m (metros)	44.4	1332
Diâmetro externo – <i>Riser</i> de Produção		0.010	0.30
Esp. de Parede – <i>Riser</i> de Produção		0.001	0.03
Diâmetro externo – <i>Riser</i> de Perfuração		0.030	0.90
Esp. de Parede – <i>Riser</i> de Perfuração		0.002	0.06
Espaçamento entre centro a centro dos <i>risers</i>		0.30	9.00

A Tabela 2.5 mostra os dois valores de tração no topo adotado para os *risers* de produção e para o *riser* de perfuração.

Tabela 2.5- Tração no Topo dos *Risers*.

Tipo de <i>Riser</i>	Tração no Topo (kN)
Produção	412
	862
Perfuração	1205

Quanto à medição das correntes, era esperado que a maré gerasse perfis uniformes ao longo da profundidade, o que não ocorreu. O perfil de corrente variou em intensidade e também, em direção ao longo da profundidade, tornando-se uma fonte de incertezas nos resultados. A Figura 2.3 apresenta os perfis de corrente medidos extrapolados para a profundidade do protótipo, mostrando que houve uma inversão próximo do fundo, para um dos casos de carregamento.

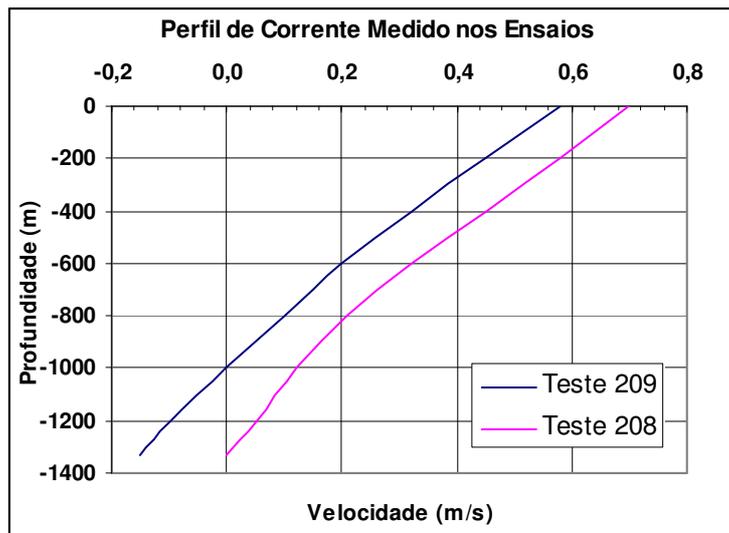


Figura 2.3- Perfis de Corrente obtidos nos Ensaios [12].

As conclusões apresentadas, mostraram que houve colisões ocasionais entre os *risers* R2 (produção) e R5 (perfuração) para o perfil de maior intensidade (teste 208) e para uma tração no topo igual a 412kN; já para o perfil de menor intensidade (teste 209), não foram verificadas colisões. Já as colisões entre os *risers* R1 (produção) e R4 (produção), ocorreram na mesma frequência do desprendimento de vórtices, considerando o perfil de corrente de maior intensidade e uma tração no topo de 412kN.

É importante destacar um fenômeno detectado por Huse [12] nos ensaios, para maiores velocidades de corrente e geometria deformada dos *risers* muito próximas; além das vibrações de alta frequência devidas ao fenômeno de desprendimento de vórtices com amplitudes na ordem de 1.5 vezes o diâmetro, ocorreram, também, vibrações *in-line* de baixa frequência no *riser* de jusante com altura (dupla amplitude) de 30 a 40 vezes o diâmetro. Contudo, o autor conclui que para a ocorrência do fenômeno, a velocidade da corrente seria de tal magnitude e as geometrias deformadas dos *risers* estariam tão próximas, que a colisão será inevitável, ou seja, mesmo que este fenômeno (grande amplitude e baixa frequência) não ocorresse, haveria a colisão entre os *risers*. Esta instabilidade do *riser* de jusante detectada por Huse, também é mencionada por Wu [18], e recentemente incorporado no projeto de norma DNV [8]. Nos ensaios conduzidos no NMRI, apresentados no capítulo 3, a ocorrência deste fenômeno não foi verificada.

Outros artigos do mesmo autor se seguiram, todos focando no estudo da interferência usando o efeito de sombra gerado pela esteira dos vórtices quando há dois ou mais *risers*.

Há um artigo, do ano 1977, de autoria de M. M. Zdravkovich, ver referência [20], em que o fenômeno da interferência entre dois cilindros, com diferentes geometrias, foi estudado para diferentes espaçamentos, se tornando um marco, visto que é referenciado pela maioria dos artigos que consta na referência bibliográfica.

Para finalizar este item, têm-se as referências [11] e [21], que apresentam os resultados de estudos experimentais. Os resultados apresentados ao longo destas referências, foram comparados com os estudos experimentais feitos no NMRI. Ambos foram de extrema valia para o entendimento do fenômeno; particularmente, os resultados apresentados na referência [20], que ratificaram as conclusões obtidas a partir dos estudos experimentais realizados nesta tese.

2.3 Análise das Recomendações das Normas

Focando nas normas, serão inicialmente verificadas as recomendações das normas da DNV [8] e [9]. A referência [8], intitulada *Riser Interference*, ainda se encontra na fase de aprovação e, dentro em breve, se tornará uma referência para os projetistas de *risers* no que se refere às análises de interferência, visto que enfoca com profundidade o assunto. O projeto de norma é constituído de 6 seções, sendo que na seção 3, é enfocada a interação hidrodinâmica entre dois ou mais *risers*, conforme está descrito a seguir:

O projeto de norma recomenda que seja realizada uma avaliação da interação hidrodinâmica para todos os casos de carregamento em que a interferência entre *risers* possa ocorrer.

Ao longo do texto, é mencionado que esforços significativos foram e estão sendo desenvolvidos para investigar a interação hidrodinâmica entre *risers* quando submetidos à carga de corrente marinha; já para o entendimento dos efeitos das ondas na interação hidrodinâmica, modestos esforços estão sendo realizados. Não há resultados experimentais disponíveis abordando a interação hidrodinâmica quando há efeitos combinados de onda, corrente e movimento da plataforma.

No texto do projeto de norma, é mencionado que a partir da literatura pode-se distinguir três diferentes mecanismos de geração de forças excitando o *riser* de jusante quando imerso na esteira do *riser* de montante:

1) o espectro das forças hidrodinâmicas para o *riser* de jusante é constituído de uma ampla faixa de frequências devido ao escoamento turbulento e ao desprendimento de vórtices gerado pelo *riser* de montante;

2) forças periódicas geradas pelo desprendimento de vórtices do *riser* de montante gerando vibrações por desprendimento de vórtices com alta frequência e com amplitude limitada no *riser* de jusante;

3) variação das forças hidrodinâmicas médias, dependendo da posição relativa (X/D e Y/D) dos *risers*.

Os 3 diferentes mecanismos dependerão, em geral, do número de Reynolds, conseqüentemente, do nível de turbulência do escoamento.

O projeto de norma menciona que estudos recentes mostram que a interação hidrodinâmica para o *riser* de montante pode ser ignorada, conseqüentemente, este pode ser tratado como um *riser* isolado. Já os efeitos da interação hidrodinâmica para o *riser* de jusante não podem ser desprezados.

Como mencionado anteriormente, o entendimento físico das forças geradas devidas à interação hidrodinâmica entre 2 ou mais *risers* é de extrema complexidade. Dentre os efeitos considerados importantes para avaliação da interação de *risers*, de acordo com o projeto de norma, tem-se:

1) forças hidrodinâmicas média: tem-se tipicamente as forças geradas pelo efeito de sombra que tende a aproximar os *risers*;

2) efeitos das vibrações induzidas por vórtices nos *risers* de montante e jusante: será considerado através da amplificação do coeficiente de arrasto;

3) vibrações geradas pela instabilidade da esteira de vórtices no *riser* de jusante; será considerado, tipicamente, através de vibrações de grande amplitude, as quais serão dependentes das forças geradas pelo *riser* de montante, isto é, da posição relativa (X/D e Y/D) dos *risers*.

A combinação das velocidades relativas geradas por vibrações induzidas por desprendimento de vórtices e por instabilidade da esteira do *riser* de montante será necessária para avaliar as cargas de impacto entre os *risers* quando as colisões são admitidas.

Pesquisas básicas tornam-se necessárias para o completo entendimento da interação hidrodinâmica entre os *risers*. Portanto, simplificações cercadas de hipóteses conservativas tornam-se necessárias em análises práticas de interferência.

No sub-item 3.2 do projeto de norma, é apresentada uma abordagem para a obtenção das forças médias devidas às cargas de corrente, como descrito a seguir:

O carregamento hidrodinâmico no *riser* de jusante será influenciado pela esteira gerada pelo *riser* de montante. As forças médias atuantes no *riser* de jusante serão obtidas da seguinte forma:

- 1) Redução no arrasto devido ao efeito de sombra;
- 2) Força de sustentação devida ao gradiente de velocidades na esteira.

As forças médias mencionadas irão depender da distância relativa entre os *risers*. Os coeficientes hidrodinâmicos médios serão convenientemente representados em um sistema local de coordenadas, conforme está mostrado na Figura 2.4.

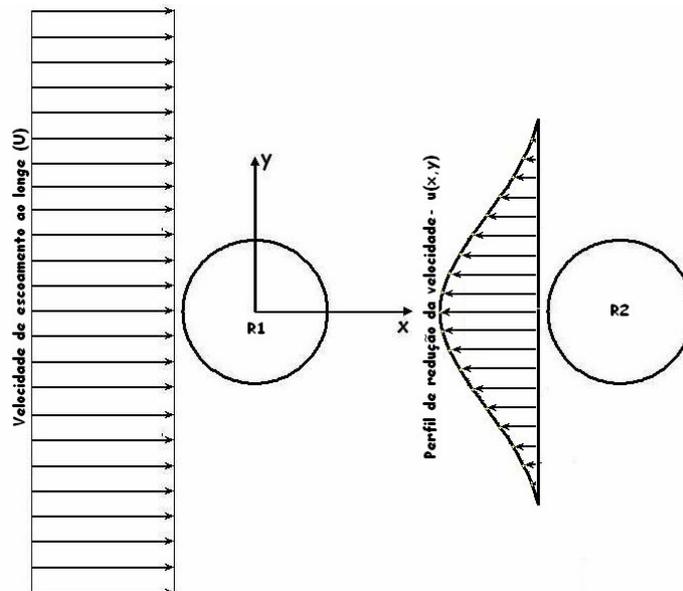


Figura 2.4- Sistema de coordenadas e redução da velocidade para o *riser* de jusante [8].

O projeto de norma recomenda que seja considerada uma variação dos coeficientes hidrodinâmicos médios em função da posição relativa dos *risers*, conforme está mostrado nas Figuras 2.5 e 2.6:

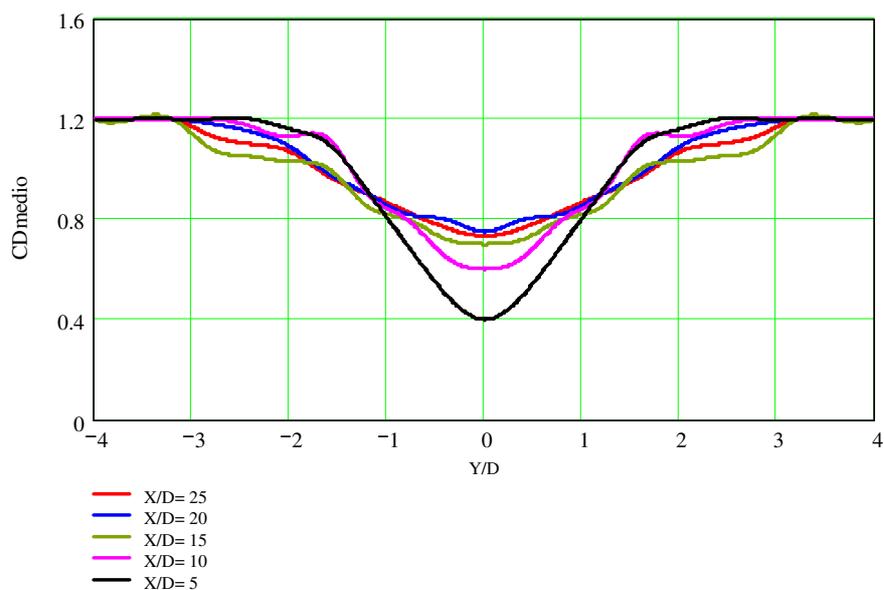


Figura 2.5- Variação do Coeficiente de Arrasto Médio (CD) para o *Riser* de Jusante, em função da Posição Relativa dos *Risers* (X/D e Y/D) [8].

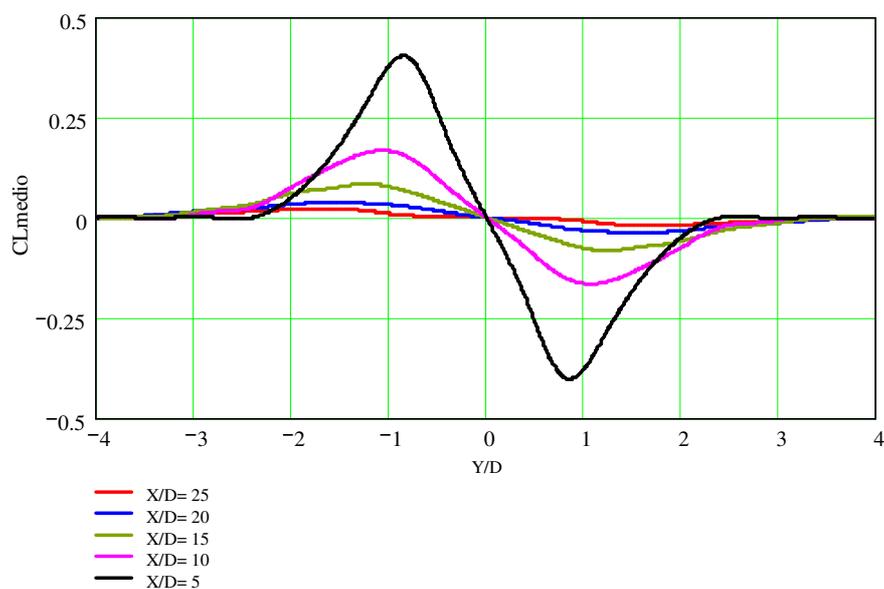


Figura 2.6- Variação do Coeficiente de Sustentação Médio (CL_{medio}) para o *Riser* de Jusante, em função da Posição Relativa dos *Risers* (X/D e Y/D) [8].

Conforme mencionado no projeto de norma, o efeito de sombra é mais significativo quando os *risers* estão próximos. Além disso, a partir da Figura 2.6, pode-se intuir que a força de sustentação média atuante no *riser* de jusante devido ao efeito de esteira, quando a distância relativa na vertical está na faixa de $-3 \leq Y/D \leq 3$, sempre irá deslocá-lo para a linha de centro da esteira, ver Figura 2.7:

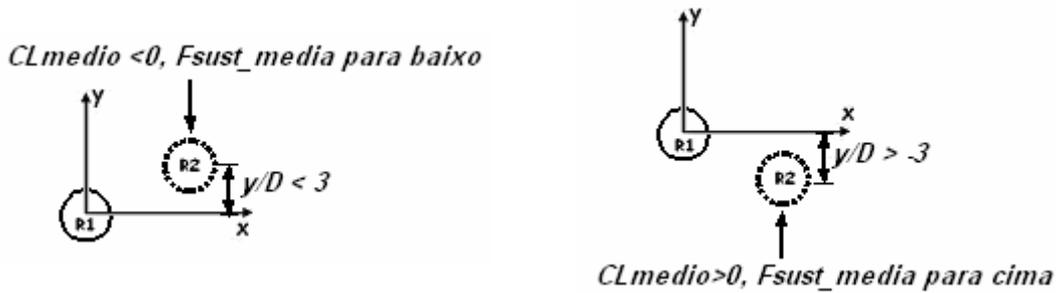


Figura 2.7- Força de Sustentação Média, devida ao Efeito de Esteira.

Nos sub-itens 3.3 e 3.4 do projeto de norma, estão apresentadas as recomendações referentes à instabilidade do riser de jusante gerada pela esteira do riser de montante, sendo esta instabilidade caracterizada pelo riser de jusante apresentar grande amplitude de vibração com baixa frequência; é importante salientar que este fenômeno foi detectado por Huse [12], conforme descrito anteriormente. Contudo, o autor não creditou grande importância a este fenômeno, mas segundo o projeto de norma [8], ele terá grande influência na ocorrência do choque. O projeto de norma menciona ainda que a instabilidade é devida às múltiplas posições de equilíbrio estático e às vibrações geradas pela esteira e menciona que não há equilíbrio estático se a velocidade de corrente excede a velocidade de corrente crítica que é avaliada através de um parâmetro de estabilidade (β), conforme está mostrado a seguir:

$$aV_r^2 > \beta$$

O parâmetro de massa adimensional (a) e velocidade reduzida (V_r) são definidos como:

$$a = \frac{\rho D^2}{2m}$$

$$V_r = \frac{V_0}{\omega_N D}$$

onde;

ρ : massa específica do fluido interno (kg/m^3);

D : diâmetro do riser (m);

m : massa unitária do riser, incluindo massa de água adicionada (kg/m);

V_0 : velocidade de corrente (m/s);

ω_N : frequência natural do 1º modo (rad/s).

O parâmetro de massa adimensional (a) igual a 0.2 é sugerido por Wu [18] como representativo para a maioria dos *risers*, o que foi confirmado pelo cálculo apresentado no anexo A, e resumido na Tabela 2.6:

Tabela 2.6- Parâmetro de Massa Adimensional para diferentes tipos de *Risers*.

Tipo de <i>Riser</i>	a
Rígido Vertical de Produção em Plataformas do Tipo TLP e <i>Spar buoy</i> (TTR)	0.193
Rígido Vertical de Perfuração	0.187
Flexível de Produção de 6 polegadas	0.19

Quanto ao valor do parâmetro de estabilidade (β), o projeto de norma sugere adotar 10, para um espaçamento dos risers (x/D) igual a 15. Contudo, ao se consultar o trabalho de Wu [18], observa-se que este parâmetro dependerá do espaçamento relativo entre os *risers* (X/D e Y/D).

No item 3.5 do projeto de norma, são abordados os modelos para interação hidrodinâmica nas análises globais e se faz uma importante recomendação de que as análises globais no domínio da frequência não são aplicáveis quando se considera a interação hidrodinâmica entre dois *risers*.

Dentre os modelos para interação hidrodinâmica nas análises globais apresentados no projeto de norma, tem-se:

a) Fluxo não perturbado

Nesta abordagem, é ignorada a interação hidrodinâmica entre os *risers* e deve ser considerada somente para uma verificação preliminar se há risco de interferência, sendo particularmente válida se a área de interação hidrodinâmica é pequena quando comparada ao comprimento total do riser, como por exemplo, avaliação da interferência entre risers flexíveis e de aço (SCR) com diferentes ângulos de topo.

Esta abordagem não é recomendada para análise da interferência de risers rígidos verticais, como os adotados em plataformas do tipo TLP, *Spar buoy* e monocoluna.

b) Modelo de Fluxo Numérico

Usando uma abordagem simplificada de dinâmica dos fluidos computacional, através da consideração dos efeitos viscosos do escoamento entre dois risers em duas dimensões.

c) Modelo da Força Média Paramétrica

Nesta abordagem, os efeitos da interação hidrodinâmica serão considerados através dos coeficientes hidrodinâmicos médios atuantes no *riser* de jusante obtidos a partir da posição relativa dos *risers* (X/D e Y/D), conforme apresentado anteriormente nas Figuras 2.5 e 2.6.

Esta abordagem é recomendada para aplicação em programas de análise global no domínio do tempo, considerando que os coeficientes hidrodinâmicos totais (médio + dinâmico) são obtidos através de uma análise em duas dimensões.

Uma importante recomendação desta abordagem é a consideração da amplificação do coeficiente de arrasto além dos efeitos gerados pela variação dos coeficientes hidrodinâmicos médios (CD e CL).

d) Modelo da esteira paramétrica

Nesta abordagem, o efeito de sombra proposto por Huse [5], [12], será considerado e as forças devidas ao desprendimento de vórtices deverão ser desprezadas.

As recomendações apresentadas se referem ao projeto de norma mencionado na referência [8], o qual é específico para análise de interferência, como pode-se observar pela profundidade das recomendações.

A seguir estão apresentadas as recomendações das normas para uso geral em análise risers da DnV, referência [9] e da API, referência [10].

A norma DNV [9] em sua seção 5, item H, intitulado *Special Considerations*, há o sub item H-100, que trata da interferência entre *risers*. Contudo, é importante salientar que esta norma apresenta recomendações gerais sobre análise de *risers*, não sendo focada, como o projeto de norma mencionado anteriormente, no estudo da interferência entre *risers*.

Neste sub item H-100, recomenda-se que no projeto de um sistema de *risers* seja feita uma avaliação do risco potencial de interferência com outros *risers*, linhas de ancoragem, tendões, cascos etc. As análises de interferência devem ser feitas para todas as fases do projeto, ou seja, da instalação do *riser* até sua condição extrema de operação.

Ainda, de acordo com a norma, uma abordagem de projeto deverá prever duas situações possíveis; é importante salientar que esta abordagem também é mencionada na referência [8], mencionadas a seguir:

- Colisão entre os *risers* é permitida;
- Colisão entre os *risers* não é permitida.

Para a 1ª situação, deverá ser verificada se a integridade dos *risers* não é comprometida, isto é, se os *risers* continuam atendendo aos critérios dos estados últimos de ruptura (ULS – *Ultimate Limit State*) e de utilização ou serviço (SLS – *Serviceability Limit State*). Para esta situação, é recomendada uma avaliação da frequência de ocorrência da colisão, localização da colisão, assim como, a força impulsiva ou a velocidade relativa entre os *risers* antes de ocorrer a colisão. É também recomendado que se faça uma análise local da região de contato para avaliar os níveis de tensões e danos nos *risers*, quando ocorre a colisão.

Há uma nota de orientação na referência [9], sugerindo um procedimento de análise devido à complexidade das análises de interferência. O procedimento sugerido está descrito a seguir:

- Realização de estudos paramétricos, usando-se uma abordagem simplificada, para identificação das condições e configurações críticas:
 - Cargas ambientais simplificadas, como por exemplo, consideração da carga de corrente, sem considerar a direcionalidade do perfil;
 - Modelos simplificados de Vibração Induzida pela Esteira do um riser de montante sobre o de jusante (WIO) e Vibrações Induzidas por desprendimento de vórtices (VIV) para corrente somente ou considerando fluxo laminar para onda;
 - Critério de colisão em um plano.
- Realização de análises detalhadas para avaliar a interferência, nos casos mais críticos, usando uma ou mais metodologia mencionada a seguir:
 - Modelos de interação hidrodinâmica;
 - Modelo para colisão global;
 - Cálculos usando Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD;
 - Modelos para Avaliação da Força de Colisão (Explicit collision load effect models);

➤ Avaliação das consequências da colisão, usando o critério de estado limite de ruptura e serviço.

As recomendações apresentadas na referência [9] são genéricas, já que esta norma não é específica para interferência de *risers*, e serão complementadas pelas recomendações do projeto de norma, referência [8].

Uma outra norma que trata do assunto é a API 2RD [10], que em seu item 3, intitulado *General Design Considerations*, há o sub-item 3.4.2 em que são apresentadas algumas recomendações relativas à interferência de *risers*. As recomendações são semelhantes às da DNV [9], visto que recomenda alguns métodos para análise da interferência, mas também não enfoca com profundidade o assunto.

Além do item 3.4.2, existe o sub-item 5.10 com as seguintes recomendações complementares:

- Sub-item 5.10.1 : a interferência ocorre quando há uma colisão de um *riser* com um outro objeto, que pode ser outro *riser*, linha de ancoragem, tendões etc. Esta colisão deveria ser evitada.

- Sub-item 5.10.2 : a interferência pode ocorrer entre um *riser* e algum objeto próximo a ele. Este objeto pode ser o casco de uma embarcação, linha de ancoragem de uma embarcação ou outro *riser*. Este outro *riser* pode ter diferentes dimensões, ou diferentes propriedades, tais como: conteúdo interno, incrustação marinha, tração no topo, distribuição de tensão ou outra condição de contorno, assim como, um dos *risers* poderá estar submetido a um diferente regime de fluxo, causado pela esteira de outro *riser*.

- Sub-item 5.10.3 : o sistema de *riser* deve ser projetado evitando ou limitando a interferência, devido ao risco potencial de dano ao *riser* ou as outras partes do casco da embarcação caso exista contato. A interação hidrodinâmica entre um conjunto de *risers*, conforme mencionado no sub-item 6.3.3.4.2, assim como, a perda parcial do sistema de tracionamento, como por exemplo, a perda de um tanque de flutuação (*buoyancy can*) no *riser* rígido vertical de produção de uma plataforma do tipo *Spar buoy*, deve ser considerada no projeto.

- Sub-item 5.10.4 : duas abordagens devem ser consideradas na análise de interferência entre *risers*: a 1ª abordagem está associada à inexistência ou à baixa

probabilidade de ocorrência de colisão; neste caso, a norma sugere que o projetista deva adotar um valor de mínimo de probabilidade, verificando-a durante uma operação ou uma determinada condição ambiental. A 2ª abordagem admite a colisão entre os *risers* ou entre eles e outros objetos; neste caso, a colisão deve ser modelada e os *risers* projetados para suportá-la.

- Sub-item 5.10.5: as duas abordagens mencionadas anteriormente devem considerar que a colisão não é admitida em condições ambientais extremas com o sistema de tracionamento dos *risers* intactos. A colisão só será admitida em condições de sobrevivência, ou seja, condição ambiental extrema associada a danos na plataforma, como por exemplo, dano em um tanque de lastro, gerando um adernamento ou perda parcial do sistema de tracionamento de um ou mais *risers*.

Complementando os itens mencionados, a referência [10], prescreve no sub-item 6.3.3.4, algumas recomendações no que tange à interação hidrodinâmica entre 2 *risers*, que eles intitulam de *dual riser*, ou de um conjunto de *risers*, que eles intitulam de *multiple riser*.

No sub-item 6.3.3.4.1, a referência [10] trata do comportamento do *riser* de jusante quando ele está localizado na esteira do de montante. A norma alerta para o efeito de sucção que há no de jusante quando este está muito próximo do de montante, gerando um aumento significativo na probabilidade de colisão.

A referência [10], assim com a referência [8], também recomendam que os coeficientes hidrodinâmicos (arrasto- CD e sustentação- CL) sejam obtidos em função do espaçamento longitudinal e transversal dos *risers*, caso eles tenham o mesmo diâmetro. Caso eles tenham diferentes diâmetros, além do espaçamento longitudinal e transversal, a norma menciona que a razão entre os diâmetros é um importante parâmetro que deverá ser considerado.

A norma menciona que os coeficientes hidrodinâmicos do *riser* de jusante são menos sensíveis às mudanças do número de Reynolds. Complementa com a informação de que o limite de interferência deve ser determinado em função da posição do *riser* de jusante em relação à esteira gerada pelo de montante. A norma recomenda ainda que se o diâmetro do *riser* de montante for maior ou igual ao diâmetro do de jusante, então a rugosidade da parede do de montante é um parâmetro importante, já que a rugosidade é

importante parâmetro no aspecto da esteira (dimensões, intensidade de turbulência etc) do *riser* de montante.

A norma faz menção, assim como, a referência [8] quanto à instabilidade hidrodinâmica gerada pela esteira do *riser* de montante e diz que será função dos seguintes parâmetros:

- Espaçamento longitudinal e transversal (X/D_1 , Y/D_1);
- Razão entre os diâmetros (D_1/D_2);
- Amplitude da vibração transversal do *riser* de montante (A_y/D_1);
- Rugosidade da parede do *riser* de montante (k/D_1);
- Número de Reynolds.

Quanto ao conjunto de *risers*, a API 2RD recomenda que no projeto seja feito um estudo do sincronismo das esteiras e de que seja escolhido um espaçamento entre eles, de forma que a esteira gerada pelo de montante não induza instabilidade nos demais que se encontram à jusante.

CAPÍTULO 3

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE FLUIDO AO REDOR DOS RISERS

3.1 Introdução

Como mencionado anteriormente, o principal objetivo deste trabalho é o estudo da interferência entre *risers* e não uma profunda investigação do comportamento hidrodinâmico dos mesmos. Contudo, para o entendimento dos fatores que influenciam a interferência entre os *risers*, há necessidade de uma verificação da interação hidrodinâmica que é gerada pelo desprendimento dos vórtices em torno de um *riser* e pelo efeito da esteira deste sobre o *riser* localizado à jusante.

Neste Capítulo, é mostrado que o desprendimento de vórtices irá excitar frequências naturais dos *risers*, gerando vibrações transversais e longitudinais que terão conseqüências na interferência entre os mesmos.

Visando o entendimento da interação hidrodinâmica, foram realizados estudos experimentais pelo autor deste trabalho junto ao National Maritime Research Institute (NMRI) no Japão. Estes estudos apresentam elevada complexidade devido às dimensões do modelo empregado e ao elevado valor do número de Reynolds, na faixa de 10^4 até 10^5 , o que gerou cargas hidrodinâmicas elevadas sobre os modelos, inclusive, provocando a ruptura de vários deles.

Ao longo deste Capítulo, serão apresentados os resultados dos estudos experimentais mencionados acima e feita uma comparação com os estudos experimentais mencionados nas referências [11] e [21].

3.2 Estudo do Desprendimento de Vórtices

O escoamento de um fluido ao redor de um *riser* poderá gerar desprendimento de vórtices, sendo a geometria e frequência destes vórtices ditados pela proporção entre as forças de inércia e viscosas geradas pelo regime de escoamento, a qual é representada por um número adimensional denominado número de Reynolds (Re), apresentado na equação 3.1. As Figuras 3.1 a 3.6 obtidas a partir da referência [22], mostram a esteira de desprendimento de vórtices para diferentes números de Reynolds; este

comportamento pode ser associado com o regime de desprendimento de vórtices proposto por Blevins [6] e apresentado na Figura 1.7 do Capítulo 1.

$$\text{Re} = \frac{U.D}{\nu} \tag{3.1}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Onde:

U : Velocidade do escoamento ao longe;

D : Diâmetro do *riser*;

ν : Viscosidade cinemática do fluido;

μ : Viscosidade dinâmica do fluido;

ρ : Massa específica do fluido.

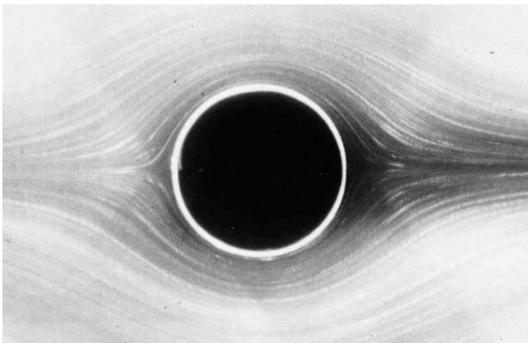


Fig. 3.1- Fluxo uniforme em torno de um *riser* para $\text{Re} = 0.16$. Há predominância das forças viscosas e as linhas de corrente são simétricas [22].

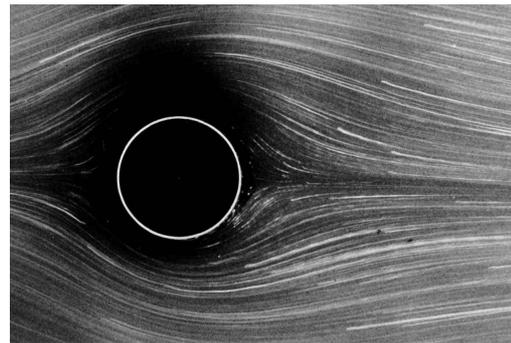


Fig. 3.2- Escoamento ao redor de um *riser* para $\text{Re} = 1.54$. Pode-se verificar claramente a perda de simetria das linhas de corrente, quando comparada à Figura 3.1, mas ainda não há separação e desprendimento de vórtices [22].

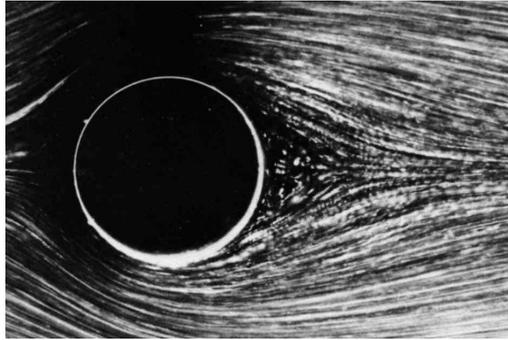


Fig. 3.3 - Escoamento ao redor de um *riser* para $Re= 9.6$. Pode-se verificar claramente a separação do escoamento e a formação de um par de vórtices a jusante [22].



Fig. 3.4 - Escoamento ao redor de um *riser* para $Re= 26$. Pode-se verificar o alongamento da esteira [22].

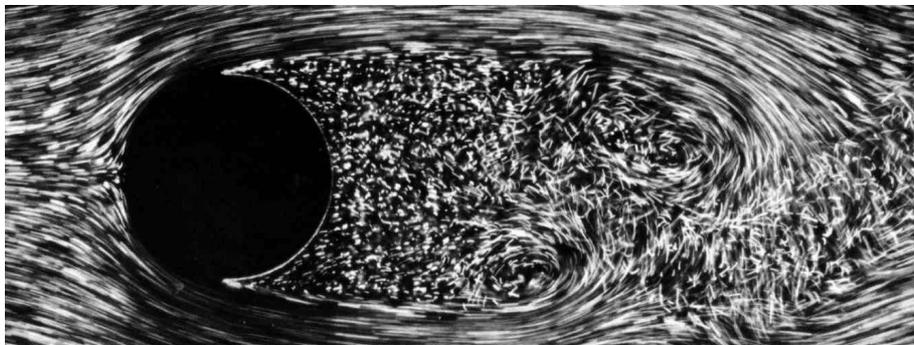


Fig. 3.5 - Escoamento ao redor de um *riser* para $Re= 2000$. Pode-se ver claramente o efeito da camada limite e o ponto de separação da camada limite e a intensidade de turbulência da esteira [22].

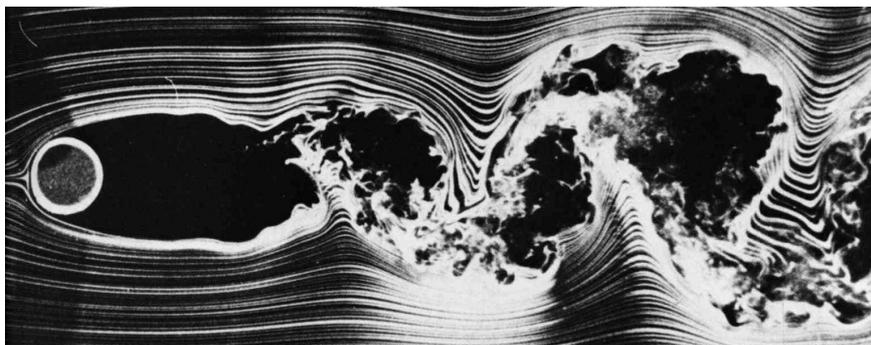


Fig 3.6 - Escoamento ao redor de um *riser* para $Re= 10000$. Pode-se ver claramente o aumento da intensidade de turbulência da esteira [22].

O fenômeno do desprendimento de vórtices ocorre devido ao efeito da viscosidade do fluido que gera forças de atrito das partículas do fluido com a parede do *riser*, originando o que denominamos de camada limite, ou seja, junto à parede do tubo a velocidade é zero e em uma distância infinitesimal, espessura da camada limite, a velocidade retorna ao valor que o fluido está escoando na região afastada do *riser* (U), fora da camada limite. O mecanismo físico de formação e desprendimento dos vórtices,

assim como a formulação matemática para determinar a ordem de grandeza da espessura da camada limite, estão apresentados no Anexo B.

Conforme apresentado a seguir, a ordem de grandeza do limite inferior do número de Reynolds para os casos reais de *risers* usados nas plataformas de produção e/ou perfuração é de 10^4 . De acordo com a Figura 1.7, o caminho dos vórtices para valores do número de Reynolds maiores ou iguais que 10^4 é completamente turbulento e o desprendimento é alternado ao longo do tempo, gerando pressões diferenciais que por sua vez induzem ao aparecimento de uma força de natureza dinâmica incidindo sobre o *riser*, que pode causar vibrações no mesmo desde que a frequência de desprendimento destes vórtices esteja próxima de uma das suas frequências naturais.

O exemplo a seguir, discute o intervalo do número de Reynolds no qual os *risers*, sejam eles de produção ou perfuração, estão contidos:

- Diâmetro dos *risers* : o menor diâmetro encontrado para os *risers* na Bacia de Campos é em torno de 8 cm, correspondendo a um cabo elétrico ou a um umbilical de controle. O maior diâmetro é de 21 polegadas (53.4cm), correspondente aos *risers* de perfuração sem flutuadores.

- Viscosidade cinemática da água (20° C): $\nu = 9.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Valor padrão usado pelo programa ANFLEX [24]).

- Perfis de Corrente: As velocidades dos perfis de corrente na Bacia de Campos variam de 0.1 m/s, condição de operação, até 2 m/s, condição extrema associada a um período de recorrência de 100 anos.

Combinando-se os diâmetros com as velocidades de corrente tem-se, portanto, os seguintes valores limites para o número de Reynolds:

$$\text{Re}_1 = \frac{0.1 * 0.08}{9.24 * 10^{-7}} = 8.7 * 10^3 \text{ (ordem de grandeza de } 10^4\text{)}$$

$$\text{Re}_2 = \frac{2 * 0.08}{9.24 * 10^{-7}} = 1.7 * 10^5$$

$$\text{Re}_3 = \frac{0.1 * 0.534}{9.24 * 10^{-7}} = 5.8 * 10^4$$

$$\text{Re}_4 = \frac{2 * 0.534}{9.24 * 10^{-7}} = 1.2 * 10^6 \text{ (ordem de grandeza de } 10^6\text{)}$$

A Figura 3.7 obtida a partir da referência [6], apresenta uma relação entre o número de Reynolds e um outro número adimensional usualmente associado à frequência de desprendimento de vórtice que é denominado de número de Strouhal.

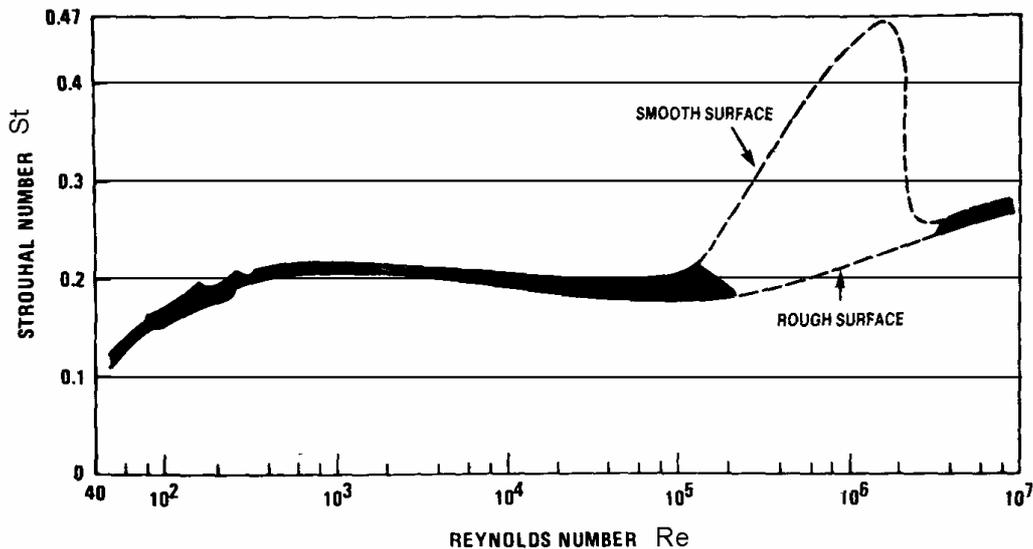


Figura 3.7 – Número de Strouhal (St) x Número de Reynolds (Re) [6].

A frequência do desprendimento de vórtices ou frequência de *shedding* é dada pela seguinte expressão:

$$f_{st} = \frac{SU}{D} \quad (3.2)$$

Onde:

S : Número de Strouhal.

U : Velocidade de escoamento na região afastada do *riser*.

D : Diâmetro do *riser*.

Observando-se a Figura 3.7 e complementando com as informações apresentadas na Tabela 3.1, obtida a partir da referência [23], tem-se que para valores de Reynolds até 10^5 (regime denominado pelo autor de sub-crítico), o número de Strouhal é aproximadamente igual a 0.2, já para intervalos de Reynolds acima de 10^5 (intervalo de regime denominados de crítico ou supercrítico), o número de Strouhal irá depender da rugosidade da parede do *riser*; quanto menor a rugosidade, maior será o número de Strouhal, podendo atingir até 0.45. A relação linear entre o número de Strouhal e frequência de desprendimento dos vórtices, nos permite afirmar que quanto maior o

número de Strouhal mais alta é a frequência de desprendimento de vórtices, gerando, conseqüentemente, maiores danos à fadiga, já que são excitadas as frequências naturais mais altas e com maiores curvaturas. Além disso, pode ocorrer a amplificação dos coeficientes hidrodinâmicos (arrasto- CD e sustentação- CL) que podem levar os *risers* a colidirem. Caso o contato entre *risers* ocorra no intervalo de amplitude de movimento de *shedding*, a frequência de ocorrência da colisão entre os *risers* também aumenta.

Tabela 3.1- Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para o Escoamento em torno de um *Riser* em Função do Número de Reynolds. [23].

	A Subcrítico	B Crítico	C Supercrítico	D Pós-crítico
Camada Limite	Laminar	Transição	Turbulenta	Turbulenta
Ponto de Desprendimento	Em torno de 82 graus.	Transição	120- 130 graus.	Em torno de 120 graus.
Característica da Esteira próximo do Ponto de Descolamento.	Laminar		Separação laminar. Restabelecimento do caminho turbulento dos vórtices.	Turbulento
Número de Strouhal	$St = 0.212 - \frac{2.7}{Re}$	Transição	0.35 – 0.45	Em torno 0.29
Esteira de vórtices	Re < 60 – Laminar; 60 < Re < 500 – Caminho de vórtices Re > 5000 – Turbulento			
Faixa do Número de Reynolds.	< 2 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵ a 5 x 10 ⁵	5 x 10 ⁵ – 3 x 10 ⁶	> 3 x 10 ⁶

Analisando a ordem de grandeza do número de Reynolds obtida anteriormente ($10^4 < Re < 10^6$) para os *risers*, pode-se concluir que os mesmos recaem, na maioria dos casos, em um dos três comportamentos: subcrítico, crítico e supercrítico.

Portanto, como mostrado a seguir, o intervalo para as frequências de desprendimento de vórtices está compreendido entre 0.04 a 5Hz.

Para umbilical de controle hidráulico, tem-se:

$$fst_1 = \frac{0.2 * 0.1}{0.08} = 0.25 \text{ Hz} \qquad fst_2 = \frac{0.2 * 2}{0.08} = 5 \text{ Hz}$$

Para um riser de perfuração, tem-se:

$$fst_3 = \frac{0.2 * 0.1}{0.534} = 0.04 \text{ Hz}$$

$$fst_4 = \frac{0.35 * 2}{0.534} = 1.31 \text{ Hz} \text{ ou } \frac{0.45 * 2}{0.534} = 1.69 \text{ Hz}$$

Para um riser rígido vertical de produção de 10" (25 cm), tem-se:

$$fst_5 = \frac{0.2 * 0.1}{0.25} = 0.08 \text{ Hz} \qquad \qquad \qquad fst_6 = \frac{0.2 * 2}{0.25} = 1.6 \text{ Hz}$$

Para um riser flexível de 11.13" (28.3 cm), tem-se:

$$fst_7 = \frac{0.2 * 0.1}{0.283} = 0.07 \text{ Hz} \qquad \qquad \qquad fst_8 = \frac{0.2 * 2}{0.283} = 1.4 \text{ Hz}$$

3.2.1 Frequências Naturais dos *Risers* Típicos em Lâmina D'água de 1000m

A seguir, são apresentados os resultados das análises numéricas usando o módulo de vibrações livres do programa ANFLEX [24], para obtenção das frequências naturais de 4 *risers* típicos usados nas atividades de produção e perfuração de petróleo no mar, incluindo umbilical hidráulico de controle.

3.2.1.1 Umbilical com 5 funções hidráulicas mais cabo elétrico (5F + CE) com configuração em catenária livre.

A Tabela 3.2 apresenta as propriedades geométricas, físicas, mecânicas e hidrodinâmicas para este tipo de umbilical.

Tabela 3.2- Propriedades do Umbilical de 5F +CE.

Peso no Ar Vazio	19.0 kgf/m
Peso no Ar (Mangueiras Cheias)	19.3 kgf/m
Peso na Água Vazio	12.3 kgf/m
Peso na Água (Mangueiras Cheias)	12.7 kgf/m
Diâmetro Externo	0.1016 m
Diâmetro Interno (Equivalente)	0.0195 m
Rigidez Axial (EA)	75000 kN
Rigidez Flexional (EI)	3.6 kN.m ²
Rigidez Torsional (GJ _p)	61.1 kN.m ²
Coefficiente de Arrasto (C _D)	1.2
Coefficiente de Inércia (C _M)	2.0

Notas:

- 1) Foi considerado um fluido interno nas mangueiras hidráulicas, com peso específico igual a 1000kgf/m³;

2) Ângulo de topo da catenária igual a 7 graus.

Frequência natural do 1º modo é igual a: $f_{nat} = 0.02 \text{ Hz}$

A frequência natural do 1º modo está muito afastada do limite inferior das frequências de desprendimento dos vórtices, contudo os modos mais elevados, a partir do vigésimo terço as frequências naturais próximas deste limite, ver a frequência fst_1 calculada anteriormente.

Frequência natural do 20º modo: $f_{nat} = 0.22 \text{ Hz}$.

3.2.1.2 Riser Flexível para Exportação de Gás de 11.13” em catenária livre.

A Tabela 3.3 apresenta as propriedades geométricas, físicas, mecânicas e hidrodinâmicas para este tipo de riser.

Tabela 3.3 - Propriedades de Riser 11.13”.

Peso no Ar Vazio	212.64 kgf/m
Peso no Ar (Cheio de Água)	280.88 kgf/m
Peso na Água Vazio	87.67 kgf/m
Peso na Água (Cheio de Água)	155.91 kgf/m
Dímetro Externo	0.3940 m
Dímetro Interno	0.2826 m
Rigidez Axial (EA)	416660 kN
Rigidez Flexional (EI)	110 kN.m ²
Rigidez Torsional (GJ _p)	1000 kN.m ²
Coefficiente de Arrasto (C _D)	1.2
Coefficiente de Inércia (C _M)	2.0

Nota: Foi considerado um peso específico para o fluido interno igual a 195kgf/m³ (gás em alta pressão).

Frequência Natural (1º modo): $f_{nat} = 0.016 \text{ Hz}$.

A frequência natural do 1º modo está muito afastada do limite inferior das frequências de desprendimento dos vórtices, contudo a frequência natural do 6º modo próxima deste limite, ver a frequência fst_7 calculada anteriormente.

Frequência Natural (6º modo): $f_{nat} = 0.06 \text{ Hz}$

3.2.1.3 Riser Rígido Vertical de Produção de uma TLP com 10” de Diâmetro Externo

A Tabela 3.4 apresenta as propriedades geométricas, físicas, mecânicas e hidrodinâmicas para este tipo de *riser*.

Tabela 3.4 - Propriedades do Riser Rígido Vertical de Produção.

Peso no Ar Vazio	75.6 kgf/m
Peso no Ar (Cheio de Água)	117.6 kgf/m
Peso na Água Vazio	60.2 kgf/m
Peso na Água (Cheio de Água)	102.3 kgf/m
Diâmetro Externo	0.2540 m
Diâmetro Interno	0.2290 m
Rigidez Axial (EA)	1.99×10^6 kN
Rigidez Flexional (EI)	1.45×10^4 kN.m ²
Rigidez Torsional (GJ _p)	1.12×10^4 kN.m ²
Coefficiente de Arrasto (C _D)	1.2
Coefficiente de Inércia (C _M)	2.0

Notas:

1) Foi considerado um peso específico equivalente para o fluido interno igual a 410 kgf/m³ (Óleo escoando em uma coluna de produção de diâmetro interno igual a 5” com peso específico de 900 kgf/m³ e o espaço anular com gás em alta pressão com peso específico de 195 kgf/m³)

2) No topo, foi aplicada uma tração de 800 kN, o que corresponde a um *Tension Factor* de 1.5, associado a um *overpull* de 50000 lb.

Frequência Natural (1° modo): $f_{nat} = 0.032$ Hz.

A frequência do 1° modo não recai dentro do intervalo de frequências de desprendimento de vórtices. Contudo, a frequência natural do 2° modo, apresentada a seguir, está próxima, ver a frequência f_{st3} calculada anteriormente.

Frequência Natural (2° modo): $f_{nat} = 0.064$ Hz

3.2.1.4 *Riser* Rígido Vertical de Perfuração com 21 polegadas de diâmetro externo.

A Tabela 3.5 apresenta as propriedades geométricas, físicas, mecânicas e hidrodinâmicas para este tipo de *riser*.

Tabela 3.5- Propriedades do *Riser* Rígido Vertical de Perfuração.

Peso no Ar Vazio	163.07 kgf/m
Peso no Ar (Cheio de Água)	370.82 kgf/m
Peso na Água Vazio	114.64 kgf/m
Peso na Água (Cheio de Água)	322.40 kgf/m
Diâmetro Externo	0.533 m
Diâmetro Interno	0.508m
Rigidez Axial (EA)	4.3×10^6 kN
Rigidez Flexional (EI)	1.46×10^5 kN.m ²
Rigidez Torsional (GJ _p)	1.12×10^5 kN.m ²
Coefficiente de Arrasto (C _D)	1.2
Coefficiente de Inércia (C _M)	2.0

Notas:

1) Foi considerado como fluido interno uma lama de perfuração com peso específico de 10 ppg (1200 kgf/m³).

2) No topo, foi aplicada uma tração de 1960 kN , o que corresponde a um overpull na conexão LMRP/BOP de 50000 lb.

Frequência Natural (1º modo): $f_{nat} = 0.019$ Hz .

A frequência do 1º modo não recai dentro do intervalo de frequências de desprendimento de vórtices. Contudo, a frequência natural do 2º modo está próxima, ver a frequência f_{st3} calculada anteriormente.

Frequência Natural (2º modo): $f_{nat} = 0.039$ Hz

A conclusão do exemplo é de que há uma faixa de frequências naturais dos *risers* considerados, que coincide com as frequências de desprendimento de vórtices geradas pelas velocidades de corrente marinha. Portanto, o desprendimento de vórtices excitará uma ou mais frequências naturais, gerando amplitudes de vibrações no *riser* na direção do escoamento e transversal ao mesmo; na direção do escoamento há, ainda,

uma deflexão estática devido ao arrasto médio. Este comportamento estrutural-hidrodinâmico terá um forte impacto no estudo da interferência. Contudo, é importante salientar que o comportamento hidrodinâmico obtido para um *riser* não é representativo quando há dois *risers* próximos, ou seja, a interação hidrodinâmica entre eles será fortemente influenciada pela geometria (arranjo e dimensões), assim como, pelo regime de escoamento.

3.3 Impacto da Interação Hidrodinâmica nos Estudos de Interferência

O escoamento ao redor de dois ou mais *risers* irá gerar um comportamento hidrodinâmico, devido ao efeito da esteira, completamente diferente do comportamento de um *riser* isolado. Este comportamento está fortemente atrelado ao arranjo entre os *risers*, isto é, seus espaçamentos relativos (x/D e y/D). Visando compreender melhor este comportamento, será apresentado no item 3.4 a seguir, uma descrição dos estudos experimentais realizados pelo autor deste trabalho no NMRI e os estudos realizados pela Shell e apresentados na referência [11].

Como salientado por diversos autores, o problema da interferência é de grande complexidade, já que o escoamento ao redor de um *riser* isolado gera o desprendimento de vórtices que poderá excitar frequências naturais deste na direção transversal e na longitudinal; já para o caso de 2 ou mais *risers* alinhados ou não, o fluxo para o *riser* de jusante, dependendo da distância entre eles, é completamente perturbado pela esteira gerada pelo *riser* de montante.

3.4 Estudos Experimentais da Interação Hidrodinâmica

A seguir, é apresentada uma descrição dos estudos experimentais realizados no NMRI, assim como uma descrição dos estudos experimentais apresentados na referência [11].

3.4.1 Descrição dos Estudos Experimentais

A seguir, será descrito o aparato usado para a realização dos ensaios no NMRI e os ensaios executados por Allen e apresentado na referência [11].

3.4.1.1 Estudos Experimentais Realizados no NMRI do Japão

O trabalho experimental foi realizado nas facilidades do NMRI (National Maritime Research Institute) do Japão, que foi escolhido devido às dimensões do seu tanque de reboque, o que permitiu o uso de modelos elásticos com dimensões capazes de gerar elevados valores de número de Reynolds e com frequência natural que esteja dentro das frequências de desprendimento de vórtices geradas pelo escoamento. A seguir, será apresentada uma descrição do tanque e dos casos de ensaios.

3.4.1.1.1 Descrição do Tanque de Ensaio

Conforme mencionado anteriormente, o tanque de reboque do NMRI foi escolhido devido as suas dimensões, 150 m de comprimento, 7.5 m de largura e 3.5 m de profundidade. Sobre o tanque, há uma estrutura de aço, similar a uma ponte rolante, que denominamos de carro dinamométrico, o qual pode deslocar-se sobre trilhos com uma velocidade de até 2.6 m/s. Os trilhos sobre os quais o carro se desloca, estão perfeitamente horizontais, de forma que não haja indução de vibrações sobre o modelo. A Figura 3.8 mostra um vista geral do tanque de reboque e do carro dinamométrico.

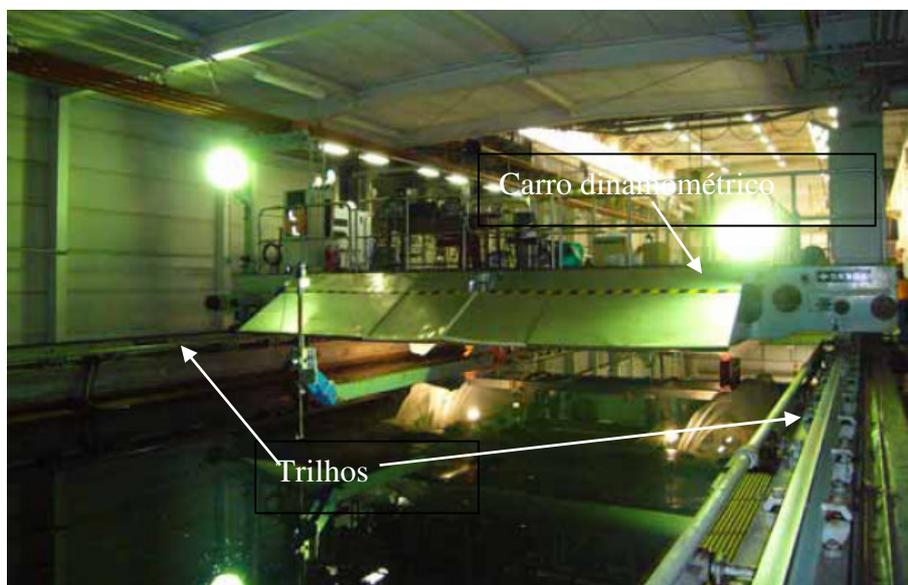


Figura 3.8 – Vista Geral do Tanque de Reboque.

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, as dimensões da estrutura de suportes do modelo e um esquemático de como está montado o aparato de ensaio.

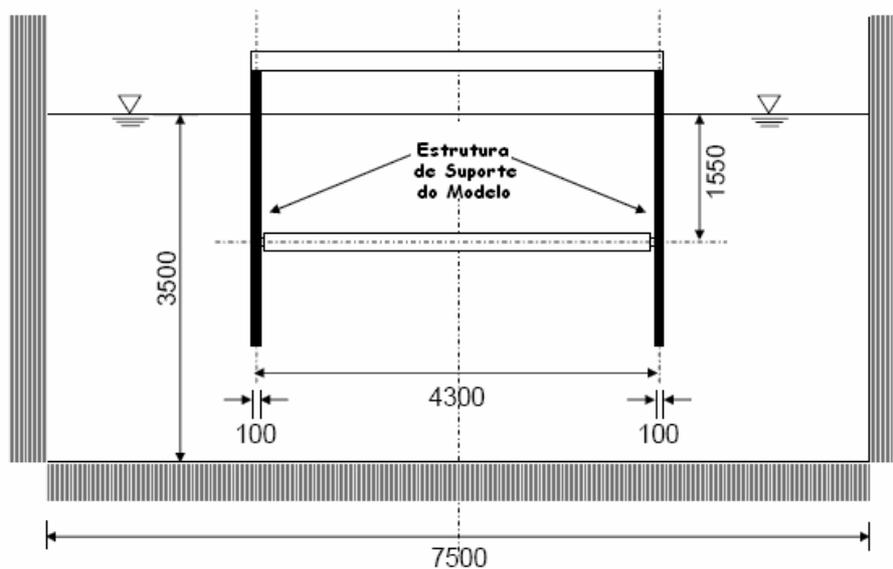


Figura 3.9- Dimensões da Estrutura de Suportação do Modelo.

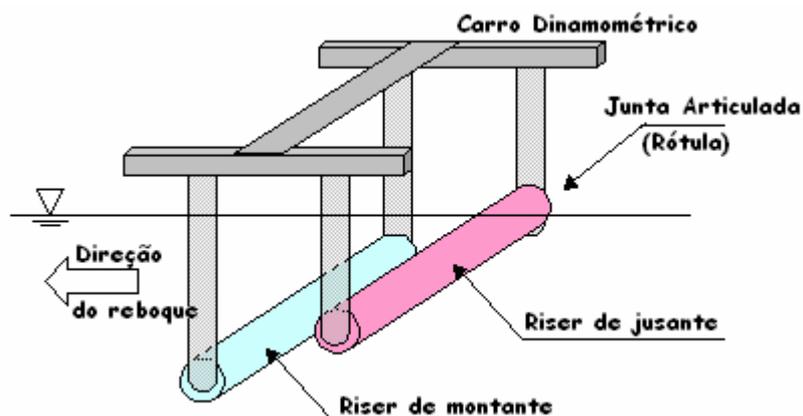


Figura 3.10- Esquema do Aparato de Ensaio.

Devido aos efeitos da estrutura de suportação, que restringe lateralmente o fluxo, ocorre um aumento do gradiente de pressão; este efeito é conhecido em inglês como *blockage effect*, o que implica que as velocidades atuantes sobre os *risers* deverão ser corrigidas por um fator de 2%. Este valor foi obtido deslocando a estrutura de suportação sem o modelo e medindo-se a velocidade no centro da estrutura.

Caso este percentual de correção da velocidade de escoamento no centro da estrutura de suportação não fosse obtido experimentalmente, como descrito, poderia ser obtido através da fórmula a seguir:

$$V_c = \frac{V}{1-\mu} \quad (3.3)$$

onde:

$$\mu = \frac{2t_s}{B}$$

- V_c : Velocidade de escoamento no centro da estrutura de suportação;
 V : Velocidade de deslocamento do carro dinamométrico;
 t_s : Espessura da chapa da estrutura de suportação, no caso há 2 chapas com 100 milímetros de espessura cada, ver Figura 3.9;
 B : Largura do tanque.

Se usássemos a fórmula 3.3, para a correção da velocidade teríamos:

$$\mu = \frac{2 \times 100}{7500} = 0.0267$$

$$V_c = \frac{V}{1-0.0267} = 1.0274V$$

Isto é , uma correção de 2.74%, próxima do valor obtido experimentalmente que foi de 2%

A freq ncia natural do conjunto constituído pelo carro dinamométrico e da estrutura de suportação do modelo é igual a 20Hz; como a maior freq ncia de desprendimento de vórtices esperada nos ensaios é igual a 3.7Hz e a freq ncia natural do modelo 3 igual a 2.31Hz, como será visto no item 4.1.1.3 adiante, pode-se concluir que não haverá efeitos secundários de vibrações da estrutura sobre as vibrações do modelo.

3.4.1.1.2 Descrição do Modelo

Para a confecção dos modelos, foram usados tubos de material acrílico com as propriedades geométricas, físicas e mecânicas mencionadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6- Propriedades Físicas, Mecânicas e Geométricas dos Modelos 1 e 2.

	Unidades	Modelo 1	Modelo 2
Diâmetro Externo	m	0.125	0.125
Diâmetro Interno	m	0.119	0.117
Espessura de Parede	mm	3	4
Peso específico	kN/m ³	11.58	11.58
Módulo de Elasticidade	kN/m ²	3 x 10 ⁶	3 x 10 ⁶

O modelo 1 com 3mm de espessura de parede não resistiu às forças hidrodinâmicas, rompendo-se para uma velocidade de 1.0 m/s. Houve a necessidade de um 2º modelo com 4mm de espessura de parede, que não resistiu às velocidades em torno de 1.2 m/s.

Posteriormente, foi ensaiado um 3º modelo, usando-se tubos de PVC com as propriedades geométricas, físicas e mecânicas mencionadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7- Propriedades Físicas, Mecânicas e Geométricas do Modelo 3.

	Unidades	Modelo 3
Diâmetro Externo	m	0.114
Diâmetro Interno	m	0.100
Espessura de Parede	mm	7
Peso específico	kN/m ³	13.73
Módulo de Elasticidade	kN/m ²	3.08 x 10 ⁶

Os modelos foram montados na horizontal com uma das extremidades rotulada e a outra conectada a 4 molas, aplicando uma força axial ao modelo para mantê-lo perfeitamente horizontal quando submerso, conforme está mostrado na Figura 3.11. A existência das 4 molas irá conferir uma pequena rigidez flexional ao modelo, de modo que este será melhor representado por um apoio elástico. As propriedades mecânicas e geométricas das molas estão apresentadas na Tabela 3.8.



a- Detalhe das molas para aplicação da força axial.



b- Detalhe da célula de carga para medição das forças hidrodinâmicas.

Figura 3.11 – Detalhe dos Apoios dos Modelos.

Tabela 3.8- Propriedades das Molas.

Item	Unidades	
Número de molas		4
Constante da mola	kgf/mm	0.039
Força Inicial	kgf	0.538
Comprimento Inicial da Mola	mm	80
Comprimento da mola após montagem	mm	131
Força Inicial das 4 molas	kgf	10.11

3.4.1.1.3 Determinação da Frequência Natural do Sistema

Foram feitos estudos experimentais e numéricos para obtenção das frequências naturais.

As frequências naturais e o amortecimento estrutural equivalente dos modelos foram obtidos através de testes de decaimento realizados com os modelos no ar e na água.

3.4.1.1.3.1 Cálculo das Frequências Naturais dos Modelos na água e no ar a partir do Teste de Decaimento

Para cada modelo, foram realizados 3 testes de decaimento e obtidas as séries temporais, a partir destas séries, foram obtidas as frequências naturais e os amortecimentos equivalentes na água e no ar.

Para a determinação do amortecimento equivalente, determina-se o decremento logarítmico (δ) pela seguinte expressão, ver referências [25] e [26]:

$$\delta = \ln\left(\frac{x(t)}{x(t+T_d)}\right) \quad (3.4)$$

Onde $x(t)$ e $x(t+T_D)$ são duas amplitudes consecutivas nas séries temporais de deslocamento.

As Tabelas 3.9 e 3.10 resumem, respectivamente, os decrementos logarítmicos médios para os 3 modelos estudados.

Tabela 3.9- Decremento Logarítmico para os Modelos 1, 2 e 3 na Água.

Modelo	δ médio
1	0.334
2	0.338
3	0.155

Tabela 3.10- Decremento Logarítmico para os Modelos 1, 2 e 3 no Ar.

Modelo	δ médio
1	0.132
2	0.131
3	0.040

A partir do decremento logarítmico, pode-se determinar a razão de amortecimento equivalente, usando a seguinte expressão:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (3.5)$$

Usando a expressão (3.5) e os valores dos decrementos logarítmicos apresentados nas Tabelas 3.9 e 3.10, obtêm-se as seguintes razões de amortecimento equivalente.

Tabela 3.11- Razão de Amortecimento Equivalente para os Modelos 1, 2 e 3 na água.

Modelo	ζ (%)
1	5.31
2	5.37
3	2.47

Tabela 3.12- Razão de Amortecimento Equivalente para os Modelos 1, 2 e 3 no ar.

Modelo	ζ (%)
1	2.09
2	2.08
3	0.63

As razões de amortecimento equivalentes apresentadas na Tabela 3.12 mostram que os modelos 1 e 2, feitos de tubos de acrílico, apresentam um amortecimento estrutural no ar equivalente (material + efeito das molas na extremidade do modelo) bastante superior ao PVC.

A partir das séries temporais, pode-se obter o espectro de deslocamento, o que nos fornece a frequência natural dos modelos; as Tabelas 3.13A e 3.13B mostram, respectivamente, os resultados obtidos nos testes de decaimento e os obtidos nas análises numéricas na água, usando o módulo de vibrações livres do programa ANFLEX [24].

Tabela 3.13A- Frequências Naturais dos Modelos obtidas nos Testes de Decaimento (Hz).

Modo	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Ar	Água	Ar	Água	Ar	Água
1°	7.86	1.85	7.88	2.06	5.84	2.31

Tabela 3.13B- Frequências Naturais dos Modelos obtidas nas Análises Numéricas (Hz).

Modos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Obs.
1°	1.79	1.99	2.26	Modo contido no plano YZ
2°	6.57	7.43	8.47	Modo contido no plano YZ

Nota: As frequências naturais no ar foram obtidas com os tubos vazios. Na água, o modelo foi inundado com água e havia a parcela de massa de água adicionada. Para o tubo de PVC, tem-se:

- Massa do tubo (M_{tubo}) : 3.3 kg/m
- Massa do fluido interno (água) (M_{int}) : 7.9 kg/m
- Massa adicionada (considerando-se $CA = 1$) (M_{adic}) : 10.3 kg/m

Os cálculos a seguir, mostram a coerência entre as frequências naturais obtidas no ar e na água nos testes de decaimento para o modelo 3 (PVC):

$$\frac{f_{AR}}{f_{AGUA}} = \frac{\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_{tubo}}}}{\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{(M_{tubo} + M_{int} + M_{adic})}}} = \sqrt{\frac{(M_{tubo} + M_{int} + M_{adic})}{M_{tubo}}} = \sqrt{\frac{3.3 + 7.9 + 10.3}{3.3}} = 2.55$$

Razão de frequências obtida no teste:

$$\left(\frac{f_{AR}}{f_{AGUA}} \right)_{TESTE} = \frac{5.84}{2.31} = 2.52$$

O valor obtido para as razões de frequências naturais no ar e na água obtido nos teste de decaimento e o obtido com a fórmula clássica, estão próximos. Isto mostra, que o valor do coeficiente de massa adicionada igual a 1 (CA) é adequado para cilindros.

3.4.1.1.4 Aparato para Medição das Forças, Deslocamentos e Velocidade.

Conforme está mostrado na Figura 3.11 apresentada anteriormente, em uma das extremidades foi colocada uma célula de carga para medir a força horizontal (arrasto) e a vertical (sustentação). Portanto, as forças hidrodinâmicas medidas e, conseqüentemente, os coeficientes hidrodinâmicos, representam um valor médio ao longo do modelo.

Para medição dos deslocamentos longitudinais, isto é, na direção x e transversais, isto é, na direção y, foi usada a técnica de processamento de imagem, que pode ser visto com maiores detalhes na referência [26], através da instalação de duas câmeras, uma na parte superior do carro dinamométrico para medição dos deslocamentos longitudinais e outra submersa para medição dos deslocamentos transversais. A Figura 3.12, mostra o posicionamento destas câmeras.

Os deslocamentos foram capturados em 7 marcações distribuídas ao longo dos 2 *risers*, sendo 3 marcações para registro do deslocamento transversal e 4 marcações para registro do deslocamento longitudinal. As câmeras possuíam capacidade de registrar frequências de até 100Hz e estes registros estavam sincronizados com a medição das forças. A Figura 3.12, mostra o posicionamento das marcações.

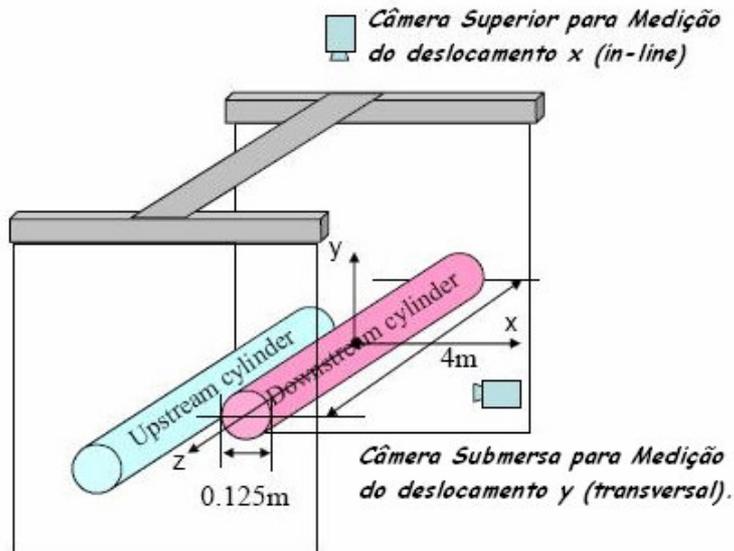


Fig. 3.12 - Posicionamento das Câmeras para Medição dos Deslocamentos.

Na Figura 3.13 pode-se observar que foram monitorados 4 deslocamentos longitudinais (direção x) e 3 transversais (direção y) para o *riser* isolado; já para os dois *risers* alinhados, foram monitorados 2 deslocamentos longitudinais em cada *riser* e 3 transversais para o *riser* de jusante, não sendo possível monitorar os deslocamentos transversais do *riser* de montante, devido ao *riser* de jusante impedir que a câmera submersa monitorasse os deslocamentos transversais do *riser* de montante. Também, não foi possível a colocação de uma câmera na frente do *riser* de montante, já que sua estrutura de suporte iria gerar mudanças no escoamento. A câmera superior possuía 4 canais e a câmera submersa possuía 3 canais.

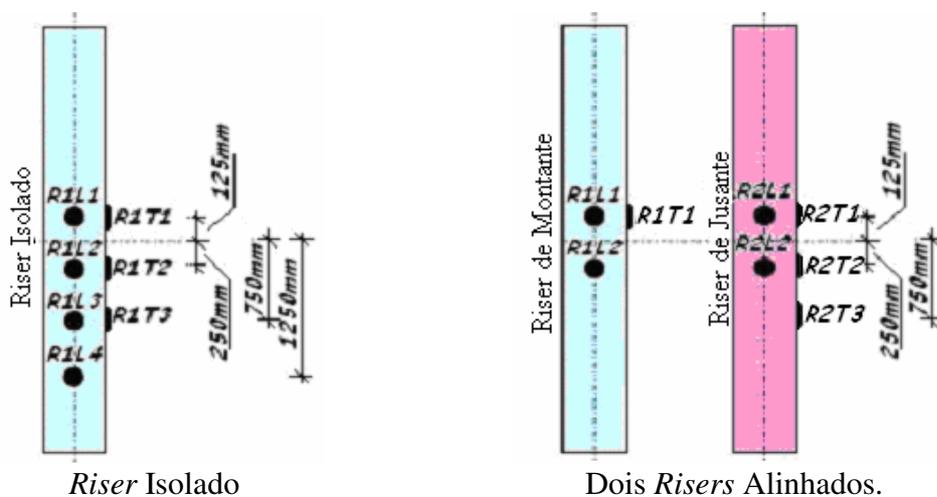


Figura 3.13 - Marcadores para Medição dos Deslocamentos para o Caso de um *Riser* e para o Caso de dois *Risers*.

Foi colocado um dispositivo para medição da velocidade horizontal de fluxo entre os 2 modelos, localizado a 0.77 m e 1.5D do eixo do *riser* de jusante, conforme está mostrado na Figura 3.14. O dispositivo para medição da velocidade é constituído de um correntômetro (VRT-200-20, Kenek), com uma frequência de aquisição de 50 Hz e armazenado no disco rígido de um computador.

Para o caso em que os *risers* estão afastados de 2 diâmetros, não foi colocado este dispositivo para evitar colisão com o *riser* de montante.

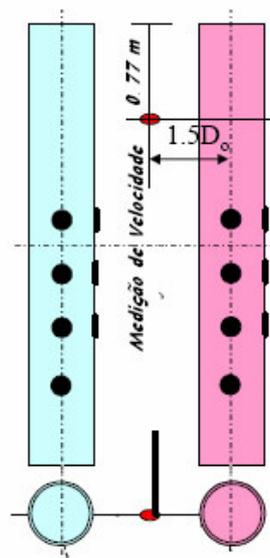


Figura 3.14- Posicionamento do Medidor da Velocidade Horizontal.

3.4.1.1.5 Procedimento e Estudos Realizados.

Todos os testes foram realizados com ambos os modelos cheios de água doce. Foram estudadas as seguintes configurações dos modelos:

- alinhados (*tandem*) e espaçados de 2, 3, 4 e 5D, conforme está mostrado na Figura 1.4 do Capítulo 1;
- oblíquos (*staggered*), espaçados de 2, 3, 4 e 5D e com ângulos α iguais a 15, 30, 45, 60 e 75 graus, conforme está mostrado na Figura 1.5 do Capítulo 1;
- lado a lado (*side by side*) e espaçados de 2, 3, 4 e 5D, conforme está mostrado na Figura 1.6 do Capítulo 1.

A Tabela 3.15 mostra as distâncias entre os modelos adotadas nos testes.

Tabela 3.15 – Distância entre os modelos.

Espaçamento	Distância (m)
2D	0.25
3D	0.375
4D	0.5
5D	0.625

Nota: Devido à cláusula de sigilo junto a Petróleos Brasileiros S. A, neste trabalho, serão apresentados somente os resultados quando os *risers* estão alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5D. No entanto, os resultados apresentados nesta tese são suficientes para que o propósito principal do estudo seja atingido.

Foi testado um intervalo de velocidade de corrente nominal de 0.2 m/s a 1.8 m/s, sendo o perfil de velocidades constante ao longo do comprimento do modelo. Este perfil de velocidade foi corrigido em 2%, conforme descrito anteriormente, devido à consideração da redução da seção de escoamento (*blockage effect*) gerada pela estrutura de suportação dos modelos, resultando nas velocidades e números de Reynolds apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16- Parâmetros dos Testes.

Vel. Nominal (m/s)	Vel. Corrigida (m/s)	Número de Reynolds	
		Modelo 1 e 2	Modelo 3
0.2	0.204	1.94E+04	#
0.4	0.408	3.88E+04	4.19E+04
0.6	0.612	5.81E+04	6.28E+04
0.8	0.816	7.75E+04	8.37E+04
0.9	0.918	#	9.42E+04
1.0	1.02	9.69E+04	1.05E+05
1.1	1.122	1.07E+05	1.15E+05
1.2	1.224	1.16E+05	1.26E+05
1.3	1.326	#	1.36E+05
1.4	1.428	#	1.47E+05
1.5	1.53	#	1.57E+05
1.6	1.632	#	1.67E+05
1.7	1.734	#	1.78E+05
1.8	1.836	#	1.88E+05

Notas:

- 1) O modelo 1 foi ensaiado para uma velocidade de 0.2 a 1 m/s. As velocidades de 1.1 e 1.2 m/s, conforme mencionado anteriormente só foram ensaiadas para o modelo 2.
- 2) A viscosidade cinemática (ν) da água para os ensaios referente aos modelos 1 e 2 era igual a $1.316 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, já que a temperatura da água do tanque era igual a 10°C . Já durante o ensaio do modelo 3, a temperatura da água do tanque era igual a 16°C , o que resultou em uma viscosidade cinemática de $1.111 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.4.1.2 Estudos Experimentais Realizados pela Shell

Os resultados deste estudo foram apresentados em um artigo da OTC de 2005, ver referência [11], e foram conduzidos por um grupo de pesquisadores liderados por Don Allen, que está estudando o fenômeno do desprendimento de vórtices e a sua associação com a interferência entre *risers* há muito tempo.

Sendo este artigo um dos poucos trabalhos em que foi ensaiado um cilindro livre para vibrar similar ao estudado no NMRI.

3.4.1.2.1 Descrição do Tanque

Todos os testes foram realizados no tanque do Centro de Tecnologia da Shell em Westhollow, Estados Unidos. A geração da corrente neste tanque é feita por um hélice de navio acionado por um motor hidráulico; esta corrente passa por um conjunto de telas, cuja função é minimizar a turbulência e os efeitos rotacionais do fluido; há, também, anteparas para gerar perfis de corrente triangulares ou trapezoidais.

O tanque possui um poço com profundidade de 50ft (15.24m) e diâmetro de 3ft (0.914m), de forma que seja possível ensaiar modelos com até 60ft (18.29m) de comprimento. A seção de teste possui as seguintes dimensões, 12ft (3.66m) de profundidade por 3.5ft (1.067m) de largura, conforme está mostrado na Figura 3.15.

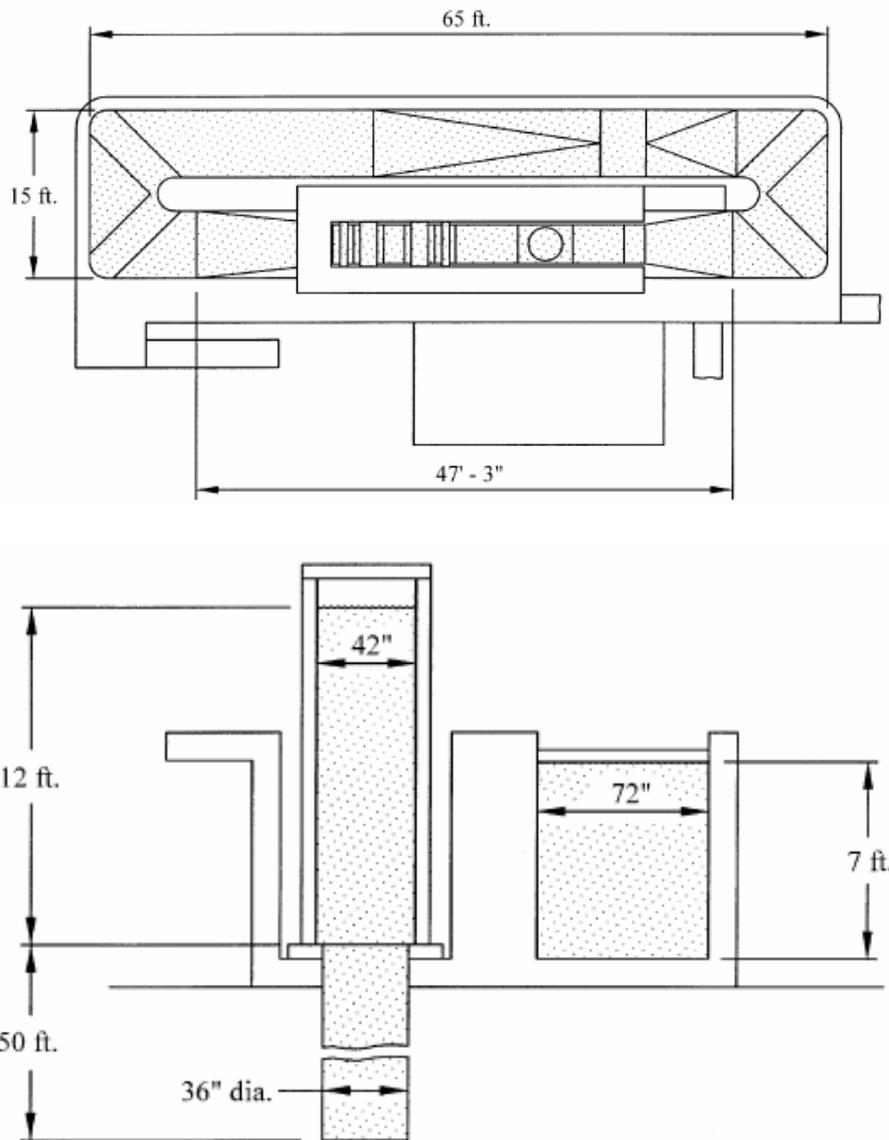


Figura 3.15- Vista em Planta, Dimensões e Seção Transversal do Tanque da Shell.

3.4.1.2.2 Descrição do Modelo

Para a confecção dos modelos, foram usados tubos de ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) com as propriedades geométricas, físicas e mecânicas mencionadas na Tabela 3.17.

Tabela 3.17- Propriedades Geométricas, Físicas e Mecânicas do Modelo.

	Unidades	
Diâmetro Externo	m	0.1143
Diâmetro Interno	m	0.098
Peso específico	kN/m ³	10.302
Módulo de Elasticidade	kN/m ²	2.7 x 10 ⁶

Os modelos foram montados verticalmente entre 2 apoios rotulados, com comprimento final entre as rótulas de 152 ¾ in (3.88 m) e tracionados no topo com o uso de molas com rigidez 75 lb/in (13.15 kN/m). Uma célula de carga foi montada sobre cada mola para permitir a medição da força vertical aplicada no topo dos modelos. A Figura 3.16 mostra a montagem usada nos testes.

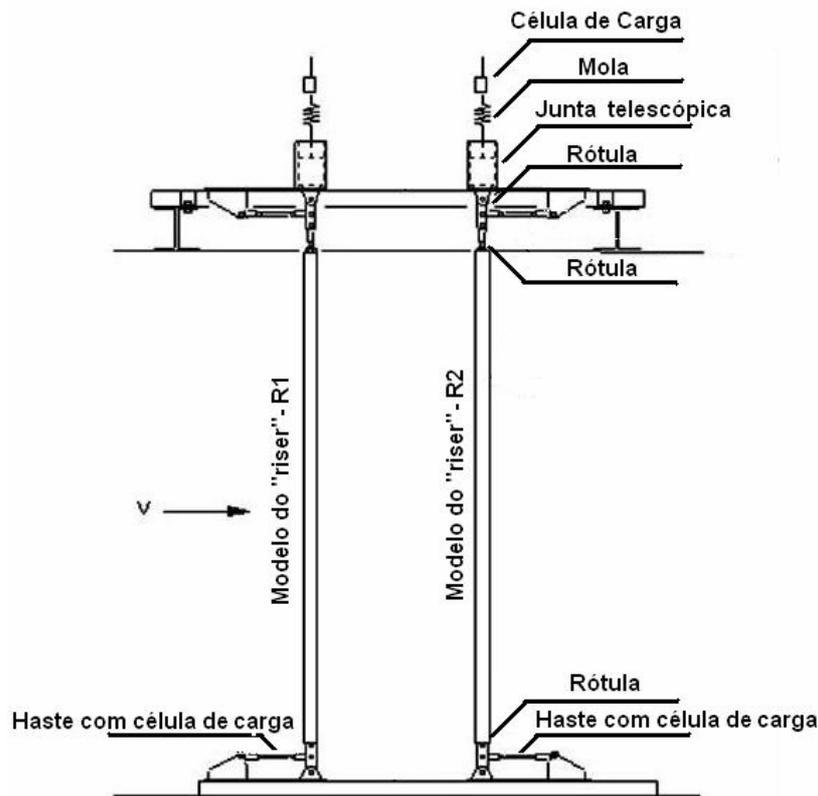


Figura 3.16- Esquema da Montagem Final do Ensaio.

A frequência natural do modelo para o 1º modo de flexão é igual a 2.36 Hz, e do 2º modo é igual a 9.31 Hz. Como não foi mencionada no artigo a força de tração no topo, foram realizados estudos paramétricos, variando-se a força de tração no topo, a fim de se obter a força de tração no topo correspondente à frequência natural do 1º e 2º modos. Para a realização destes estudos paramétricos, foi usada a rotina de vibrações livres do programa ANFLEX, ver referência [24].

A força de tração encontrada nos estudos paramétricos foi igual a 0.25kN, complementando, desta forma, todas as informações necessárias para uma reprodução do ensaio.

3.4.1.2.3 Procedimento e Estudos Realizados.

Todos os testes foram realizados com ambos os modelos cheios de água doce. A configuração dos modelos foi alinhada com a direção da corrente, ou seja, configuração em *tandem*, ver Figura 1.4 apresentada no Capítulo 1, sendo adotado um espaçamento entre os modelos iguais a: 2D, 3D, 4D e 5D. A Tabela 3.18 mostra as distâncias entre os modelos adotadas nos testes.

Tabela 3.18 – Distância entre os modelos.

Espaçamento	Distância (m)
2D	0.229
3D	0.343
4D	0.457
5D	0.572

Foi testado um intervalo de velocidade de corrente nominal de 1.5ft/s (0.47m/s) a 7ft/s (2.19m/s), sendo o perfil de velocidades constante ao longo do comprimento do modelo. Este perfil de velocidades que foi corrigido em 2.5% para consideração do efeito já descrito anteriormente (*blockage effect*), resultando nas velocidades e números de Reynolds apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3.19- Velocidades e Números de Reynolds ensaiados pela Shell [11].

Velocidade Nominal (ft/s)	Velocidade Corrigida		Número de Reynolds
	ft/s	m/s	
1.50	1.538	0.469	5.32 e +04
1.75	1.794	0.547	6.21 e +04
2.00	2.050	0.625	7.10 e +04
2.25	2.306	0.703	7.99 e +04
2.50	2.563	0.781	8.87 e +04
2.75	2.819	0.859	9.76 e +04
3.00	3.075	0.937	1.06 e +05
3.25	3.331	1.015	1.15 e +05
3.50	3.588	1.094	1.24 e +05
3.75	3.844	1.171	1.33 e +05
4.00	4.100	1.250	1.42 e +05
4.25	4.356	1.328	1.51 e +05
4.50	4.613	1.406	1.60 e +05
4.75	4.869	1.484	1.69 e +05
5.00	5.125	1.562	1.77 e +05
5.25	5.381	1.640	1.86 e +05
5.50	5.637	1.718	1.95 e +05
5.75	5.894	1.796	2.04 e +05
6.00	6.150	1.874	2.13 e +05
6.25	6.406	1.953	2.22 e +05
6.50	6.663	2.031	2.31 e +05
6.75	6.919	2.109	2.40 e +05
7.00	7.175	2.187	2.48 e +05

3.4.2 Resultados dos Estudos Experimentais

Neste item, serão apresentados e analisados somente alguns dos casos estudados, a fim de sintetizar o texto deste trabalho. Contudo, os resultados para todos os casos estudados quando os *risers* estão alinhados, estão apresentados no Anexo C.

3.4.2.1 Escoamento ao Redor de um *Riser* Isolado

Foi inicialmente verificado o comportamento hidrodinâmico de um *riser* isolado, para que fosse possível avaliar como o efeito da esteira iria afetar o comportamento do *riser* de jusante e permitir uma verificação se haveria impacto, também, no comportamento hidrodinâmico do *riser* de montante.

Considerando que a faixa do número de Reynolds apresentada na Tabela 3.16 anteriormente, é inferior ao valor de 2×10^5 , pode-se obter o número de Strouhal e as frequências de desprendimento de vórtices, a partir da formulação apresentada na Tabela 3.1 anteriormente. A Tabela 3.20 apresenta estes resultados.

Tabela 3.20- Frequência de Desprendimento de Vórtices Transversal para os Modelos 1, 2 e 3.

V (m/s)	Re1	Re2	St1	St2	fst1 (Hz)	fst2 (Hz)
0.2	2.0 e +04		0.2119	#	0.346	#
0.4	3.9 e +04	4.19 e +04	0.2119	0.2119	0.692	0.76
0.6	5.9 e +04	6.28 e +04	0.2120	0.2120	1.038	1.14
0.8	7.8 e +04	8.37 e +04	0.2120	0.2120	1.384	1.52
0.9	#	9.42 e +04	#	0.2120	#	1.71
1.0	9.8 e +04	1.05 e +05	0.2120	0.2120	1.730	1.90
1.1	1.1 e +05	1.15 e +05	0.2120	0.2120	1.903	2.09
1.2	1.2 e +05	1.26 e +05	0.2120	0.2120	2.076	2.28
1.4	#	1.47 e +05		0.2120		2.66
1.5	#	1.57 e +05		0.2120		2.85
1.6	#	1.67 e +05		0.2120		3.03
1.7	#	1.78 e +05		0.2120		3.22
1.8	#	1.88 e +05		0.2120		3.41

Nota:

1) fst1 : Frequência de desprendimento de vórtices transversal ou frequência de Strouhal para os modelos 1 e 2 (Diâmetro de 0.125 m).

2) fst2 : Frequência de desprendimento de vórtices transversal ou frequência de Strouhal para o modelo 3 (Diâmetro de 0.114 m).

3) Os valores de fst1 e fst2, foram obtidos considerando um número de Strouhal teórico, usando a formulação da Tabela 3.1, obtida a partir da referência [23].

4) Re1 : Número de Reynolds obtido para os modelos 1 e 2, considerando uma viscosidade cinemática da água igual a $1.316 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}$ (ver nota 2, referente à Tabela 3.14).

5) Re2 : Número de Reynolds obtido para o modelo 3, considerando uma viscosidade cinemática da água igual a $1.111 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}$ (ver nota 2, referente à Tabela 3.14).

É importante salientar que os números de Reynolds para o modelo 3 foram maiores que os obtidos para os modelos 1 e 2, apesar dos diâmetros destes serem maiores do que o do modelo 3; isto se deveu à temperatura ambiente estar maior durante

a temporada da fase 2 dos ensaios, o que resultou em menor viscosidade cinemática da água do tanque.

Comparando-se as frequências naturais obtidas experimentalmente e apresentadas na Tabela 3.12, com as frequências de despreendimento dos vórtices apresentadas na Tabela 3.18, pode-se intuir que somente o 1º modo será excitado nos ensaios, sendo esta situação a mais crítica para o estudo de interferência.

A seguir, estão apresentados os espectros dos deslocamentos transversais e longitudinais, estatística das forças hidrodinâmicas transversais e longitudinais para um riser isolado, considerando somente o modelo 3 e as velocidades de escoamento próximas ao ponto denominado na literatura de *lock in*. Na Tabela 3.18, as informações correspondem às velocidades de reboque de 1, 1.1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6 e 1.7 m/s.

No Anexo C, estão apresentados os demais casos ensaiados, inclusive para os modelos 1 e 2, que estão mostrados na Tabela 3.18. É importante salientar, que para as velocidades de até 1 m/s, há os resultados dos modelos 1, 2 e 3. Como as frequências naturais para estes 3 modelos são próximas, pode-se considerar que há uma repetibilidade dos ensaios.

3.4.2.1.1 Velocidade de 1.0 m/s

Conforme mencionado, serão apresentados e analisados os dados obtidos nos ensaios somente para o modelo 3.

A Figura 3.17 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

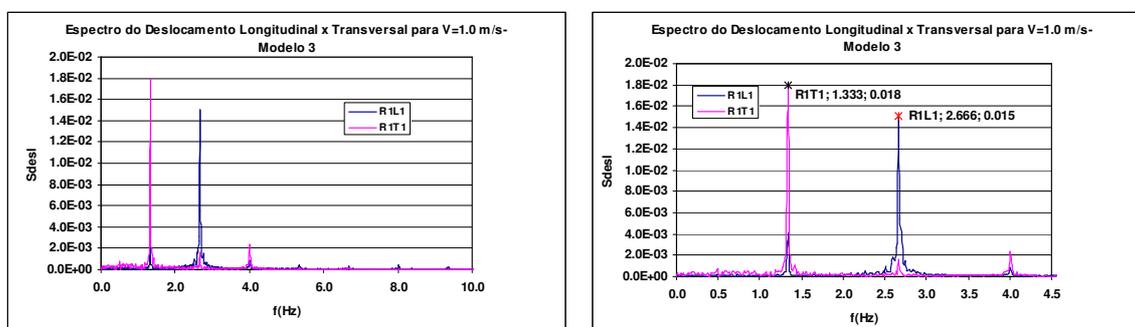


Figura 3.17- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.0\text{m/s}$.

Os espectros dos deslocamentos longitudinal e transversal, mostrado na Figura 3.17 foram obtidos aplicando-se a transformada de Fourier as séries temporais de deslocamentos medidos nos pontos R1L1 e R1T1, mostrada na Figura 3.18.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se concluir que há energia excitação em ambas as direções para o modelo 3.

Quanto aos picos das frequências excitadas, tem-se:

$$f_{\text{trans}} = 1.33 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{long}} = 2.66 \text{ Hz}$$

Os resultados obtidos para as frequências excitadas estão coerentes com os encontrados na literatura, já que a frequência na direção longitudinal é igual ao dobro da excitada na direção transversal. Contudo, diferem dos valores apresentados na Tabela 3.18, já que os valores lá apresentados são os teóricos e os valores obtidos a partir dos espectros estão afetados dos efeitos devido à massa adicionada, ver item 3.4.2.2.1.

3.4.2.1.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal

A Figura 3.18, mostra a série temporal estabilizada dos deslocamentos transversal (R1T1) e longitudinal (R1L1), no intervalo entre 40 e 100 s.

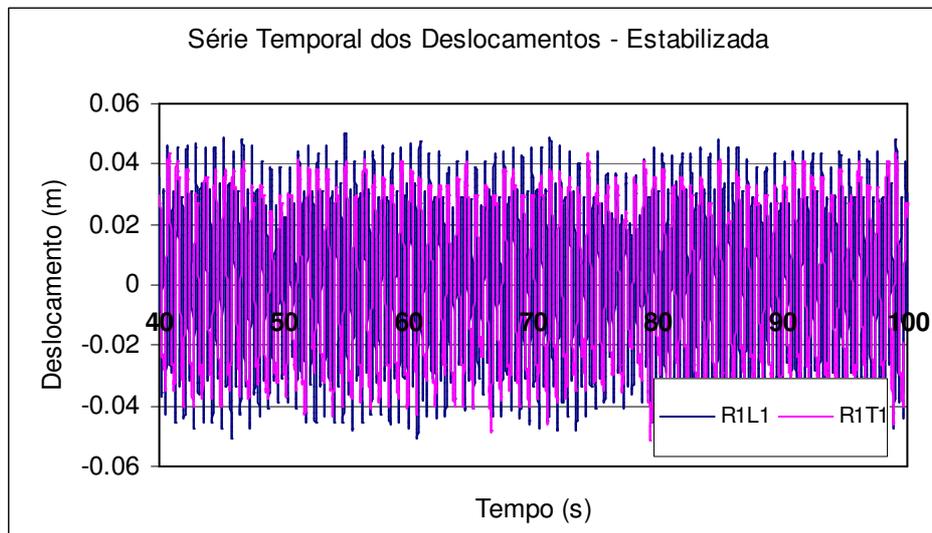


Figura 3.18- Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.0\text{m/s}$.

Visando determinar a precisão e o erro envolvidos nas medições dos deslocamentos transversal e longitudinal, as séries temporais dos deslocamentos

estabilizadas foram divididas em 4 partes, ver Figura 3.19; foi também determinado o desvio padrão de cada parte.

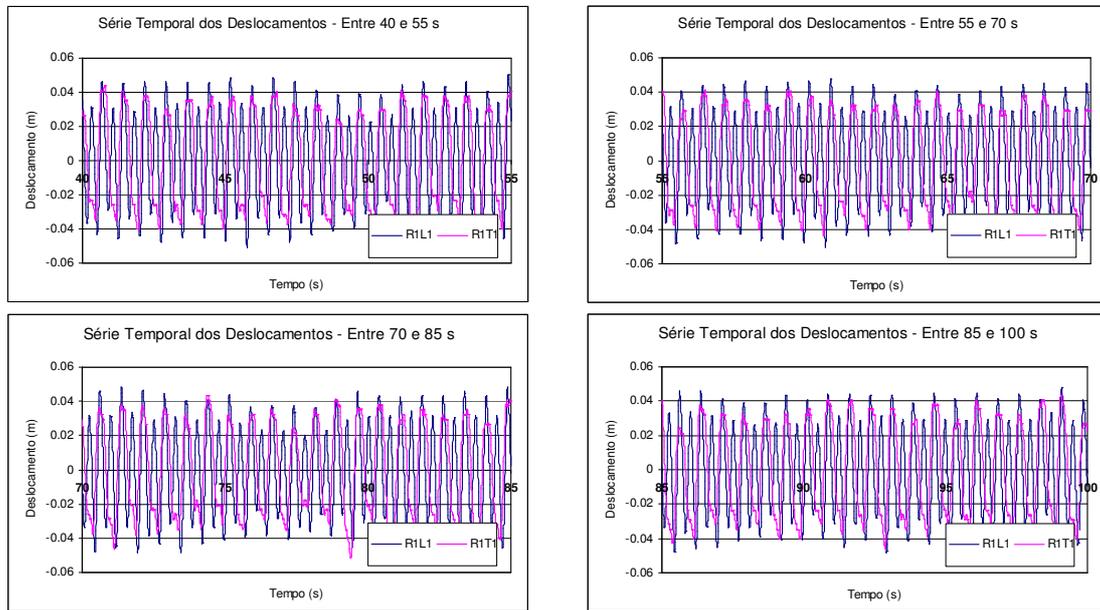


Figura 3.19- Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.

A partir das séries temporais mostradas na Figura 3.19, obtém-se as amplitudes adimensionalizadas significativas, ver Tabela 3.19, como descrito a seguir:

- determina-se o desvio padrão dos deslocamentos (A_x e A_y);
- dividem-se estes valores pelo diâmetro do modelo, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas (A_x/D e A_y/D);
- multiplicam-se estes valores pela raiz quadrada de 2, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas significativas $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$.

Tabela 3.19- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversais $(A_y/D)_{sig}$ e longitudinais $(A_x/D)_{sig}$ medidas para cada parte da Série Temporal medida no ensaio.

Tempo	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Entre 40 e 55 s	0.336	0.341
Entre 55 e 70 s	0.329	0.341
Entre 70 e 85 s	0.327	0.333
Entre 85 e 100 s	0.326	0.333

A partir dos valores das amplitudes significativas mostradas na Tabela 3.19, tem-se os seguintes valores médios:

Tabela 3.20- Valores Médios das Amplitudes dos deslocamentos transversais e longitudinais significativas.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Médio	0.331	0.337

A partir das séries temporais completas dos deslocamentos transversal e longitudinal, obtém-se as amplitudes significativas, $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$, apresentados na Tabela 3.21.

Tabela 3.21- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio, para a Série Temporal Completa.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.329	
R1L2	0.321	
R1L3	0.272	
R1L4	0.185	
R1T1		0.337
R1T2		0.326
R1T3		0.273

Comparando os valores das amplitudes significativas transversais e longitudinais obtidos para a série temporal completa com o valor médio apresentado na Tabela 3.20; pode-se observar que as diferenças são pequenas, mostrando que há estabilidade dos valores medidos.

$$\frac{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.329}{0.331} = 0.994 \quad \text{Inferior a 1\%}$$

Na direção transversal não há diferença.

A Figura 3.20 mostra que há deslocamento em ambas as direções, aproximando-se a trajetória da clássica figura em forma de oito.

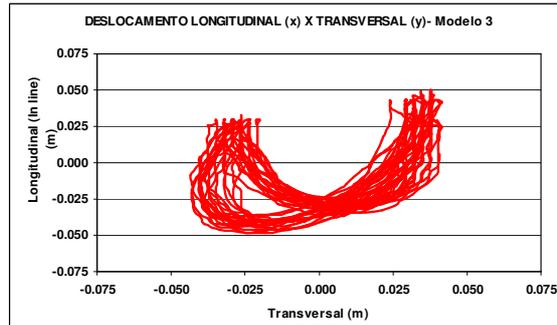


Figura 3.20- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.0\text{m/s}$.

3.4.2.1.1.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Conforme mencionado, foram medidas as forças hidrodinâmicas nas direções transversal (F_y) e longitudinal (F_x), através das células de carga. Estas forças estão resumidas na Tabela 3.22.

Tabela 3.22- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.05 \times 10^5$ (Modelo 3).

	F_x (kgf)	F_y (kgf)
Máximo	85.3	61.3
Médio	32.0	2.7
Desvio Padrão	30.4	35.4
Mínimo	-18.8	-54.9

O valor obtido para a força transversal média (F_y) foi diferente de zero; como o modelo foi deslocado na horizontal; tem-se como causa provável o efeito gravitacional sobre o escoamento, gerando uma assimetria no campo de pressão gerado pelo escoamento em torno da seção transversal do modelo.

A partir da força de arrasto média, tem-se o coeficiente de arrasto médio:

$$CD = 1.32$$

3.4.2.1.2 Velocidade de 1.1 m/s

A Figura 3.21 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

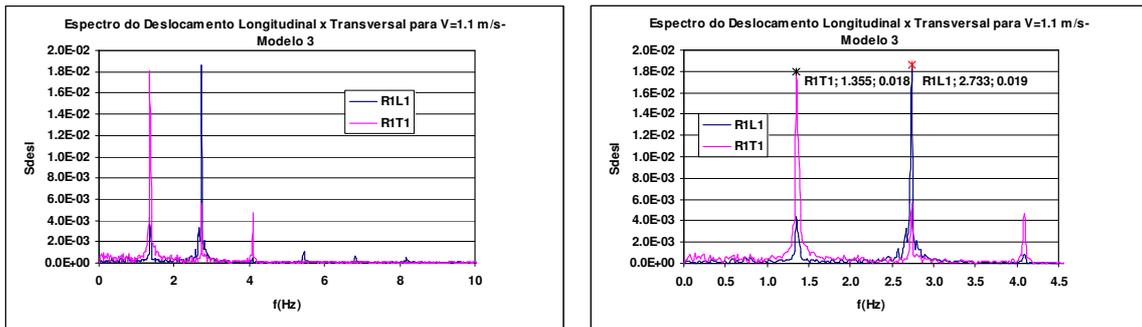


Figura 3.21- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.1$ m/s.

Os espectros dos deslocamentos longitudinal e transversal, mostrado na Figura 3.21 foram obtidos aplicando-se a transformada de Fourier as séries temporais de deslocamentos medidos nos pontos R1L1 e R1T1, mostrada na Figura 3.22.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se concluir que há energia de excitação em ambas as direções do modelo 3.

Quanto aos picos das frequências excitadas, tem-se:

$$f_{\text{trans}} = 1.37 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{long}} = 2.73 \text{ Hz}$$

Os resultados obtidos para as frequências excitadas estão coerentes com os encontrados na literatura, visto que a frequência na direção longitudinal é igual ao dobro da excitada na direção transversal. Contudo, diferem dos valores apresentados na Tabela 3.18, já que os valores lá apresentados são os teóricos e os valores obtidos a partir dos espectros estão afetados dos efeitos devido à massa adicionada, ver item 3.4.2.2.1.

3.4.2.1.2.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal

A Figura 3.22 mostra a série temporal estabilizada dos deslocamentos transversal (R1T1) e longitudinal (R1L1), no intervalo entre 30 e 90 s.

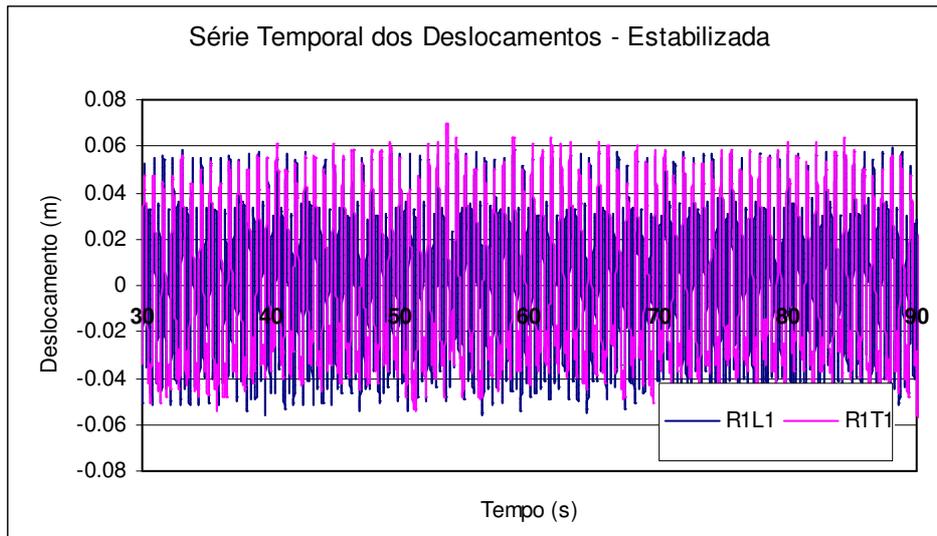


Figura 3.22- Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.1$ m/s.

Assim como foi feito no item anterior, visando determinar a precisão e o erro envolvidos nas medições dos deslocamentos transversal e longitudinal, as séries temporais dos deslocamentos estabilizadas foram divididas em 4 partes, ver Figura 3.23; foi também determinado o desvio padrão de cada parte.

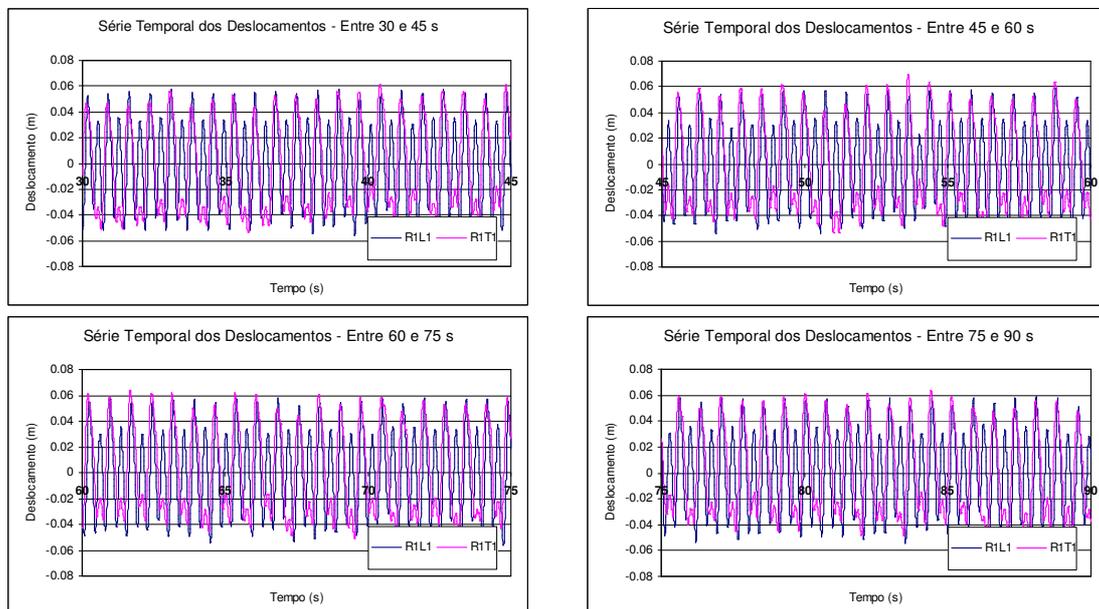


Figura 3.23- Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.

A partir das séries temporais mostradas na Figura 3.23, obtém-se as amplitudes adimensionalizadas significativas, ver Tabela 3.23, como descrito a seguir:

- determina-se o desvio padrão dos deslocamentos (A_x e A_y);

- dividem-se estes valores pelo diâmetro do modelo, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas (A_x/D e A_y/D);
- multiplicam-se estes valores pela raiz quadrada de 2, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas significativas $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$.

Tabela 3.23- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversais $(A_y/D)_{sig}$ e longitudinais $(A_x/D)_{sig}$ medidas para cada parte da Série Temporal medida no ensaio.

Tempo	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Entre 30 e 45 s	0.391	0.429
Entre 45 e 60 s	0.396	0.429
Entre 60 e 75 s	0.389	0.433
Entre 75 e 90 s	0.391	0.428

A partir dos valores das amplitudes significativas mostradas na Tabela 3.23, tem-se os seguintes valores médios:

Tabela 3.24- Valores Médios das Amplitudes dos deslocamentos transversais e longitudinais significativas.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Médio	0.391	0.429

A partir das séries temporais completas dos deslocamentos transversal e longitudinal, obtém-se as amplitudes significativas, $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$, apresentadas na Tabela 3.25.

Tabela 3.25- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversal e longitudinal medidas no ensaio, para a Série Temporal Completa.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.391	
R1L2	0.382	
R1L3	0.325	
R1L4	0.226	
R1T1		0.429
R1T2		0.411
R1T3		0.341

Comparando os valores das amplitudes significativas transversal e longitudinal obtidos para a série temporal completa com o valor médio apresentando na Tabela 3.25; pode-se observar que não há diferença, mostrando que há estabilidade dos valores medidos.

A Figura 3.24 mostra que há deslocamento em ambas as direções, aproximando-se a trajetória de uma forma achatada, conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

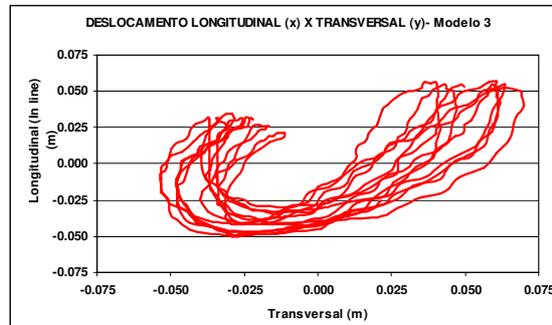


Figura 3.24- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.1$ m/s.

3.4.2.1.2.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Conforme mencionado foram medidas as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal, através das células de carga. Estas forças estão resumidas na Tabela 3.26.

Tabela 3.26- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.1 \times 10^5$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	96.11	75.09
Médio	34.80	2.68
Desvio Padrão	35.11	45.74
Mínimo	-23.92	-78.30

O valor obtido para a força transversal média (Fy) foi diferente de zero; como o modelo foi deslocado na horizontal; tem-se como causa provável o efeito gravitacional sobre o escoamento, gerando uma assimetria no campo de pressão gerado pelo escoamento em torno da seção transversal do modelo.

A partir da força de arrasto média, tem-se o coeficiente de arrasto médio:

$$CD = 1.19$$

3.4.2.1.3 Velocidade de 1.2 m/s

A Figura 3.25 mostra, o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

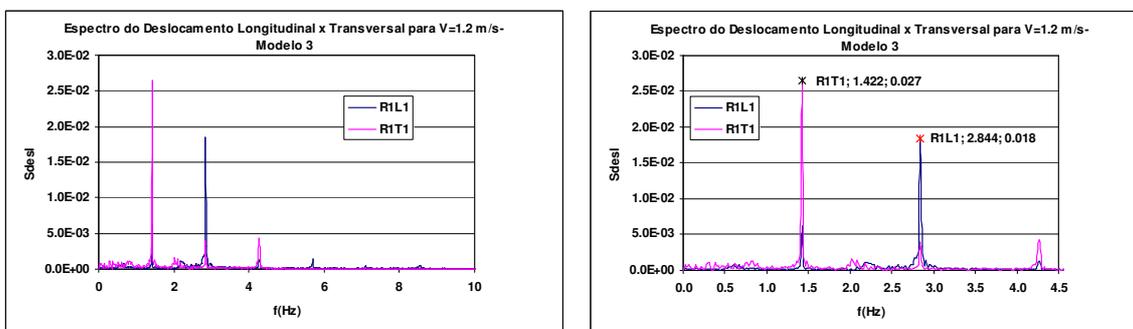


Figura 3.25- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.2$ m/s.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se concluir que há energia excitação em ambas as direções. Pode-se, ainda, observar que há excitação de outras frequências com menores energias em ambas as direções, estas frequências excitadas são denominadas de harmônicos.

Quanto aos picos das frequências excitadas, tem-se:

$$f_{\text{trans}} = 1.42 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{long}} = 2.84 \text{ Hz}$$

Os resultados obtidos para as frequências excitadas estão coerentes com os encontrados na literatura, visto que a frequência na direção longitudinal é igual ao dobro da excitada na direção transversal. Contudo, diferem dos valores apresentados na Tabela 3.18, já que os valores lá apresentados são os teóricos e os valores obtidos a partir dos espectros estão afetados dos efeitos devido à massa adicionada, ver item 3.4.2.2.1.

3.4.2.1.3.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal

A Figura 3.26 mostra a série temporal estabilizada dos deslocamentos transversal (R1T1) e longitudinal (R1L1), no intervalo entre 25 e 85s.

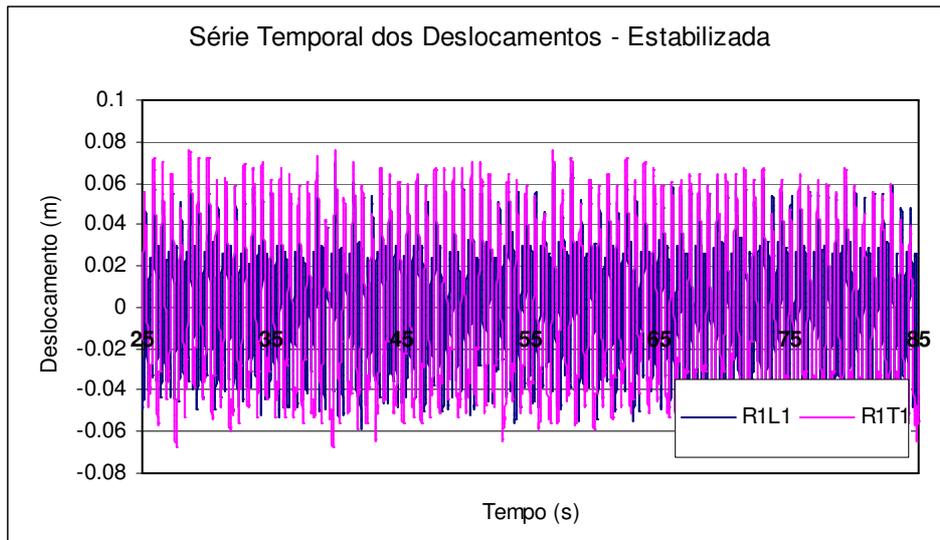


Figura 3.26- Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.2 \text{ m/s}$.

Assim como foi feito no item anterior, visando determinar a precisão e o erro envolvidos nas medições dos deslocamentos transversal e longitudinal, as séries temporais dos deslocamentos estabilizadas foram divididas em 4 partes, ver Figura 3.27, foi também determinado o desvio padrão de cada parte.

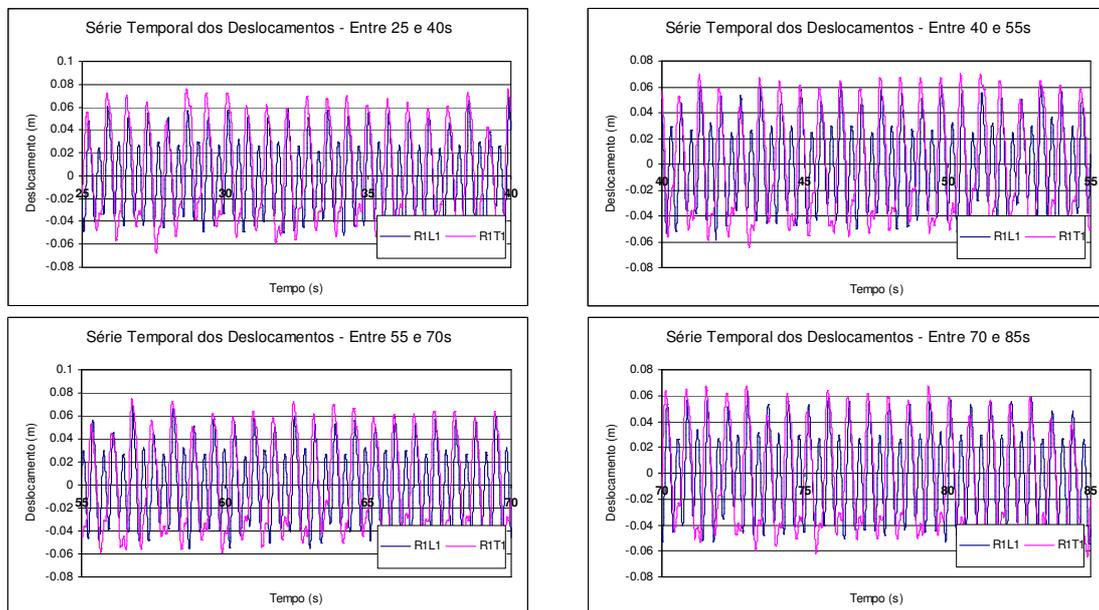


Figura 3.27- Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.

A partir das séries temporais mostradas na Figura 3.27, obtém-se as amplitudes adimensionalizadas significativas, ver Tabela 3.27, como descrito a seguir:

- determina-se o desvio padrão dos deslocamentos (A_x e A_y);
- dividem-se estes valores pelo diâmetro do modelo, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas (A_x/D e A_y/D);
- multiplicam-se estes valores pela raiz quadrada de 2, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas significativas $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$.

Tabela 3.27- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversais $(A_y/D)_{sig}$ e longitudinais $(A_x/D)_{sig}$ medidas para cada parte da Série Temporal medida no ensaio.

Tempo	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Entre 25 e 40 s	0.371	0.512
Entre 40 e 55 s	0.372	0.496
Entre 55 e 70 s	0.374	0.492
Entre 70 e 85 s	0.381	0.485

A partir dos valores das amplitudes significativas mostradas na Tabela 3.27, tem-se os seguintes valores médios:

Tabela 3.28- Valores Médios das Amplitudes dos deslocamentos transversais e longitudinais significativas.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Médio	0.374	0.496

A partir das séries temporais completas dos deslocamentos transversal e longitudinal, obtém-se as amplitudes significativas, $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$, apresentadas na Tabela 3.29.

Tabela 3.29- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversal e longitudinal medidas no ensaio, para a Série Temporal Completa.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.375	
R1L2	0.367	
R1L3	0.314	
R1L4	0.210	
R1T1		0.497
R1T2		0.474
R1T3		0.397

Comparando os valores das amplitudes significativas transversal e longitudinal obtidos para a série temporal completa com o valor médio apresentando na Tabela 3.28, pode-se observar que as diferenças são pequenas, mostrando que há estabilidade dos valores medidos.

$$\frac{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.375}{0.374} = 1.0015 \quad \text{Inferior a 0.5\%}$$

$$\frac{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.497}{0.496} = 1.0016 \quad \text{Inferior a 0.5\%}$$

A Figura 3.28 mostra que há deslocamento em ambas as direções, com predominância do deslocamento transversal, a trajetória fica achatada aproximando-se da forma denominada na literatura de *banana-shaped* [27].

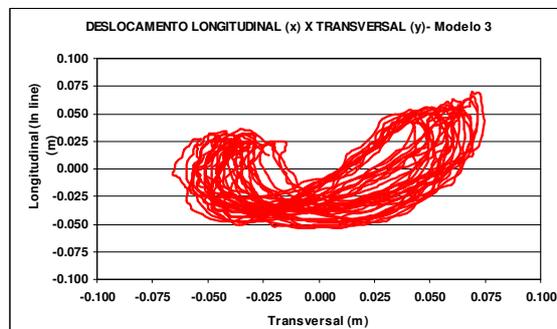


Figura 3.28- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal, quando $V = 1.2$ m/s.

3.4.2.1.3.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Conforme mencionado foram medidas as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal, através das células de carga. Estas forças estão resumidas na Tabela 3.30.

Tabela 3.30- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.26 \times 10^5$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	108.564	104.084
Médio	39.470	2.553
Desvio Padrão	33.185	55.849
Mínimo	-21.543	-97.993

O valor obtido para a força transversal média (Fy) foi diferente de zero; como o modelo foi deslocado na horizontal; tem-se como causa provável os efeitos gravitacionais sobre o escoamento, gerando uma assimetria no campo de pressão gerado pelo escoamento em torno da seção transversal do modelo.

A partir da força de arrasto média, tem-se o coeficiente de arrasto médio:

$$CD = 1.13.$$

3.4.2.1.4 Velocidade de 1.4 m/s

A Figura 3.29 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

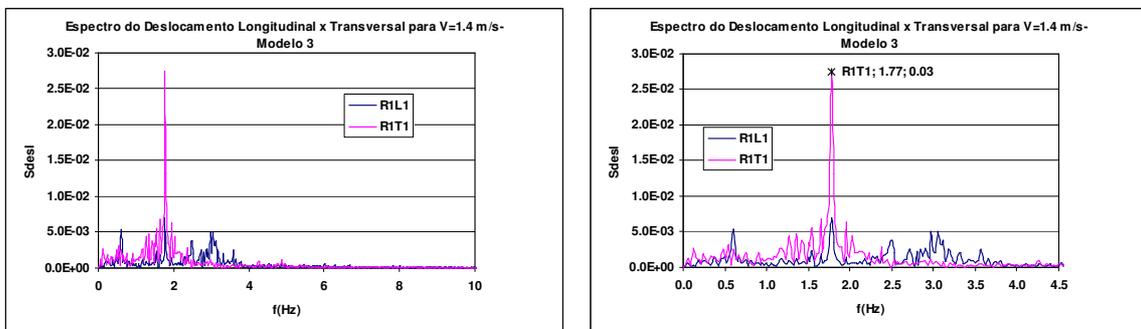


Figura 3.29- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.4$ m/s.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se concluir que há predominância da energia excitação na direção transversal em uma frequência em torno de 1.77Hz. Contudo, pode-se observar que foram excitados vários harmônicos na direção longitudinal, os quais estão distribuídos em uma ampla faixa de frequências, compreendida entre 0 a 4Hz.

3.4.2.1.4.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal

A Figura 3.30 mostra a série temporal estabilizada dos deslocamentos transversal (R1T1) e longitudinal (R1L1), no intervalo entre 60 e 100s.

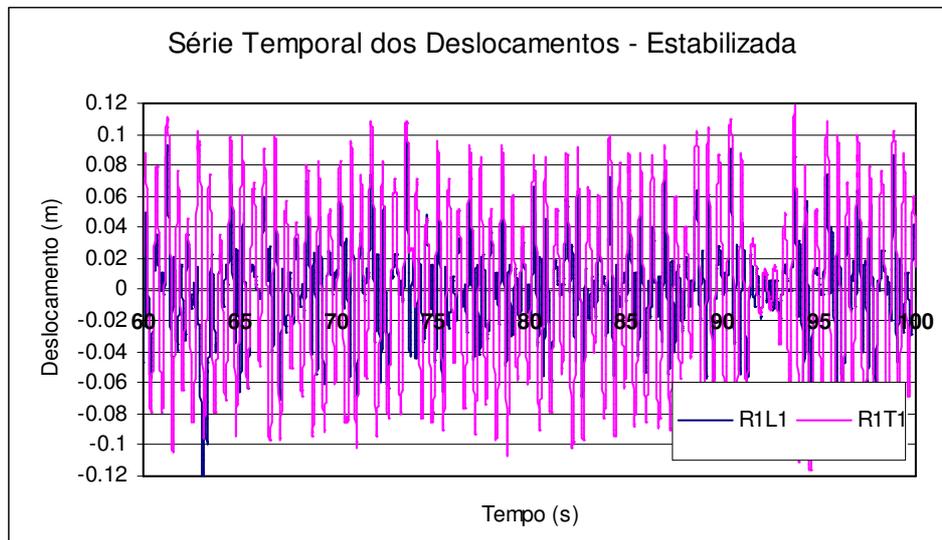


Figura 3.30- Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.4$ m/s.

Assim como foi feito no item anterior, visando determinar a precisão e o erro envolvidos nas medições dos deslocamentos transversal e longitudinal, as séries temporais dos deslocamentos estabilizadas foram divididas em 4 partes, ver Figura 3.31; foi também determinado o desvio padrão de cada parte.

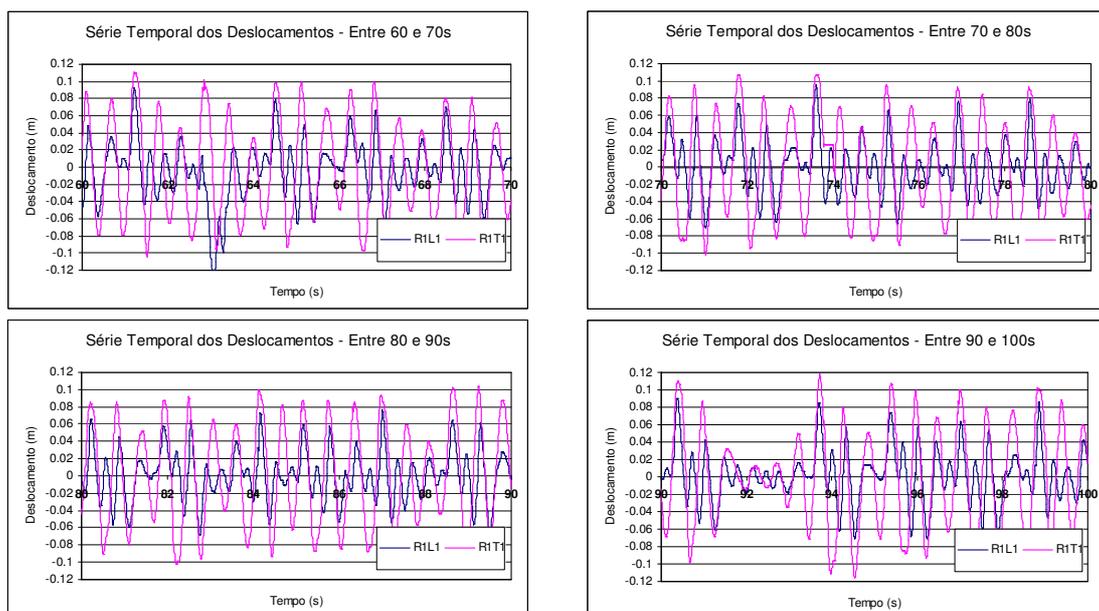


Figura 3.31- Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.

A partir das séries temporais mostradas na Figura 3.31, obtém-se as amplitudes adimensionalizadas significativas, ver Tabela 3.31, como descrito a seguir:

- determina-se o desvio padrão dos deslocamentos (A_x e A_y);
- dividem-se estes valores pelo diâmetro do modelo, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas (A_x/D e A_y/D);
- multiplicam-se estes valores pela raiz quadrada de 2, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas significativas $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$.

Tabela 3.31- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversais $(A_y/D)_{sig}$ e longitudinais $(A_x/D)_{sig}$ medidas para cada parte da Série Temporal medida no ensaio.

Tempo	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Entre 60 e 70 s	0.422	0.708
Entre 70 e 80 s	0.361	0.711
Entre 80 e 90 s	0.346	0.709
Entre 90 e 100 s	0.371	0.708

A partir dos valores das amplitudes significativas mostradas na Tabela 3.31, tem-se os seguintes valores médios:

Tabela 3.31- Valores Médios das Amplitudes dos deslocamentos transversais e longitudinais significativas.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Médio	0.375	0.709

A partir das séries temporais completas dos deslocamentos transversal e longitudinal, obtém-se as amplitudes significativas, $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$, apresentadas na Tabela 3.32.

Tabela 3.32- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversal e longitudinal medidas no ensaio, para a Série Temporal Completa.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.377	
R1L2	0.357	
R1L3	0.303	
R1L4	0.197	
R1T1		0.707
R1T2		0.672
R1T3		0.566

Comparando os valores das amplitudes significativas transversal e longitudinal obtidos para a série temporal completa com o valor médio apresentando na Tabela 3.31; pode-se observar que as diferenças são pequenas, mostrando que há estabilidade dos valores medidos.

$$\frac{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.377}{0.375} = 1.006 \quad \text{Inferior a 1\%}$$

$$\frac{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.707}{0.709} = 0.997 \quad \text{Inferior a 0.5\%}$$

A Figura 3.32 mostra que há deslocamento em ambas as direções, aproximando-se da trajetória já observada e denominada na literatura de *banana-shaped* [27].

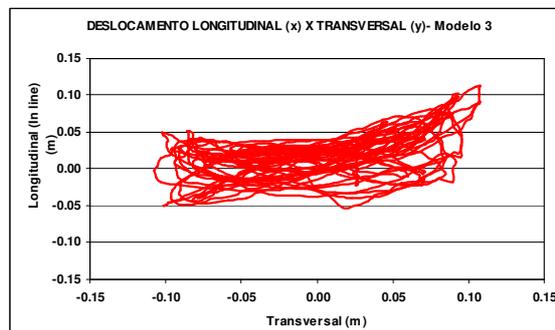


Figura 3.32- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.4$ m/s.

3.4.2.1.4.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Conforme mencionado, foram medidas as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal, através das células de carga. Estas forças estão resumidas na Tabela 3.33.

Tabela 3.33- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.47 \times 10^5$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	146.13	163.54
Médio	61.17	0.83
Desvio Padrão	29.31	79.79
Mínimo	-14.18	-153.45

O valor obtido para a força transversal média (Fy) foi diferente de zero; como o modelo foi deslocado na horizontal; tem-se como causa provável o efeito gravitacional sobre o escoamento, gerando uma assimetria no campo de pressão gerado pelo escoamento em torno da seção transversal do modelo.

A partir da força de arrasto média, tem-se o coeficiente de arrasto médio:

$$CD = 1.29.$$

3.4.2.1.5 Velocidade de 1.5 m/s

A Figura 3.33 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

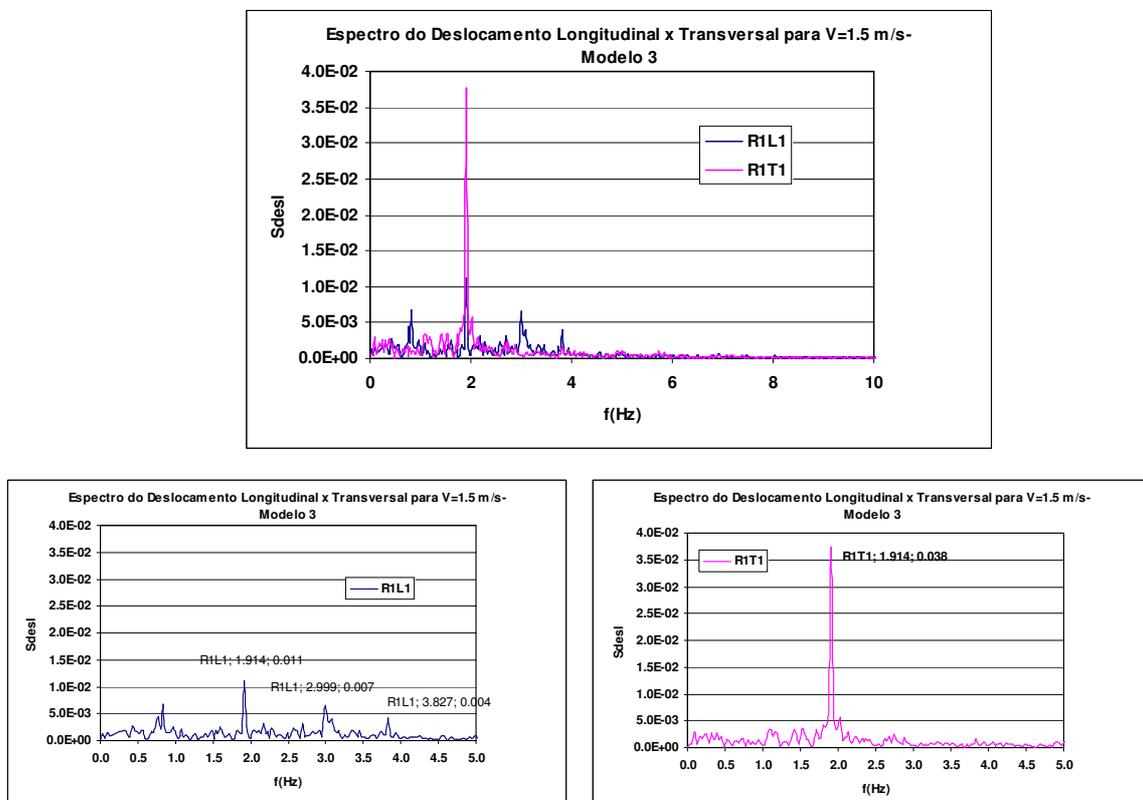


Figura 3.33- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.5$ m/s.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se observar que há predominância da energia excitação na direção transversal em uma frequência em torno de 1.9 Hz. Pode-se, também, observar que foram excitados vários harmônicos na direção transversal e longitudinal, sendo estes harmônicos na direção longitudinal distribuídos em uma larga faixa de frequências, compreendida entre 0 e 4.5Hz.

3.4.2.1.5.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal

A Figura 3.34, mostra a série temporal estabilizada dos deslocamentos transversal (R1T1) e longitudinal (R1L1), no intervalo entre 50 e 80s.

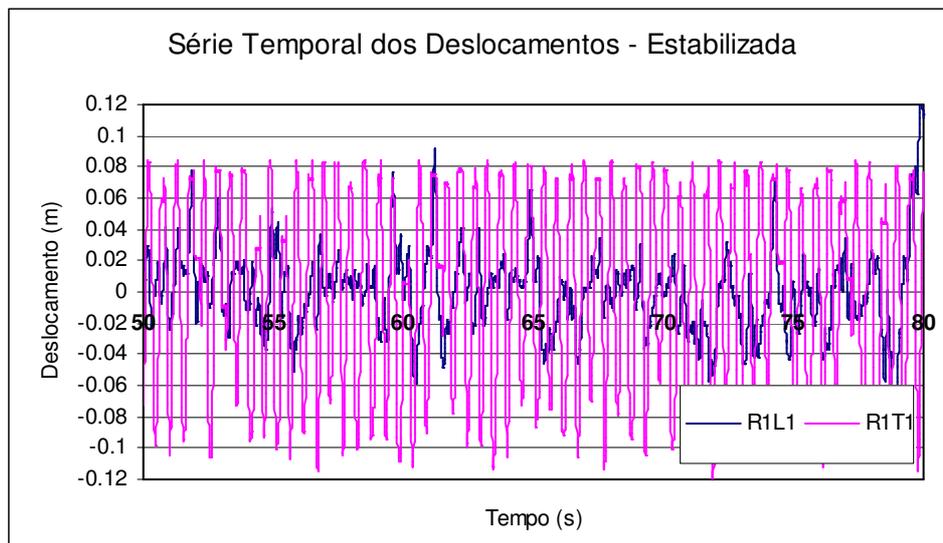


Figura 3.34- Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.5$ m/s.

Assim como foi feito no item anterior, visando determinar a precisão e o erro envolvido nas medições dos deslocamentos transversal e longitudinal, as séries temporais dos deslocamentos estabilizadas foram divididas em 4 partes, ver Figura 3.35; foi também determinado o desvio padrão de cada parte.

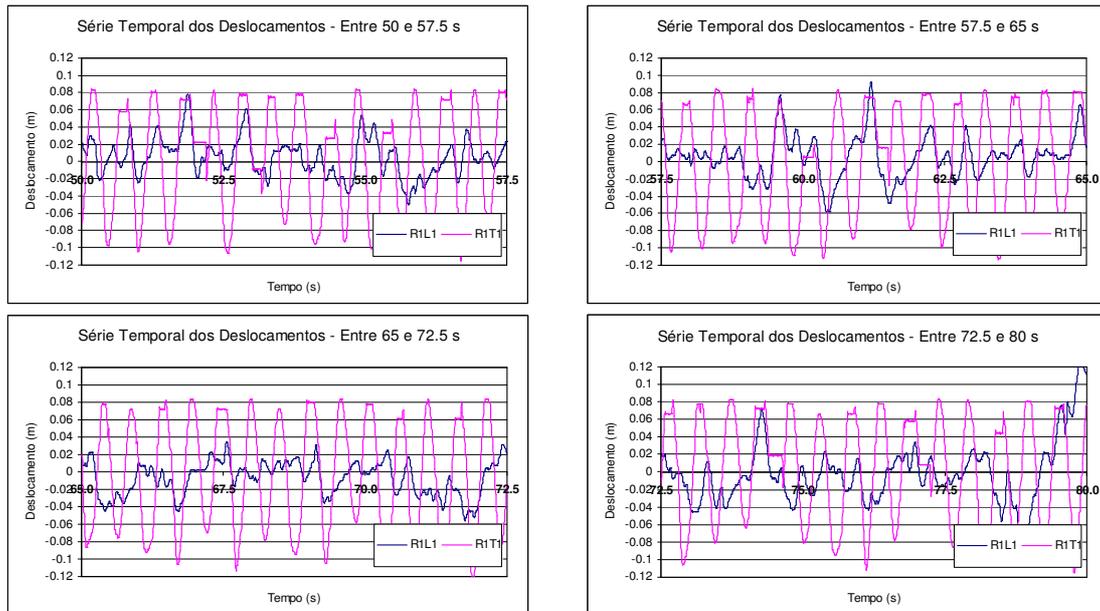


Figura 3.35- Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.

A partir das séries temporais mostradas na Figura 3.31, obtêm-se as amplitudes adimensionalizadas significativas, ver Tabela 3.34, como descrito a seguir:

- determina-se o desvio padrão dos deslocamentos (A_x e A_y);
- dividem-se estes valores pelo diâmetro do modelo, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas (A_x/D e A_y/D);
- multiplicam-se estes valores pela raiz quadrada de 2, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas significativas $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$.

Tabela 3.34- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversais $(A_y/D)_{sig}$ e longitudinais $(A_x/D)_{sig}$ medidas para cada parte da Série Temporal medida no ensaio.

Tempo	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Entre 50 e 57.5 s	0.271	0.755
Entre 57.5 e 65 s	0.301	0.777
Entre 65 e 72.5 s	0.245	0.782
Entre 72.5 e 80 s	0.429	0.745

A partir dos valores das amplitudes significativas mostradas na Tabela 3.35, tem-se os seguintes valores médios:

Tabela 3.35- Valores Médios das Amplitudes dos deslocamentos transversais e longitudinais significativas.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Médio	0.311	0.765

A partir das séries temporais completas dos deslocamentos transversal e longitudinal, obtém-se as amplitudes significativas, $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$, apresentadas na Tabela 3.36.

Tabela 3.36- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversal e longitudinal medidas no ensaio, para a Série Temporal Completa.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.377	
R1L2	0.417	
R1L3	0.359	
R1L4	0.230	
R1T1		0.771
R1T2		0.736
R1T3		0.697

Comparando os valores das amplitudes significativa transversal e longitudinal obtidos para a série temporal completa com o valor médio apresentando na Tabela 3.35, pode-se observar que há diferença expressiva na direção longitudinal, como causa provável tem-se a frequência de vibração é extremamente alta o que dificulta a captura dos deslocamentos pelo método de imagens. Contudo, na direção transversal há uma boa estabilidade dos valores medidos.

$$\frac{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.377}{0.311} = 1.21 \quad \text{Diferença de 21\%}$$

$$\frac{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.771}{0.765} = 1.078 \quad \text{Diferença de 7.8\%}$$

A Figura 3.36 mostra que há deslocamento em ambas as direções, com predominância do deslocamento transversal gerando uma trajetória que é denominada na literatura de *banana-shaped* [27].

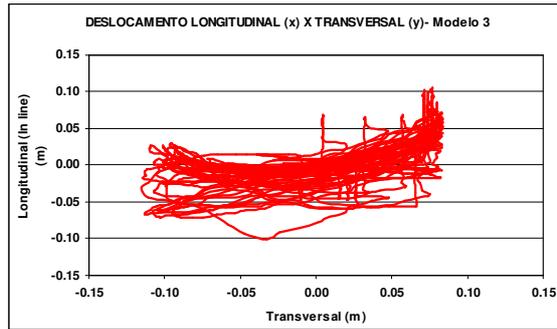


Figura 3.36- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.5$ m/s.

3.4.2.1.5.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Conforme mencionado foram medidas as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal, através das células de carga. Estas forças estão resumidas na Tabela 3.37.

Tabela 3.37- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.57 \times 10^5$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	158.92	191.09
Médio	69.19	1.71
Desvio Padrão	32.46	102.40
Mínimo	-10.17	-183.74

O valor obtido para a força transversal média (Fy) foi diferente de zero; como o modelo foi deslocado na horizontal; tem-se como causa provável o efeito gravitacional sobre o escoamento, gerando uma assimetria no campo de pressão gerado pelo escoamento em torno da seção transversal do modelo.

A partir da força de arrasto média, tem-se o coeficiente de arrasto médio:

$$CD = 1.27.$$

3.4.2.1.6 Velocidade de 1.6 m/s

A Figura 3.37 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

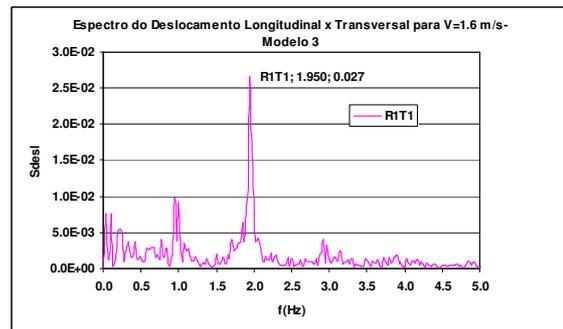
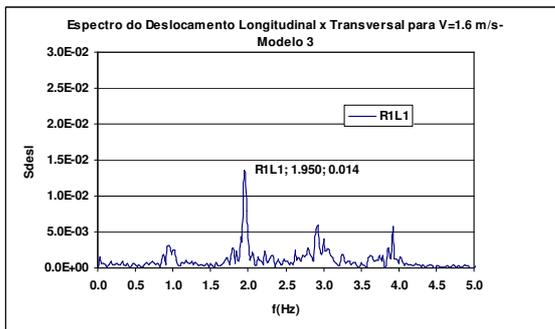
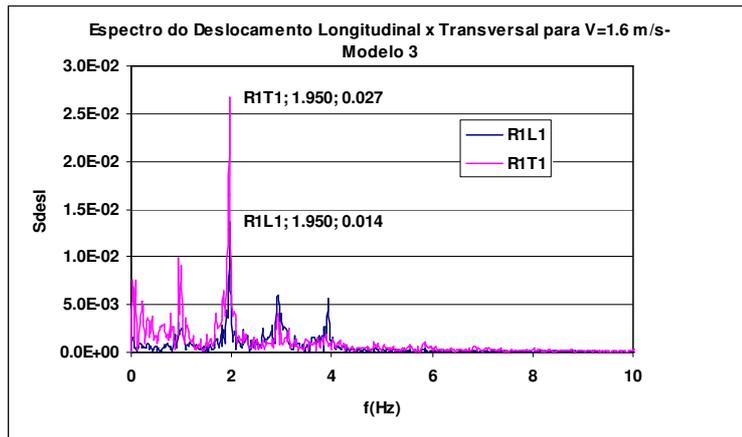


Figura 3.37- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.6$ m/s.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se observar que há predominância da energia excitação na direção transversal em uma frequência em torno de 1.95 Hz. Pode-se, também, observar que foram excitados vários harmônicos em ambas as direções.

3.4.2.1.6.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal

A Figura 3.38, mostra a série temporal estabilizada dos deslocamentos transversal (R1T1) e longitudinal (R1L1), no intervalo entre 20 e 60s.

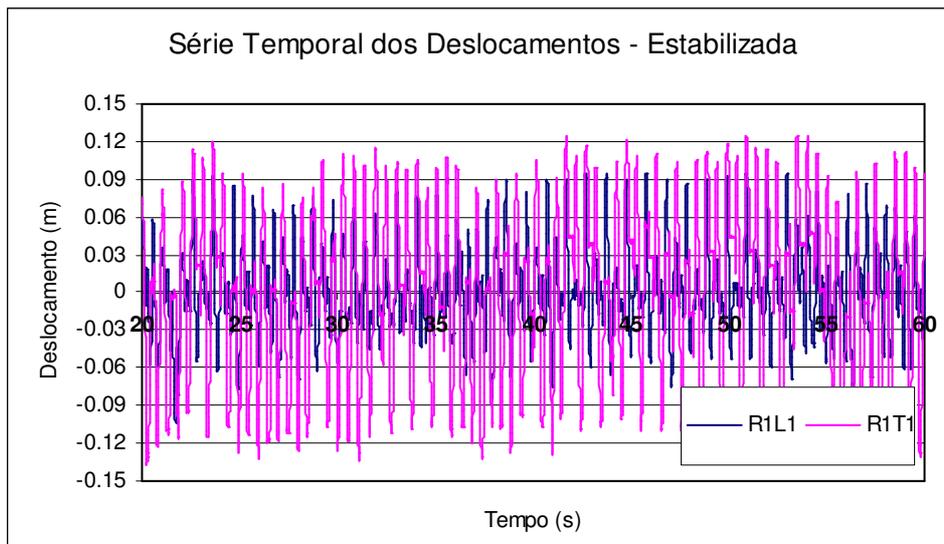


Figura 3.38 - Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.6 \text{ m/s}$.

Assim como foi feito no item anterior, visando determinar a precisão e o erro envolvidos nas medições dos deslocamentos transversal e longitudinal, as séries temporais dos deslocamentos estabilizadas foram divididas em 4 partes, ver Figura 3.39; foi também determinado o desvio padrão de cada parte.

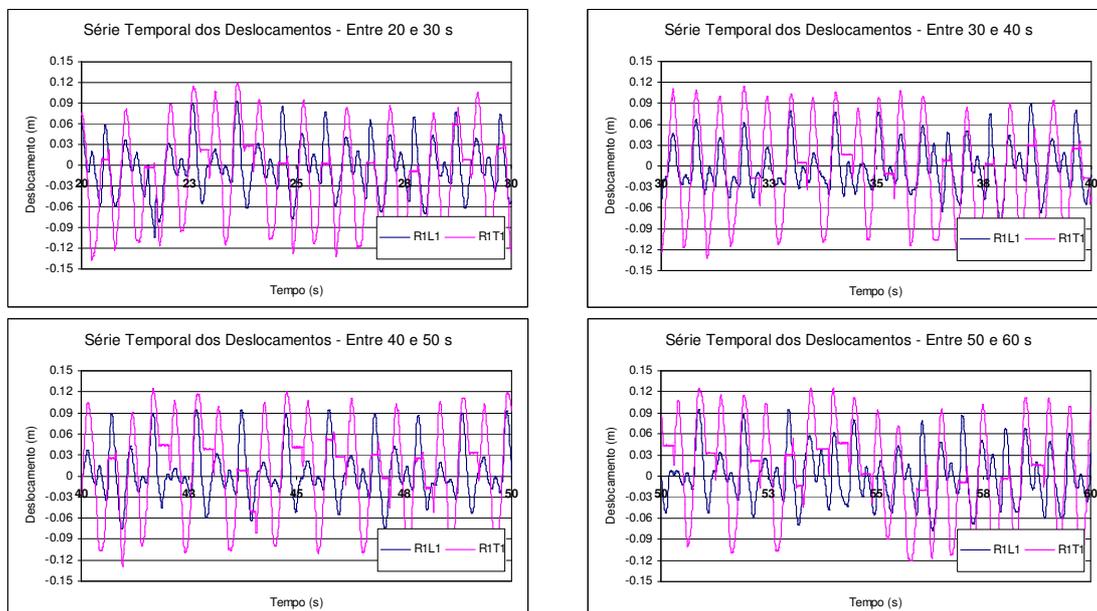


Figura 3.39- Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.

A partir das séries temporais mostradas na Figura 3.39, obtém-se as amplitudes adimensionalizadas significativas, ver Tabela 3.38, como descrito a seguir:

- determina-se o desvio padrão dos deslocamentos (A_x e A_y);

- dividem-se estes valores pelo diâmetro do modelo, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas (A_x/D e A_y/D);
- multiplicam-se estes valores pela raiz quadrada de 2, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas significativas $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$.

Tabela 3.38- Amplitudes dos deslocamentos transversais $(A_y/D)_{sig}$ e longitudinais $(A_x/D)_{sig}$ medidas para cada parte da Série Temporal medida no ensaio.

Tempo	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Entre 20 e 30 s	0.459	0.816
Entre 30 e 40 s	0.414	0.824
Entre 40 e 50 s	0.449	0.811
Entre 50 e 60 s	0.458	0.830

A partir dos valores das amplitudes significativas mostradas na Tabela 3.38, tem-se os seguintes valores médios:

Tabela 3.39- Valores Médios das Amplitudes dos deslocamentos transversais e longitudinais significativas.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Médio	0.445	0.820

A partir das séries temporais completas dos deslocamentos transversal e longitudinal, obtém-se as amplitudes significativas, $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$, apresentadas na Tabela 3.40.

Tabela 3.40- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversal e longitudinal medidas no ensaio, para a Série Temporal Completa.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.447	
R1L2	0.450	
R1L3	0.443	
R1L4	0.390	
R1T1		0.830
R1T2		0.755
R1L1		0.841

Comparando os valores das amplitudes significativa transversal e longitudinal obtidos para a série temporal completa com o valor médio apresentando na Tabela 3.39; pode-se observar que não há diferença expressiva, o que mostra há uma boa estabilidade dos valores medidos.

$$\frac{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.447}{0.445} = 1.004 \quad \text{Diferença inferior a 0.5\%}$$

$$\frac{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.83}{0.82} = 1.012 \quad \text{Diferença de 1.2\%}$$

A Figura 3.40 mostra que há deslocamento em ambas as direções, com predominância do deslocamento transversal, gerando uma trajetória que é denominada na literatura de *banana-shaped* [27].

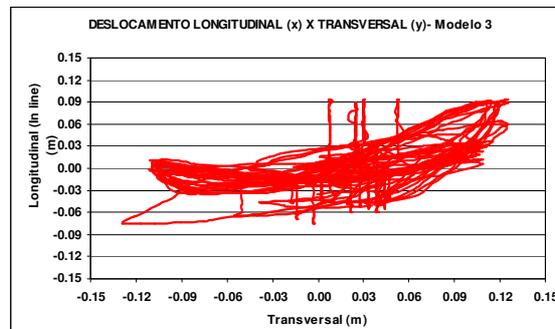


Figura 3.40 - Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V = 1.6$ m/s.

3.4.2.1.6.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Conforme mencionado foram medidas as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal, através das células de carga. Estas forças estão resumidas na Tabela 3.41.

Tabela 3.41- Coeficientes Hidrodinâmicos para $Re = 1.67 \times 10^5$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	177.21	213.75
Médio	78.70	3.74
Desvio Padrão	32.50	111.27
Mínimo	9.67	-198.26

O valor obtido para a força transversal média (Fy) foi diferente de zero; como o modelo foi deslocado na horizontal; tem-se como causa provável o efeito gravitacional

sobre o escoamento, gerando uma assimetria no campo de pressão gerado pelo escoamento em torno da seção transversal do modelo.

A partir da força de arrasto média, tem-se o coeficiente de arrasto médio:

$$C_D = 1.27.$$

3.4.2.1.7 Velocidade de 1.7 m/s

A Figura 3.41, mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

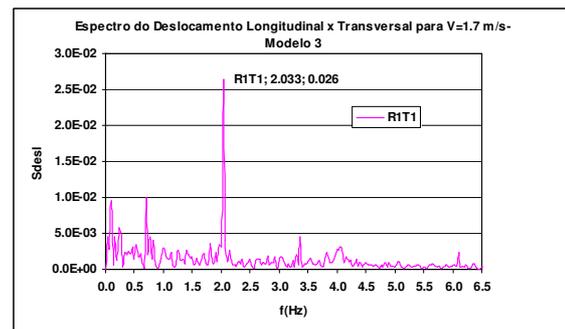
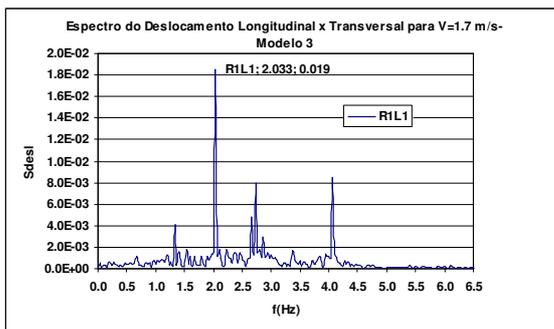
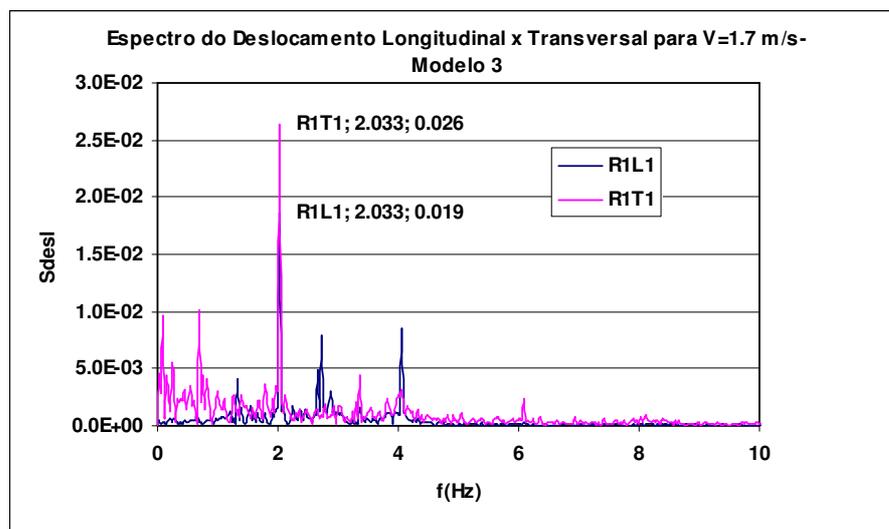


Figura 3.41- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3, quando $V = 1.7$ m/s.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se observar que há energia de excitação em ambas as direções, com a frequência de pico em torno de 2 Hz. Pode-se, também, observar que há vários harmônicos em ambas as direções.

3.4.2.1.7.1 Deslocamento Transversal e Longitudinal

A Figura 3.42 mostra a série temporal estabilizada dos deslocamentos transversal (R1T1) e longitudinal (R1L1), no intervalo entre 40 e 70s.

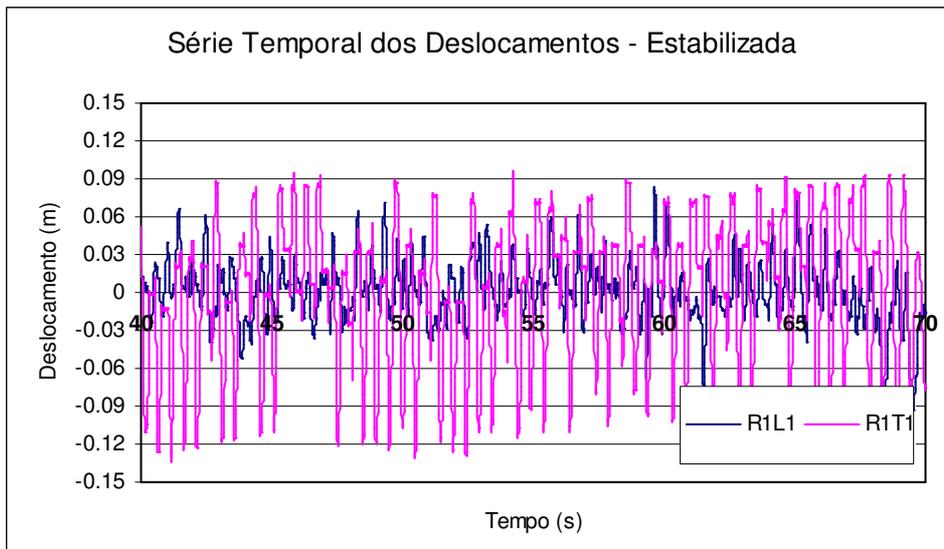
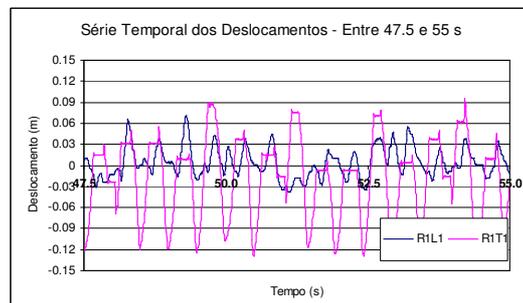
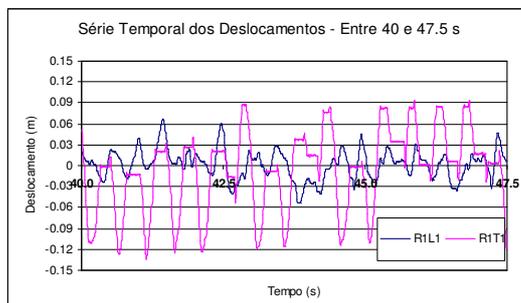


Figura 3.42 - Série Temporal dos Deslocamentos Transversal (R1T1) e Longitudinal (R1L1) para o Modelo 3, quando $V = 1.7$ m/s.

Assim como foi feito no item anterior, visando determinar a precisão e o erro envolvidos nas medições dos deslocamentos transversal e longitudinal as séries temporais dos deslocamentos estabilizadas foram divididas em 4 partes, ver Figura 3.43; foi também determinado o desvio padrão de cada parte.



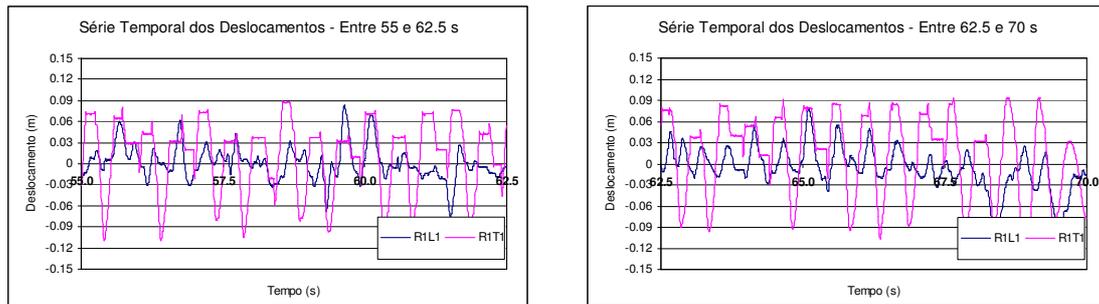


Figura 3.43- Série Temporal dos Deslocamentos Dividida em 4 partes.

A partir das séries temporais mostradas na Figura 3.43, obtém-se as amplitudes adimensionalizadas significativas, ver Tabela 3.42, como descrito a seguir:

- determina-se o desvio padrão dos deslocamentos (A_x e A_y);
- dividem-se estes valores pelo diâmetro do modelo, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas (A_x/D e A_y/D);
- multiplicam-se estes valores pela raiz quadrada de 2, obtendo-se as amplitudes adimensionalizadas significativas $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$.

Tabela 3.42- Amplitudes dos deslocamentos transversais $(A_y/D)_{sig}$ e longitudinais $(A_x/D)_{sig}$ medidas para cada parte da Série Temporal medida no ensaio.

Tempo	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Entre 40 e 47.5 s	0.261	0.701
Entre 47.5 e 55 s	0.268	0.697
Entre 55 e 62.5 s	0.293	0.623
Entre 62.5 e 70 s	0.364	0.714

A partir dos valores das amplitudes significativas mostradas na Tabela 3.42, tem-se os seguintes valores médios:

Tabela 3.43- Valores Médios das Amplitudes dos deslocamentos transversais e longitudinais significativas.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
Médio	0.297	0.684

A partir das séries temporais completas dos deslocamentos transversal e longitudinal, obtém-se as amplitudes significativas, $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$, apresentadas na Tabela 3.44.

Tabela 3.44- Amplitudes significativas dos deslocamentos transversal e longitudinal medidas no ensaio, para a Série Temporal Completa.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.303	
R1L2	0.432	
R1L3	0.425	
R1L4	0.374	
R1T1		0.703
R1T2		0.590
R1T3		0.833

Comparando os valores das amplitudes significativas transversal e longitudinal obtidos para a série temporal completa com o valor médio apresentando na Tabela 3.43, pode-se observar que não há diferença expressiva, o que mostra que há uma boa estabilidade dos valores medidos.

$$\frac{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_x}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.303}{0.297} = 1.021 \quad \text{Diferença inferior a 2.1\%}$$

$$\frac{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}}{\left(\frac{A_y}{D}\right)_{sig}} = \frac{0.703}{0.684} = 1.027 \quad \text{Diferença de 2.7\%}$$

A Figura 3.44 mostra que há deslocamento em ambas as direções, com predominância do deslocamento transversal gerando uma trajetória que é denominada na literatura de *banana-shaped* [27].

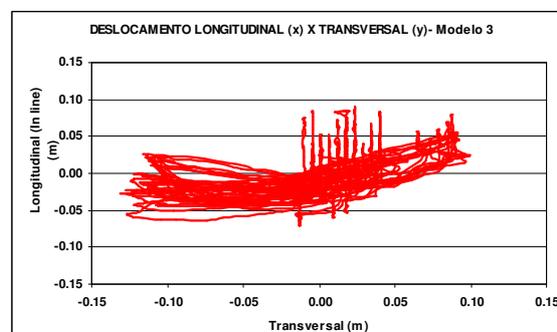


Figura 3.44- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3, quando $V= 1.7$ m/s.

3.4.2.1.7.2 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Conforme mencionado foram medidas as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal, através das células de carga. Estas forças estão resumidas na Tabela 3.45.

Tabela 3.45- Forças Hidrodinâmicos atuantes para $Re = 1.78 \times 10^5$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	188.22	244.96
Médio	93.44	8.12
Desvio Padrão	31.36	124.41
Mínimo	11.65	-213.37

O valor obtido para a força transversal média (Fy) foi diferente de zero; como o modelo foi deslocado na horizontal; tem-se como causa provável o efeito gravitacional sobre o escoamento, gerando uma assimetria no campo de pressão gerado pelo escoamento em torno da seção transversal do modelo.

A partir da força de arrasto média, tem-se o coeficiente de arrasto médio:

$$CD = 1.34$$

3.4.2.2 Resumo e Análise dos Resultados

As Tabelas 3.46, 3.47 e 3.48 apresentam um resumo dos resultados dos deslocamentos transversais e longitudinais para os modelos 1, 2 e 3.

Tabela 3.46- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 1.

V(m/s)	Re	Vr	(A/D)y	(A/D)x
0.2	1.96E+04	0.882	0.013	0.008
0.4	3.91E+04	1.764	0.027	0.037
0.6	5.87E+04	2.646	0.090	0.085
0.8	7.83E+04	3.529	0.178	0.107
1.0	9.78E+04	4.411	0.559	0.364

Tabela 3.47- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 2.

V(m/s)	Re	Vr	(A/D)y	(A/D)x
0.2	1.96E+04	0.869	0.0173	0.007
0.4	3.91E+04	1.737	0.0177	0.146
0.6	5.87E+04	2.606	0.071	0.067
0.8	7.83E+04	3.475	0.118	0.104
1.0	9.78E+04	3.909	0.33	0.191
1.1	1.08E+05	4.343	0.477	0.33
1.2	1.18E+05	4.778	0.561	0.372

Tabela 3.48- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 3.

V(m/s)	Re	Vr	(A/D)y	(A/D)x
0.4	4.19E+04	1.545	0.049	0.032
0.6	6.28E+04	2.318	0.036	0.112
0.8	8.37E+04	3.091	0.095	0.162
0.9	9.42E+04	3.477	0.223	0.228
1.0	1.05E+05	3.863	0.337	0.321
1.1	1.15E+05	4.249	0.429	0.382
1.2	1.26E+05	4.636	0.496	0.367
1.4	1.47E+05	5.408	0.7068	0.357
1.5	1.57E+05	5.795	0.771	0.423
1.6	1.67E+05	6.181	0.830	0.450
1.7	1.78E+05	6.567	0.703	0.432
1.8	1.88E+05	6.954	0.485	0.417

Notas:

- Frequência natural na água do modelo 1, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 1.85 Hz;
- Frequência natural na água do modelo 2, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 2.06 Hz;
- Frequência natural na água do modelo 3, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 2.31 Hz;
- A velocidade reduzida é expressa por: $V_R = \frac{U}{f_{NAT} \cdot D}$, ver referência [29].
- As frequências naturais da estrutura são iguais nas direções x e y.

As Figuras 3.45 e 3.46 representam a variação da amplitude adimensional significativa em função da velocidade reduzida nas direções longitudinal e transversal.

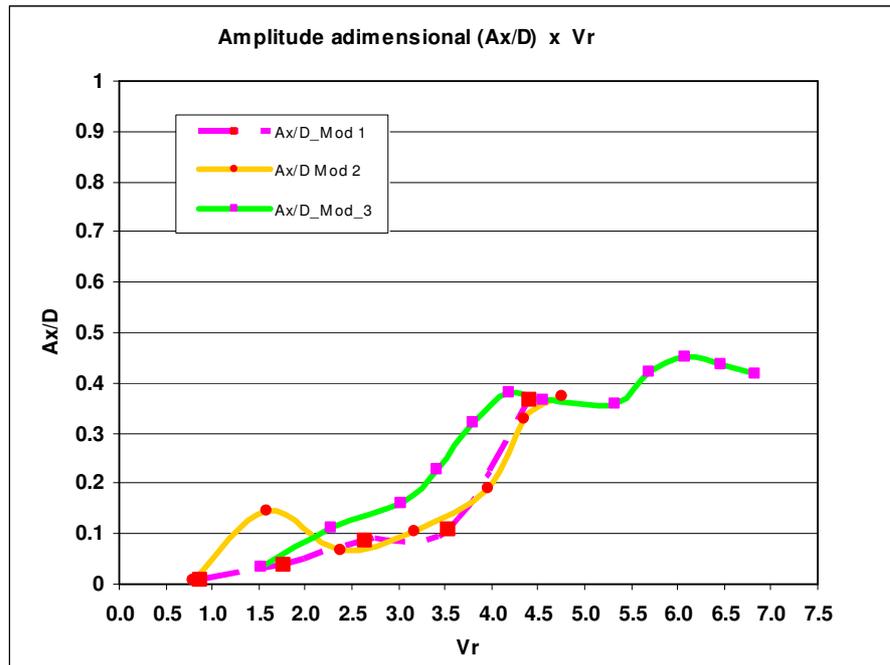


Figura 3.45 – Gráfico de $(Ax/D)_{sig} \times V_R$ para os Modelos 1, 2 e 3.

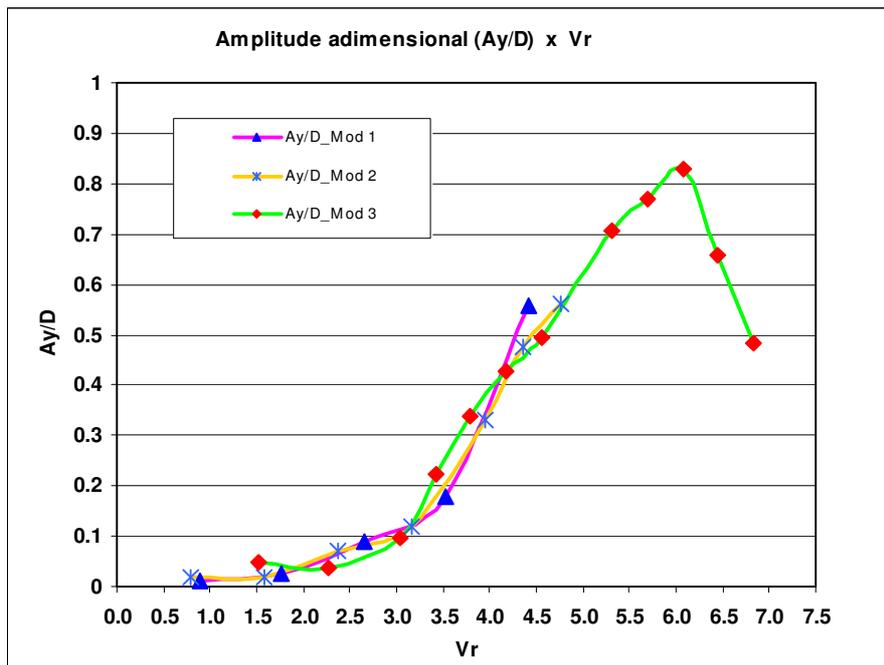


Figura 3.46 – Gráfico de $(Ay/D)_{sig} \times V_R$ para os Modelos 1, 2 e 3.

A variação da amplitude adimensionalizada com a velocidade reduzida na direção longitudinal nos mostra um patamar de estabilização em torno do valor de 0.45 Ax/D , quando há o lock in na direção transversal. Já na direção transversal, a amplitude adimensionalizada com a velocidade reduzida, resultou em um valor em torno de 0.85

Ay/D. Este resultado está de acordo com o esperado, já que a amplitude transversal obtida foi aproximadamente o dobro da longitudinal.

3.4.2.2.1 Freqüência de Oscilação, Coeficiente de Massa de Água Adicionada e Número de Strouhal Obtido no Ensaio

As freqüências de oscilação (f_{osc}) do riser na direção transversal estão resumidas na Tabela 3.49. Os valores da freqüência de oscilação apresentados foram obtidos a partir dos espectros de energia.

Tabela 3.49- Freqüências de Oscilação Obtidas nos Ensaiois.

Velocidade (m/s)	Freqüência de Oscilação (f_{osc}) (Hz)
1	1.330
1.1	1.355
1.2	1.422
1.4	1.774
1.5	1.910
1.6	1.950
1.7	2.033
1.8	2.132

Os valores das freqüências de oscilação medidos estão afetados da parcela de massa de água adicionada, conforme a fórmula a seguir obtida a partir da referência [29].

$$f_{OSC} = f_{NAT} \sqrt{\frac{M_{TUBO} + M_{INT} + Ca_0 \rho V_{RISER}}{M_{TUBO} + M_{INT} + Ca \rho V_{RISER}}} \quad (3.6)$$

onde:

Ca_0 : Coeficiente de massa adicionada para o riser oscilando na freqüência natural, que é igual a 1, conforme pode ser observado no item 3.4.1.1.3.1.

Usando a fórmula 3.6, obtêm-se os seguintes valores para o coeficiente de massa de água adicionada.

Tabela 3.50- Coeficiente de Massa de Água Adicionada (Ca) x Velocidade Reduzida.

Velocidade (m/s)	Frequência de Oscilação (f_{osc}) (Hz)	Ca
1	1.330	5.21
1.1	1.355	4.98
1.2	1.422	4.42
1.4	1.774	2.45
1.5	1.910	1.97
1.6	1.950	1.84
1.7	2.033	1.61
1.8	2.132	1.36

A Figura 3.47 apresenta uma comparação das curvas de Ca x Vr obtida na referência [30], com os valores apresentados na Tabela 3.50 para o modelo 3.

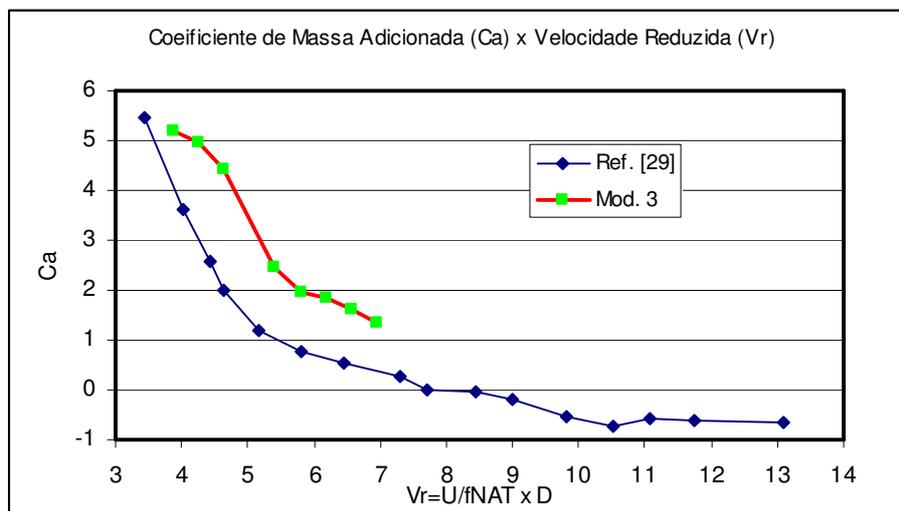


Figura 3.47 – Gráfico de Ca x Vr.

A curva de Ca x Vr obtida nos ensaios do NMRI, apresenta a mesma tendência que a obtida nos ensaios de Vikestad e apresentados na referência [30].

A seguir está determinado o número de Strouhal obtido nos ensaios.

Usando a formula da velocidade reduzida, tem-se:

$$V_R = \frac{U}{f_{NAT} \cdot D} \quad (3.7)$$

$$S = \frac{f_{ST} D}{U} \quad (3.8)$$

Multiplicando a (3.7) por (3.8), tem-se:

$$V_R S = \frac{U}{f_{NAT} \cdot D} \bullet \frac{f_{ST} D}{U} = \frac{f_{ST}}{f_{NAT}} \quad (3.9)$$

Na fórmula 3.9, quando o valor de f_{ST}/f_{NAT} é igual a 1, tem-se o ponto de lock in, as referências [41] e [42] denominam este valor de velocidade reduzida como velocidade reduzida crítica.

$$V_{RCRIT} = \frac{1}{S} \quad (3.10)$$

Usando-se a formula 3.10, pode-se determinar o número de Strouhal, a partir do gráfico apresentado na Figura 3.46.

$$V_{RCRIT} = 6.181, \text{ o que resulta em } S = 0.162$$

A partir das Figuras 3.45 e 3.46, pode-se verificar que para valores baixos de velocidades reduzidas, o que corresponde a valores baixos de frequências de desprendimento de vórtices, as amplitudes de vibrações longitudinais (in line) serão maiores que as transversais, já para os valores de velocidades reduzidas elevadas às amplitudes de vibrações transversais serão maiores.

3.4.2.2.2 Comparação com Resultados Disponíveis na Literatura

De acordo com a referência [28], pode-se a partir de determinados parâmetros, obter a amplitude máxima da vibração transversal:

$$\text{Razão de massa: } m^* = \frac{M}{\pi \rho D^2 L / 4} = \frac{13.216 + 31.604}{41.044} = 1.092$$

onde:

M : representa a massa do riser somada a massa do fluido interno.

Massa do tubo : $M_{tubo} = 13.216 \text{ kg}$

Massa do fluido interno : $M_{agua_interna} = 31.604 \text{ kg}$

Massa adicionada : $M_{adicionada} = 41.044 \text{ kg}$

Comprimento do modelo : $L = 4\text{m}$

Razão de amortecimento equivalente na água: $\zeta = 2.47\%$

Número de Strouhal Medido : $S = 0.162$

A partir da razão de massa, razão de amortecimento equivalente na água e do número de Strouhal obtido no ensaio, pode-se determinar o parâmetro de Skop Griffin (SG):

$$SG = 2 * \pi * S^2 * m^* * \zeta$$

$$SG = 2 * \pi * 0.162^2 * 1.092 * \frac{2.47}{100} = 0.00445$$

Considerando este parâmetro e a formulação empírica a seguir, tem-se:

$$\left(\frac{A_Y}{D} \right)_{MAX} = \frac{B}{\sqrt{C + SG^2}}$$

Onde : $B = 0.385$ e $C = 0.12$

$$\left(\frac{A_Y}{D} \right)_{MAX} = \frac{0.385}{\sqrt{0.12 + 0.00445^2}} = 1.111$$

O valor máximo de A_y/D obtido a partir da série temporal de deslocamento medido no ensaio foi igual 1.07, o que representa uma diferença de 3.8%, considerada aceitável.

A Figura 3.48 apresenta uma comparação dos resultados obtidos com os obtidos por Vikestad para um cilindro livre para vibrar, ver referência [29], e por Gopalkrishnan para um cilindro rígido com vibração forçada, ver referência [31].

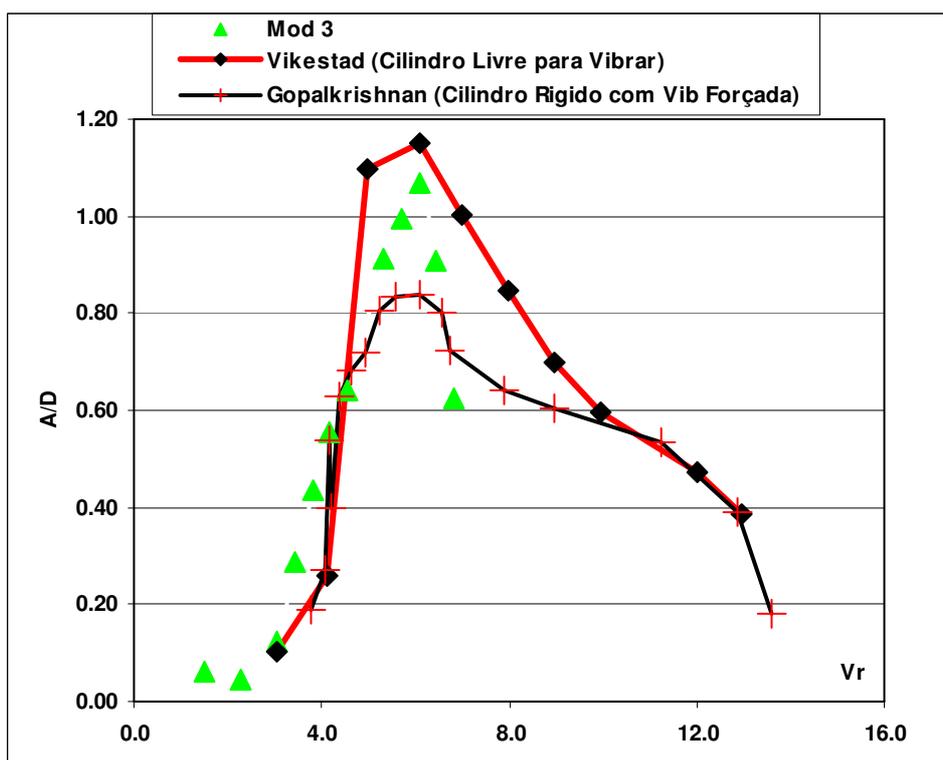


Figura 3.48- Comparação das Respostas de Vibrações Transversais Obtidas no NMRI com as Obtidas por Vikestad e Gopalkrishnan.

3.4.2.2.3 Comparação com o Programa SHEAR 7

Usando-se os valores das propriedades físicas, mecânicas, geométricas do modelo 3, e considerando o amortecimento estrutural equivalente obtido no ensaio de vibrações livres e o número de Strouhal obtido no ensaio de verificação do comportamento hidrodinâmico, igual a 0.162, chega-se a uma amplitude de vibração adimensionalizada máxima com o programa igual a 0.98.

A diferença em relação ao obtido no ensaio é de -8.4%. Contudo, se usássemos no programa Shear 7 um número de Strouhal igual a 0.165, obteríamos uma amplitude de vibração adimensionalizada máxima com o programa igual a 1.04, o que resulta uma diferença de -2.8%. Portanto, uma diferença no número de Strouhal inferior a 2%, o que é perfeitamente aceitável considerando-se as incertezas do estudo experimental e do próprio programa, ver item 3.4.2.1.6.1, irá produzir resultados muito próximos.

O arquivo com a entrada de dados e os resultados obtidos, está apresentado no Anexo D.

O programa SHEAR 7, vem sendo amplamente usado no projeto de *risers*, para estimativa da amplitude da vibração transversal devida ao fenômeno de vibrações induzidas por vórtices, detalhes deste programa podem ser consultados nas referências [41] e [42].

3.4.2.2.4 Coeficientes Hidrodinâmicos

A Figura 3.49 apresenta a variação do coeficiente de arrasto médio para os 3 modelos estudados.

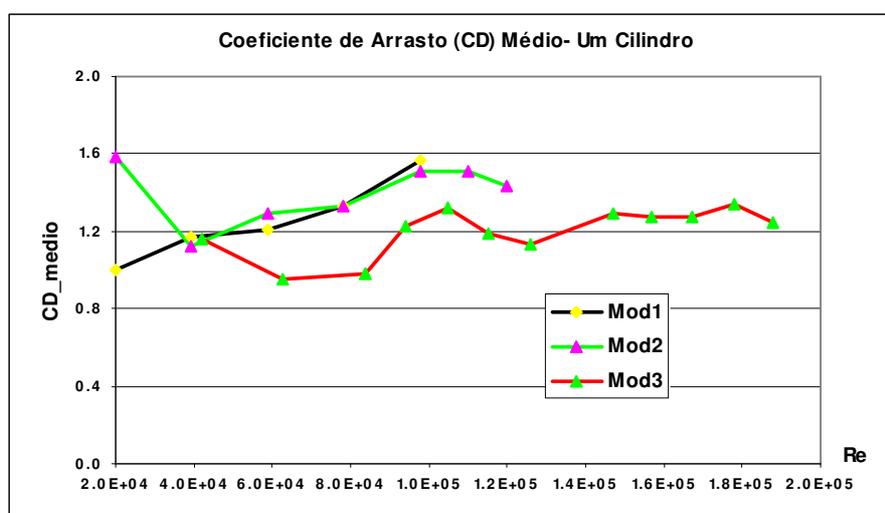


Figura 3.49- Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para os Modelos 1, 2 e 3 ensaiados.

Os valores dos coeficientes de arrasto médio, obtidos nos ensaios estão de acordo com os valores encontrados na literatura para cilindros, isto é, valor em torno de 1.2

3.4.2.2.5 Análise Crítica dos Resultados

Conforme apresentado na Figura 3.48 e baseado na determinação da amplitude adimensionalizada máxima, pode-se concluir que os resultados obtidos estão de acordo com o esperado para cilindros flexíveis.

Como o interesse maior deste trabalho é o estudo da interferência, os resultados obtidos para um riser isolado, servirão de base para a análise do comportamento hidrodinâmico da esteira, quando há dois *risers* próximos e dispostos em diferentes arranjos.

3.4.2.3 Escoamento ao Redor de Dois Risers Alinhados

Conforme mencionado anteriormente, foram estudados os *risers* alinhados e com espaçamento relativo igual a 2D, 3D, 4D e 5D usando-se o modelo 1, isto é, tubo de acrílico com espessura de 3 mm para as velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s. Para o modelo 2, foi estudado somente o espaçamento de 3D com velocidade de 0.8, 1 e 1.1 m/s.

Posteriormente, foi estudado um 3º modelo, feito em PVC para os seguintes espaçamentos e com as seguintes velocidades:

Espaçamento de 2D: 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 e 1.5 m/s

Espaçamento de 3D: 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8 m/s

Espaçamento de 5D: 0.4, 0.6, 1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8 m/s

Com o objetivo de sintetizar o texto, serão somente apresentados os resultados obtidos para o modelo 3 e para as velocidades que induziram maiores amplitudes de vibrações, isto é, próximas do ponto de *lock in*. Os demais casos estão apresentados no Anexo C.

3.4.2.3.1 Espaçamento 2D

A seguir, estão apresentados os resultados obtidos para o modelo 3 e para as velocidades de escoamento iguais a 1.0, 1.2, 1.4 e 1.5 m/s.

3.4.2.3.1.1 Velocidade de 1.0 m/s

A Figura 3.50 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

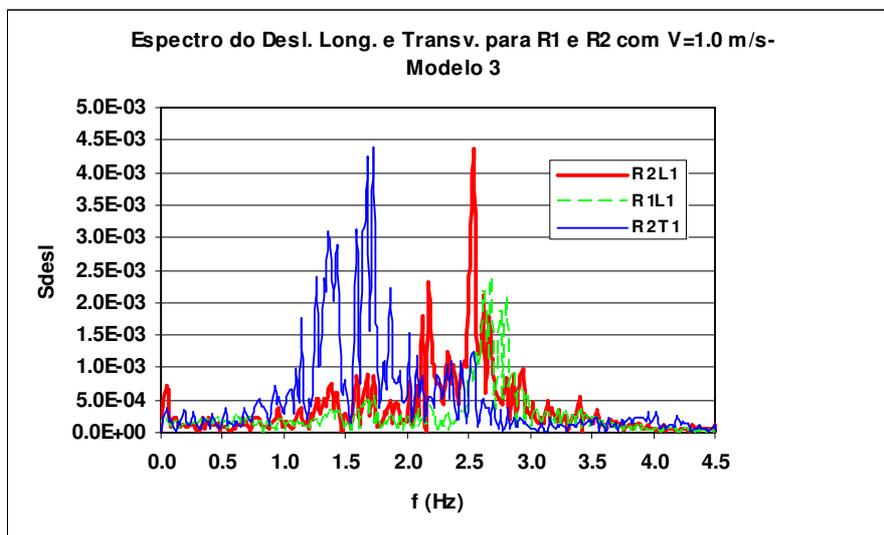
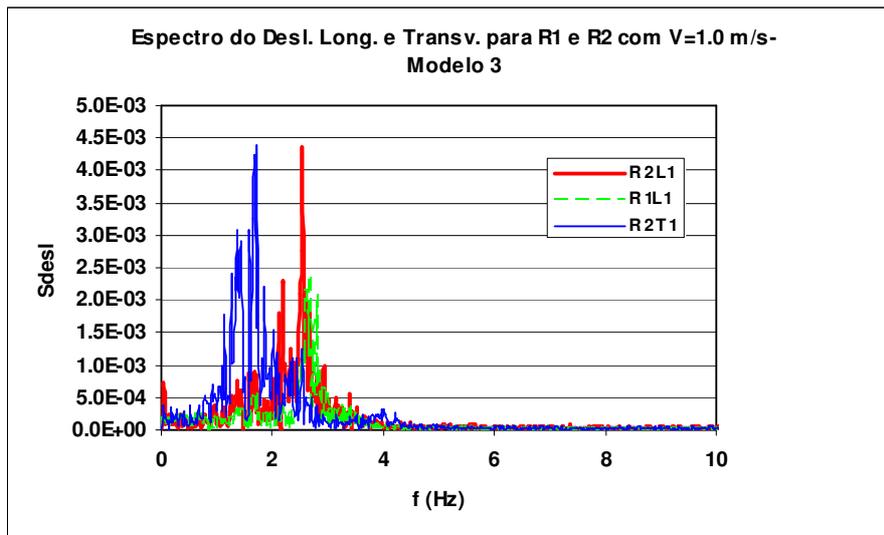


Figura 3.50- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1 e 2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1 e 2*, pode-se observar que foi excitada uma larga faixa de frequências em ambos os *risers* na direção longitudinal, assim como na direção transversal do *riser 2*. Pode-se, ainda, observar que a energia de excitação na direção longitudinal do *riser 2* é bem maior que do *riser 1*.

A Figura 3.51 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados e espaçados de 2D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.52 e 3.53, estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 4.5 Hz.

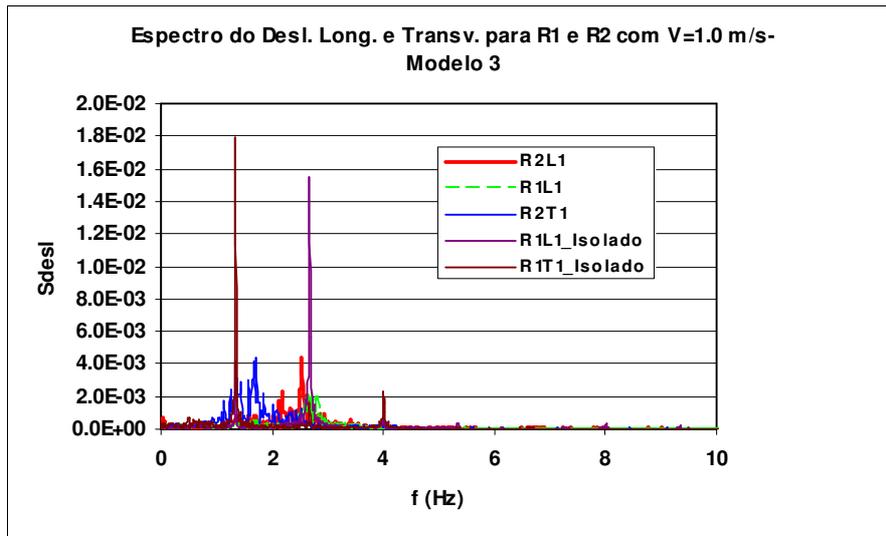


Figura 3.51- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser 2* e longitudinal dos *Risers 1* e *2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

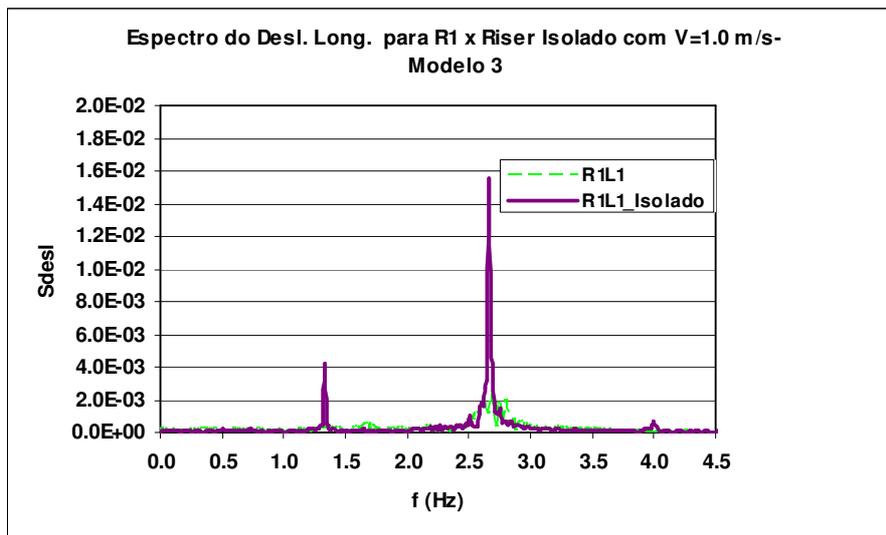


Figura 3.52- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser 1* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

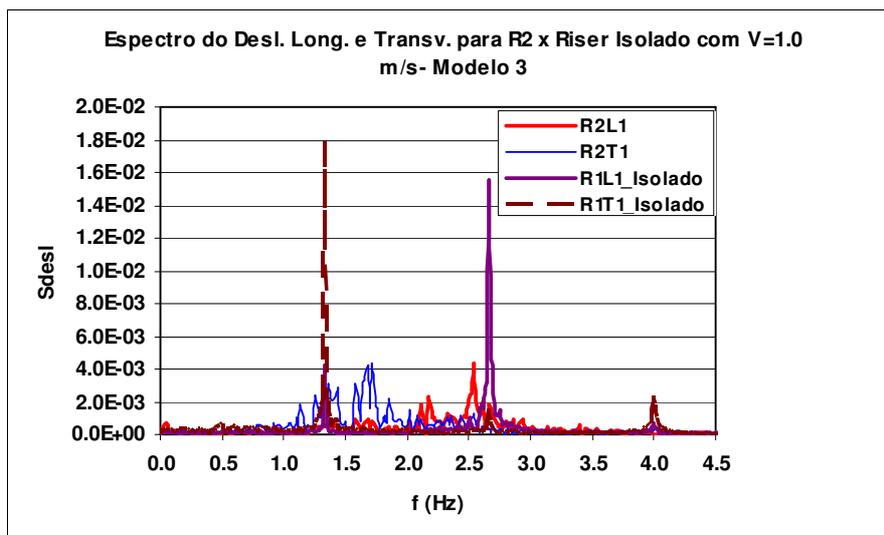


Figura 3.53- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- As energias de excitação nas direções transversal e longitudinal não estão mais concentradas em uma determinada frequência como para o caso do *riser* isolado. Portanto, para avaliarmos qual é a direção que apresenta maior energia, deve-se observar as amplitudes dos deslocamentos apresentados a seguir.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.51, mostram que o *riser 2* foi excitado com maior amplitude na direção transversal.

Tabela 3.51- Amplitude dos deslocamentos transversal do riser de jusante (R2) e longitudinal para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.113	0.166		
L2	0.111	0.162		
L3				
L4				
T1				0.232
T2				0.224
T3				0.189

A Figura 3.54 mostra que há deslocamento em ambas as direções, com predominância do deslocamento transversal para o *riser 2*.

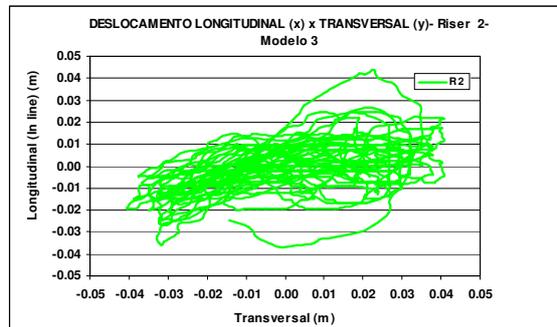


Figura 3.54- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinais x Transversais do Riser 2 do Modelo 3- Velocidade de 1m/s.

Ao compararmos com a trajetória dos deslocamentos obtidos para o riser isolado, ver Figura 3.20 apresentada anteriormente, pode-se observar que:

- A trajetória obtida para o riser isolado aproximava-se de uma figura em forma de oito, mostrando que foram excitadas vibrações transversais e longitudinais;
- A trajetória obtida para o *riser 2*, alinhado com outro riser e espaçado de 2D foi achatada, mostrando que há uma redução das vibrações longitudinais.

3.4.2.3.1.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga; a Tabela 3.52 apresenta estes resultados.

Tabela 3.52- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.05 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	64.22	54.47	78.29	74.88
Médio	26.16	3.48	3.43	1.27
Desvio Padrão	11.49	16.45	23.53	25.11
Mínimo	-7.37	-44.66	-58.03	-60.97

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.53:

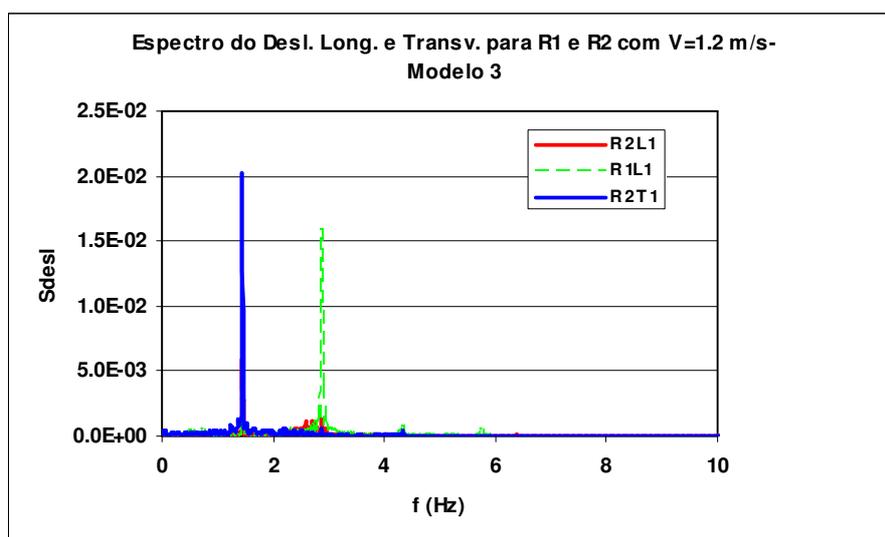
Tabela 3.53- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.05 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.082	0.144

Ao compararmos os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 4.2.1.1.1. Pode-se verificar que o efeito de sombra sobre o riser de jusante é bastante expressivo, gerando menores deflexões estáticas deste riser e, conseqüentemente, um maior risco de colisão. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (F_x) e transversais (F_y) para o *riser* de montante.

3.4.2.3.1.2 Velocidade de 1.2 m/s

A Figura 3.55 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.



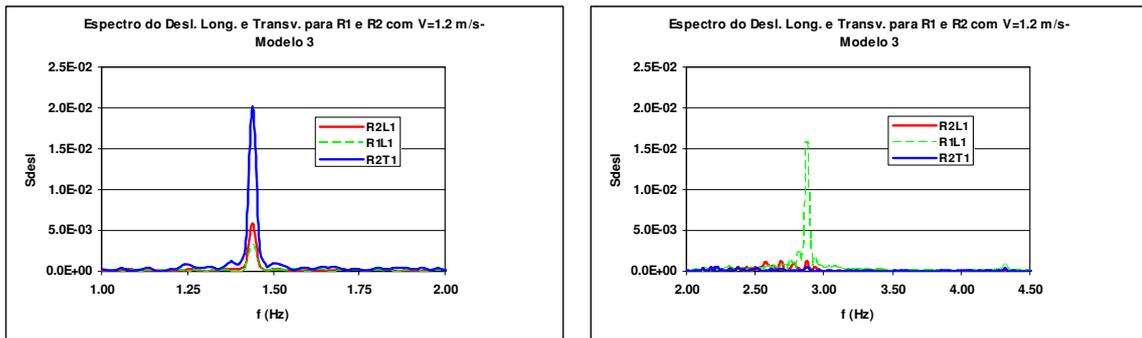


Figura 3.55- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe nas Faixas de Frequência de 0 a 2 Hz e 2 a 4.5 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal para o *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.45 Hz na direção transversal do *riser 2*; já na direção longitudinal, o *riser 1* foi excitado com uma frequência em torno de 2.9 Hz, apresentando maior energia que o *riser 2*.

A Figura 3.56 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 2D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.57 e 3.58 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

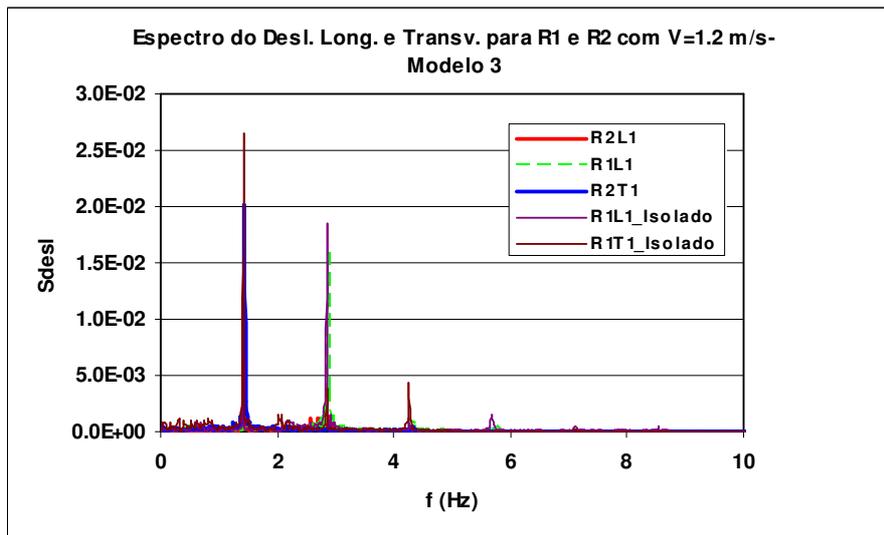


Figura 3.56- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser 2* e longitudinal dos *Risers 1* e *2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

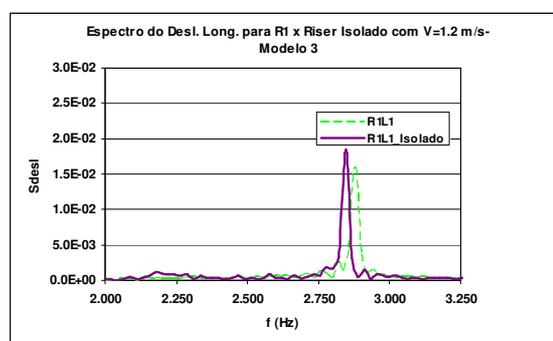
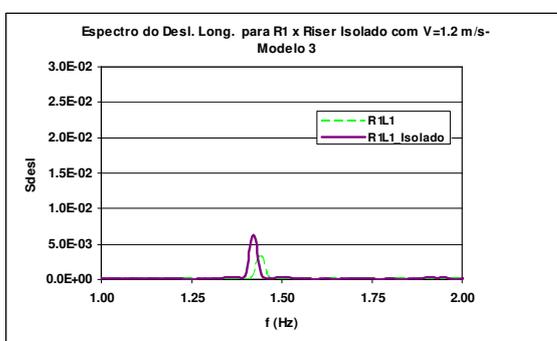
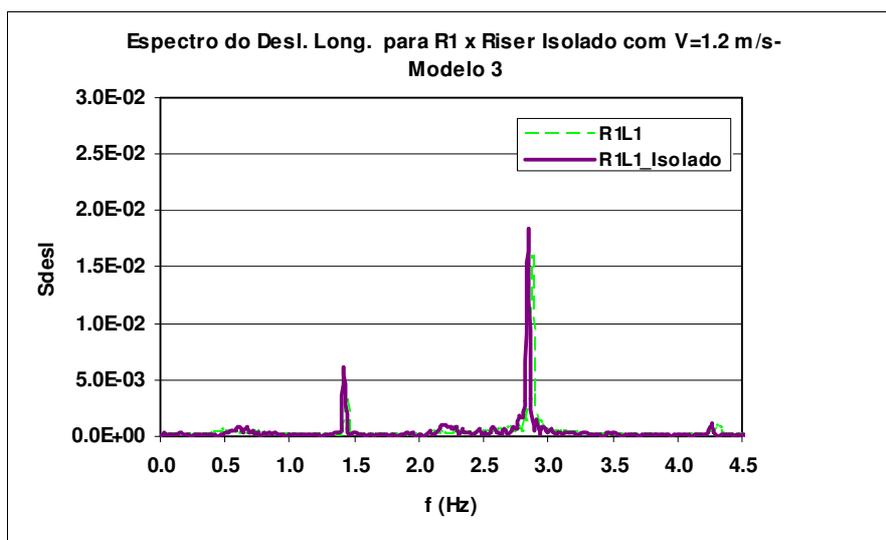
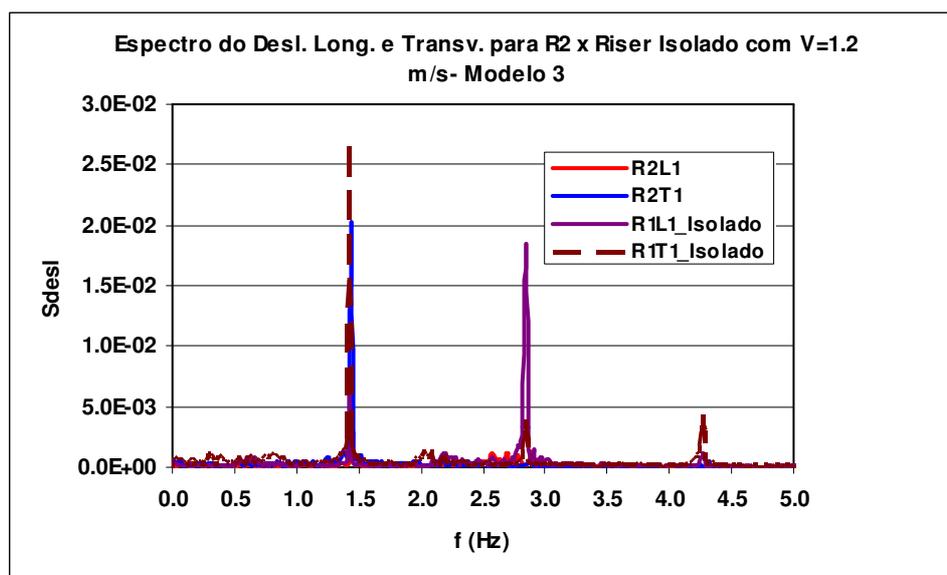


Figura 3.57- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser 1* do Modelo 3 com o *Riser Isolado*. Detalhes na faixa de frequência de 1 a 2 Hz e 2 a 3.25 Hz.



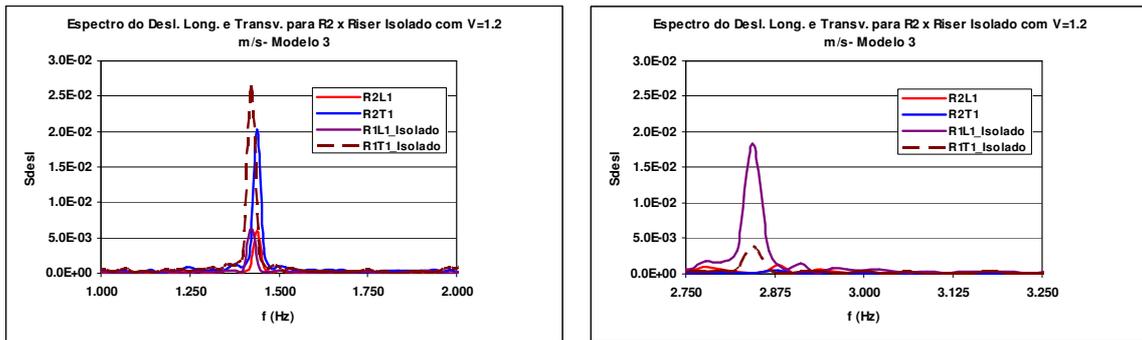


Figura 3.58- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado. Detalhes na faixa de frequência de 1 a 2 Hz e 2 a 3.25 Hz.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- Há uma pequena variação no pico da frequência excitada na direção longitudinal do *riser* 1 e uma pequena redução da energia quando comparado ao *riser* isolado;
- Há uma redução expressiva da energia de vibração na direção longitudinal do *riser* 2 (jusante), quando comparado ao *riser* isolado.
- Há uma redução da energia de vibração na direção transversal do *riser* 2 quando comparado ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.54, mostram que o *riser* 2 foi excitado com maior amplitude na direção transversal.

Tabela 3.54- Amplitude dos deslocamentos transversal do *riser* de jusante (R2) e longitudinal para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.313	0.147		
L2	0.311	0.144		
L3				
L4				
T1				0.371
T2				0.357
T3				0.308

A Figura 3.59 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o riser 2, aproximando-se a trajetória da figura conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

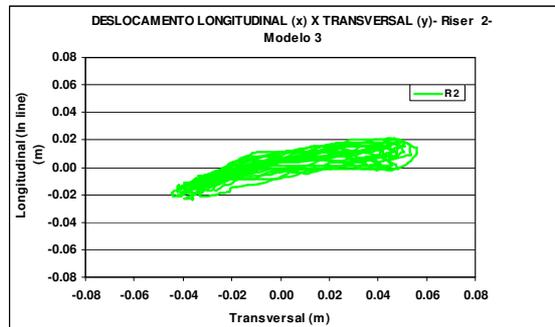


Figura 3.59- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal do Modelo 3- Velocidade de 1.2 m/s.

Ao compararmos com a trajetória dos deslocamentos obtida para o riser isolado, ver Figura 3.28 apresentada anteriormente, pode-se observar que:

- A trajetória dos deslocamentos do riser de jusante é completamente achatada mostrando que as vibrações transversais serão mais expressivas.

3.4.2.3.1.2.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.55 apresenta estes resultados.

Tabela 3.55- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.26 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	121.74	57.64	110.87	81.45
Médio	37.96	13.39	3.48	1.44
Desvio Padrão	31.75	10.12	50.56	42.54
Mínimo	-16.51	-31.43	-75.04	-75.09

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.56.

Tabela 3.56- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.05 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.090	0.385

Comparando-se os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.3.2, pode-se verificar que o efeito de sombra sobre o riser de jusante é expressivo, não tanto como no caso anterior. Isto se deve ao fato do ponto de descolamento da camada limite do riser de montante deslocar-se para trás, isto é, passa a ocorrer em um ângulo superior ao da velocidade de 1 m/s. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (F_x) e transversais (F_y) para o *riser* de montante.

3.4.2.3.1.3 Velocidade de 1.4 m/s

A Figura 3.60 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

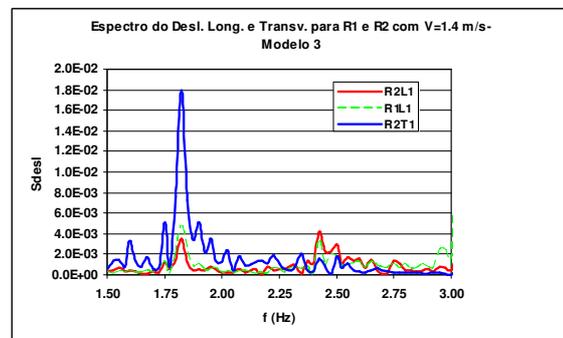
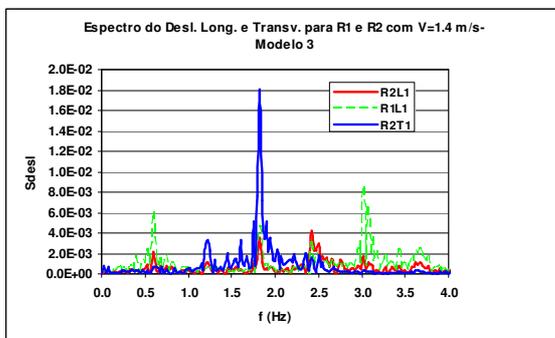
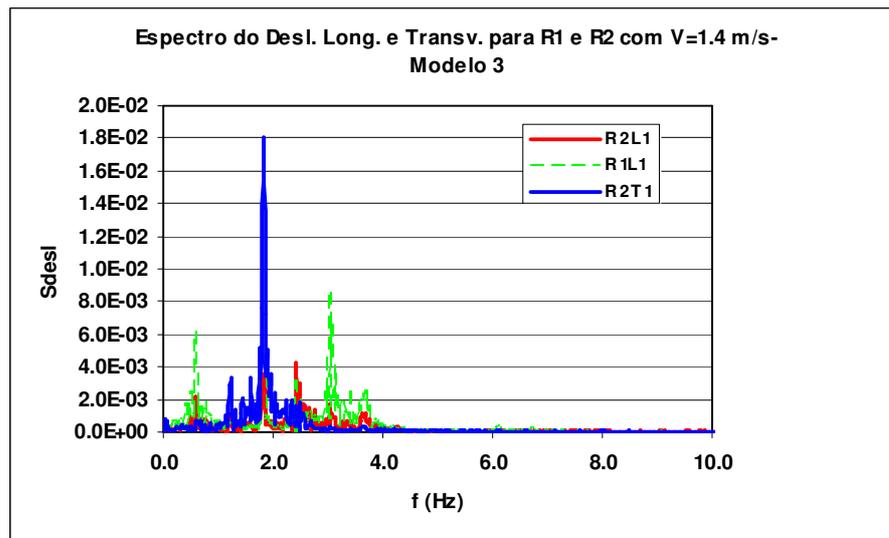


Figura 3.60- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe nas Faixas de Frequência de 0 a 4 Hz e 1.5 a 3 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal para o riser 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.85 Hz na direção transversal do *riser* 2, já na direção longitudinal o *riser* 1 foi excitado em uma larga faixa de frequência de 2.9 Hz a 3.8 Hz (Curva verde tracejada), sendo a energia de excitação maior que a do *riser* 2, contudo, bastante inferior à energia de excitação do *riser* 2 na direção transversal.

A Figura 3.61 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados e espaçados de 2D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.62 e 3.63 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 4 Hz.

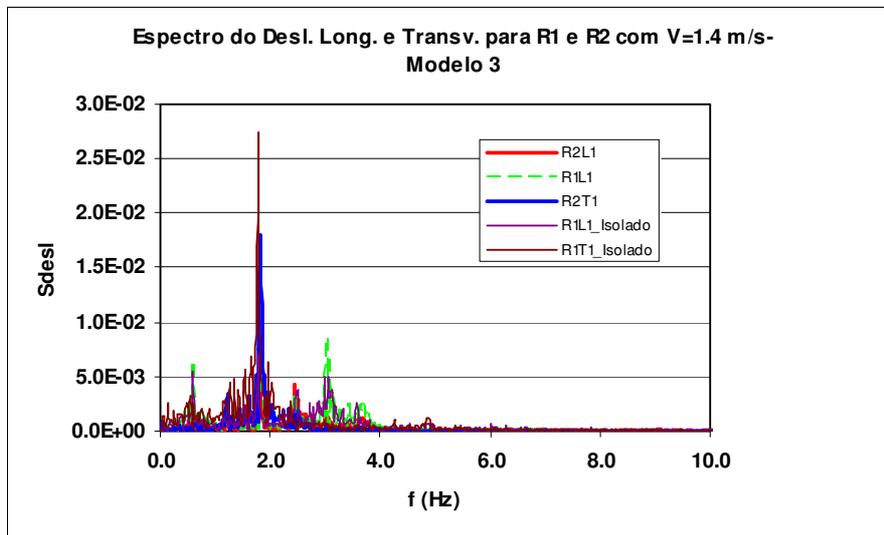


Figura 3.61- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser* 2 e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

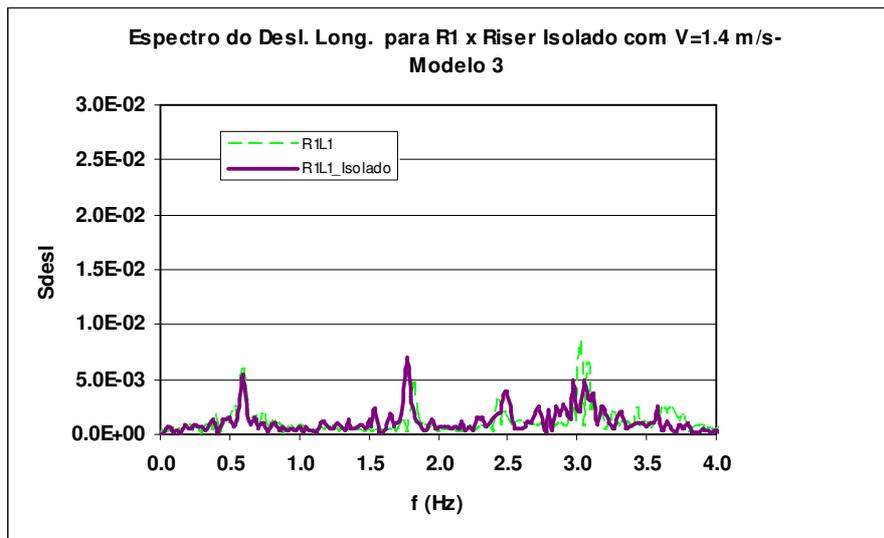


Figura 3.62- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser 1* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

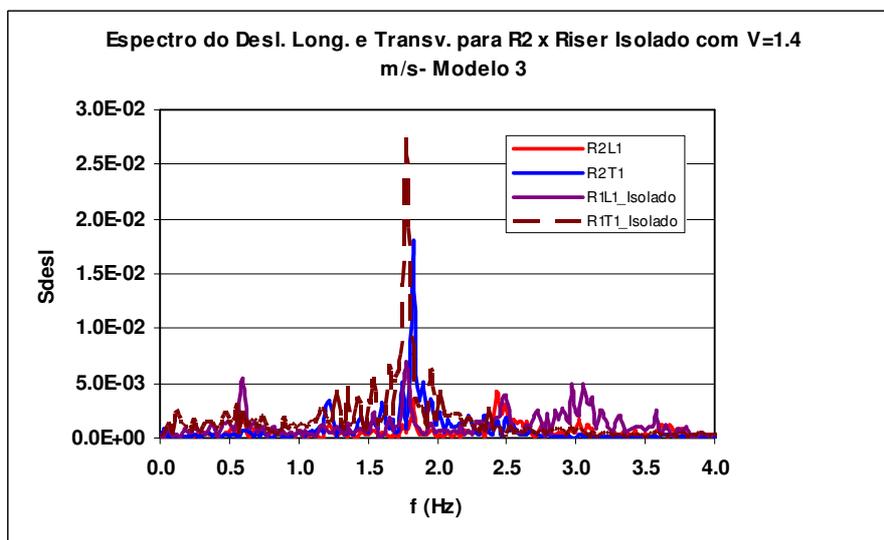


Figura 3.63- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- Há uma pequena variação no pico da frequência das vibrações excitadas na direção transversal do *riser 2*;
- Há uma redução expressiva da energia da vibração transversal do *riser 2*;
- Na direção longitudinal para ambos os *risers*, há uma redução da energia de excitação e distribuída em várias frequências na faixa de 0 a 4 Hz, comportamento similar ao observado para o *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.57, mostram que o *riser* 1 apresenta amplitude de vibração na direção longitudinal maior do que o *riser* 2, já o *riser* 2 apresenta amplitude de vibração predominantemente na direção transversal.

Tabela 3.57- Amplitude dos deslocamentos transversal do *riser* de jusante (R2) e longitudinal para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.334	0.189		
L2	0.331	0.183		
L3				
L4				
T1				0.439
T2				0.423
T3				0.355

A Figura 3.64 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser* 2.

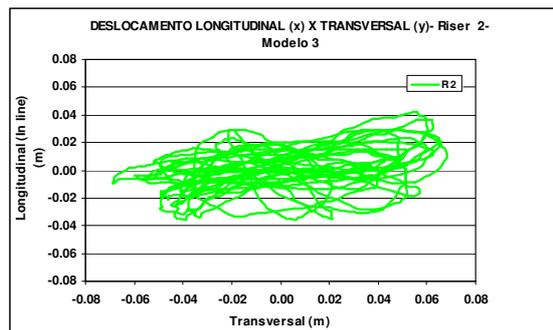


Figura 3.64- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal do Modelo 3, para Velocidade de 1.4 m/s.

Ao compararmos com a trajetória dos deslocamentos obtidos para o *riser* isolado, ver Figura 3.32 apresentada anteriormente, pode-se observar que:

- A trajetória obtida para o *riser* de jusante aproxima-se da obtida para o *riser* isolado. Contudo, pode-se observar uma redução das vibrações transversais e longitudinais.

3.4.2.3.1.3.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga; a Tabela 3.58 apresenta estes resultados.

Tabela 3.58- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.47 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	172.08	74.79	189.27	119.86
Médio	53.85	19.37	5.41	1.81
Desvio Padrão	36.50	17.15	80.31	52.96
Mínimo	-24.78	-36.47	-146.21	-99.49

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.59:

Tabela 3.59- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.47 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.136	0.409

Comparando-se os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.4.2 apresentado anteriormente, pode-se verificar que o efeito de sombra sobre o riser de jusante é expressivo, não tanto como no caso anterior. Isto se deve ao fato do ponto de descolamento da camada limite do riser de montante deslocar-se para trás, isto é, passa a ocorrer em um ângulo superior ao da velocidade de 1.2 m/s. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (Fx) e transversais (Fy) para ambos os *risers*.

3.4.2.3.1.4 Velocidade de 1.5 m/s

A Figura 3.65 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

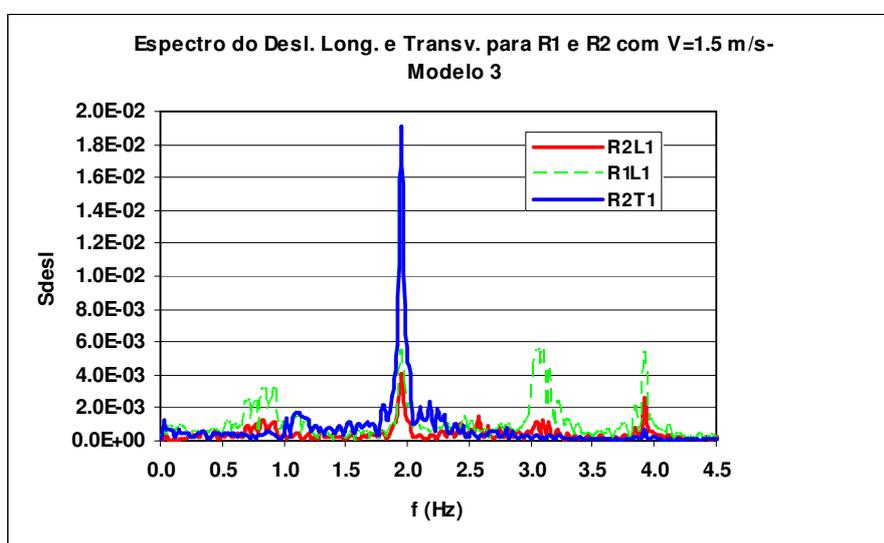
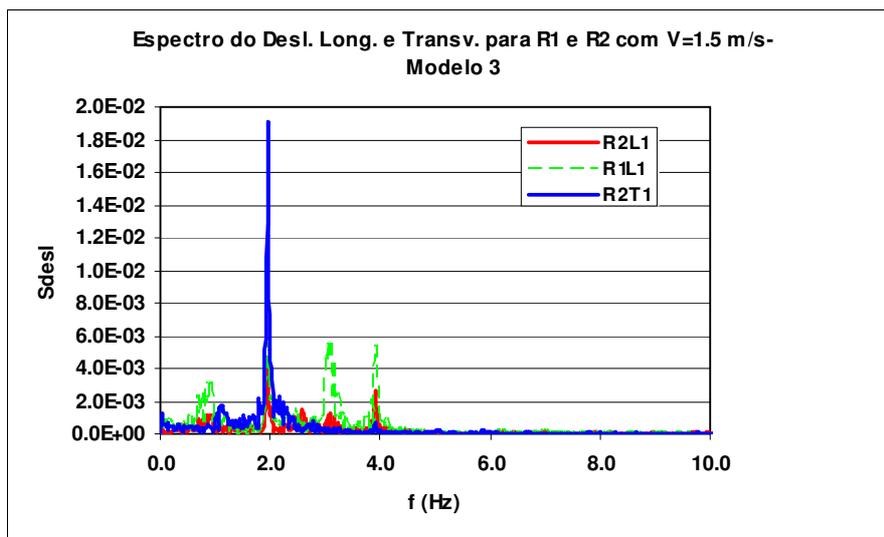


Figura 3.65- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal para o riser 2 e longitudinal dos risers 1 e 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.95 Hz na direção transversal do riser 2, nesta mesma frequência houve um pico energia de vibração na direção longitudinal para ambos os risers com predominância para o riser 1 (Curva verde tracejada), já na direção longitudinal o riser 1 foi excitado em uma larga faixa de frequência de 0.5 Hz a 4.5 Hz (Curva verde tracejada), sendo a energia de vibração maior que na direção longitudinal do riser 2, contudo inferior à energia de vibração na direção transversal do riser 2. Cabe salientar que houve um comportamento similar para a velocidade de 1.4 m/s.

A Figura 3.66 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 2D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.67 e 3.68 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 4.5 Hz..

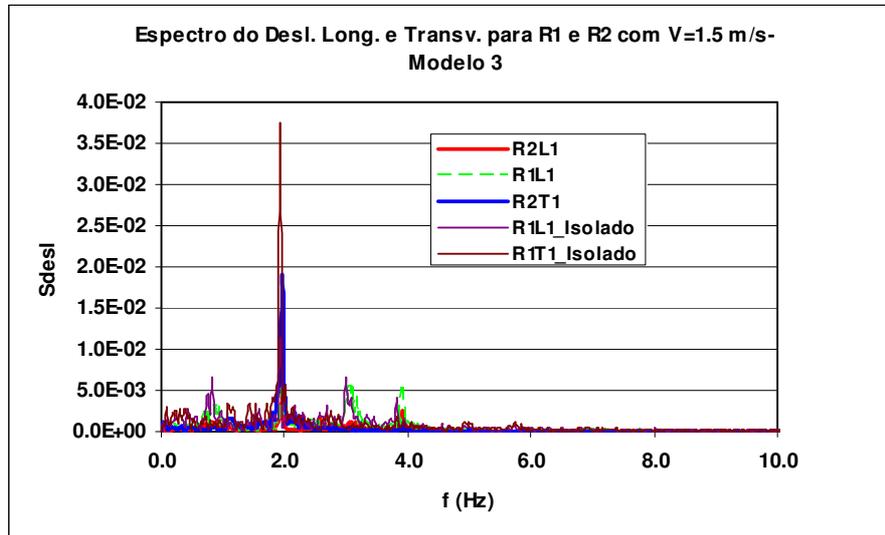


Figura 3.66- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser 2* e longitudinal dos *Risers 1* e 2 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

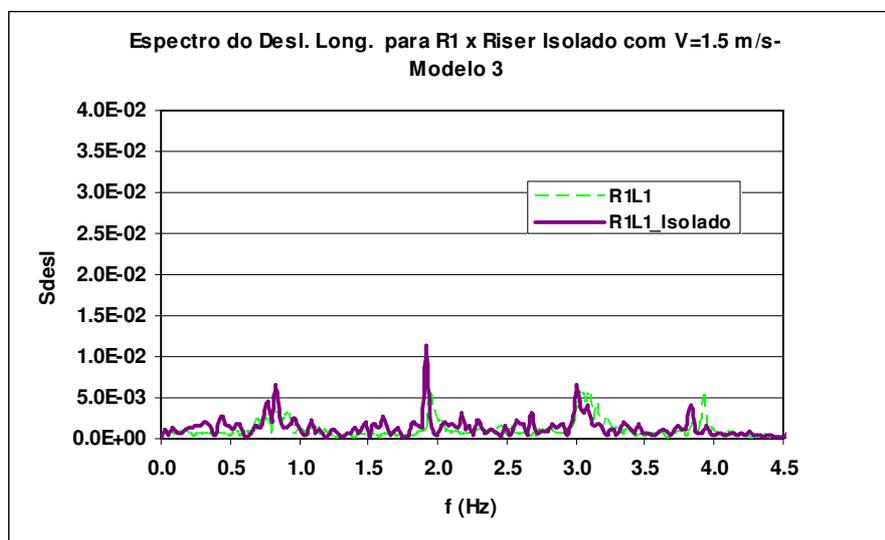


Figura 3.67- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

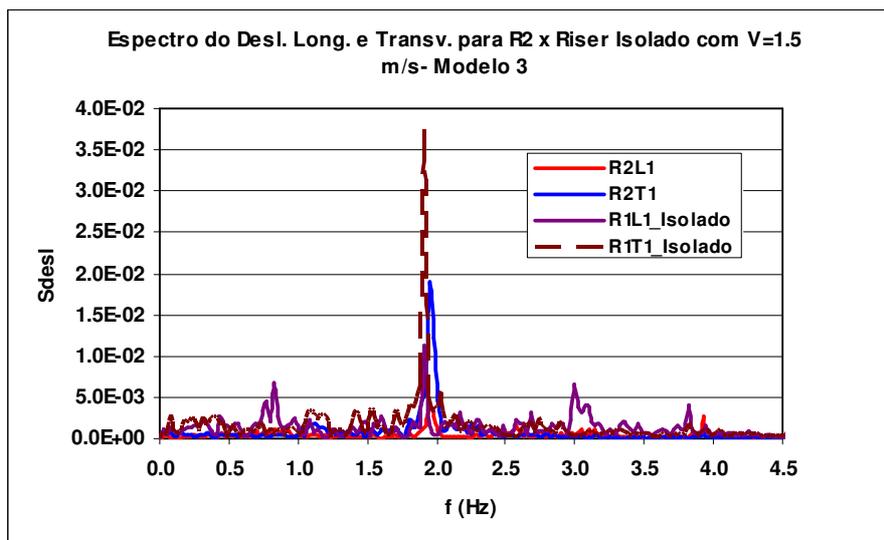


Figura 3.68- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- Há uma pequena variação no pico da frequência das vibrações excitadas na direção transversal para o *riser 2*;
- Há uma redução da energia da vibração transversal o *riser 2*, quando comparado ao *riser* isolado.
- Na direção longitudinal para ambos os *risers*, há uma redução da energia de vibração bastante reduzida e esta energia encontra-se distribuída em em uma faixa de frequências de 0 a 4 Hz, comportamento similar ao observado para o *riser* isolado.

É importante salientar que comportamento similar foi observado para a velocidade de escoamento de 1.4 m/s.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.60, mostram que o *riser 2* apresenta maior amplitude de vibração na direção transversal.

Tabela 3.60- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.338	0.151		
L2	0.334	0.147		
L3				
L4				
T1				0.464
T2				0.446
T3				0.380

A Figura 3.69 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser* 2, gerando uma trajetória achatada. Este tipo de trajetória é encontrado na literatura e denominado de banana-shaped [27].

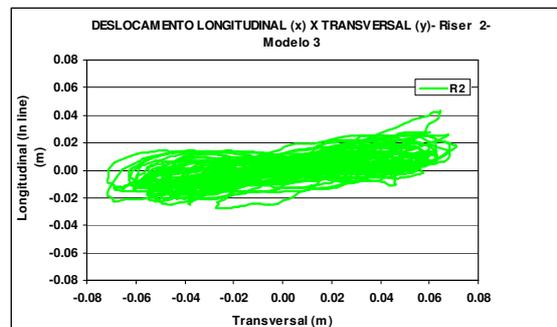


Figura 3.69- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal do Modelo 3- Velocidade de 1.5 m/s.

Ao compararmos com a trajetória dos deslocamentos obtidos para o riser isolado, ver Figura 3.36 apresentada anteriormente, pode-se observar que:

- A trajetória obtida para o riser de jusante aproxima-se da obtida para o *riser* isolado. Contudo pode-se observar uma redução das vibrações transversais e longitudinais;
- Comportamento similar foi observado para uma velocidade de 1.4 m/s.

3.4.2.3.1.4.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.61 apresenta estes resultados.

Tabela 3.61- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.57 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	189.21	60.23	231.10	123.74
Médio	64.15	20.53	7.85	1.26
Desvio Padrão	39.31	11.39	101.07	58.02
Mínimo	-23.22	-9.98	-167.74	-108.44

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.62:

Tabela 3.62- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.57 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.179	0.377

Comparando-se os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.5.2 apresentado anteriormente, pode-se verificar que o efeito de sombra sobre o riser de jusante é expressivo, não tanto como para o caso de velocidade de 1.2 m/s. Isto se deve ao fato do ponto de descolamento da camada limite do riser de montante deslocar-se para trás, isto é, passa a ocorrer em um ângulo superior ao da velocidade de 1.2 m/s. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (Fx) e transversais (Fy) para ambos os *risers*.

3.4.2.3.1.5 Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 2D

As Tabelas 3.63 e 3.64 apresentam um resumo dos resultados dos deslocamentos transversais e longitudinais para um *riser* isolado e compara com os resultados para os *risers* 1 e 2, quando o espaçamento entre eles é igual a 2D obtidos para o modelo 1 e 3, respectivamente.

Tabela 3.63- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 1.

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_i	(Ax/D)_i	(Ay/D)_r1	(Ax/D)_r1	(Ay/D)_r2	(Ax/D)_r2
0.2	2.00E+04	0.800	0.007	0.0173	N.D	N.D	N.D	N.D
0.4	3.90E+04	1.600	0.146	0.0177	N.D	0.0206	0.021	0.028
0.6	5.90E+04	2.400	0.067	0.071	N.D	0.098	0.034	0.084
0.8	7.80E+04	3.200	0.104	0.118	N.D	0.124	0.158	0.054
1	9.80E+04	4.000	0.191	0.33	N.D	N.D	N.D	N.D
1.1	1.10E+05	4.400	0.33	0.477	N.D	N.D	N.D	N.D
1.2	1.20E+05	4.800	0.372	0.561	N.D	N.D	N.D	N.D

Tabela 3.64- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 3.

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_i	(Ax/D)_i	(Ay/D)_r1	(Ax/D)_r1	(Ay/D)_r2	(Ax/D)_r2
0.4	4.19E+04	1.545	0.0485	0.0324	N.D	0.03	0.024	0.045
0.6	6.28E+04	2.318	0.0356	0.1122	N.D	0.138	0.043	0.134
0.8	8.37E+04	3.091	0.0951	0.1619	N.D	0.225	0.052	0.071
0.9	9.42E+04	3.863	0.2226	0.2279	N.D	N.D	N.D	N.D
1	1.05E+05	4.636	0.3371	0.3206	N.D	0.113	0.232	0.166
1.1	1.15E+05	5.408	0.4287	0.3818	N.D	N.D	N.D	N.D
1.2	1.26E+05	5.795	0.4952	0.3673	N.D	0.313	0.371	0.147
1.4	1.47E+05	1.545	0.7068	0.6264	N.D	0.334	0.439	0.189
1.5	1.57E+05	2.318	0.7713	0.423	N.D	0.338	0.464	0.151

Notas:

- Frequência natural do modelo 1, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 1.85 Hz;
- Frequência natural do modelo 3, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 2.31 Hz;
- As frequências naturais dos *risers* são iguais nas direções x e y;
- N.D : Não disponível.

3.4.2.3.1.5.1 Caracterização da Interação Hidrodinâmica para um Espaçamento de 2D

As Figuras 3.70 e 3.71 apresentam uma comparação dos valores das amplitudes adimensionalizadas significativas das vibrações transversais e longitudinais de um *riser*

isolado com 2 *risers* espaçados de 2D em função da velocidade reduzida, para os modelos 1 e 3.

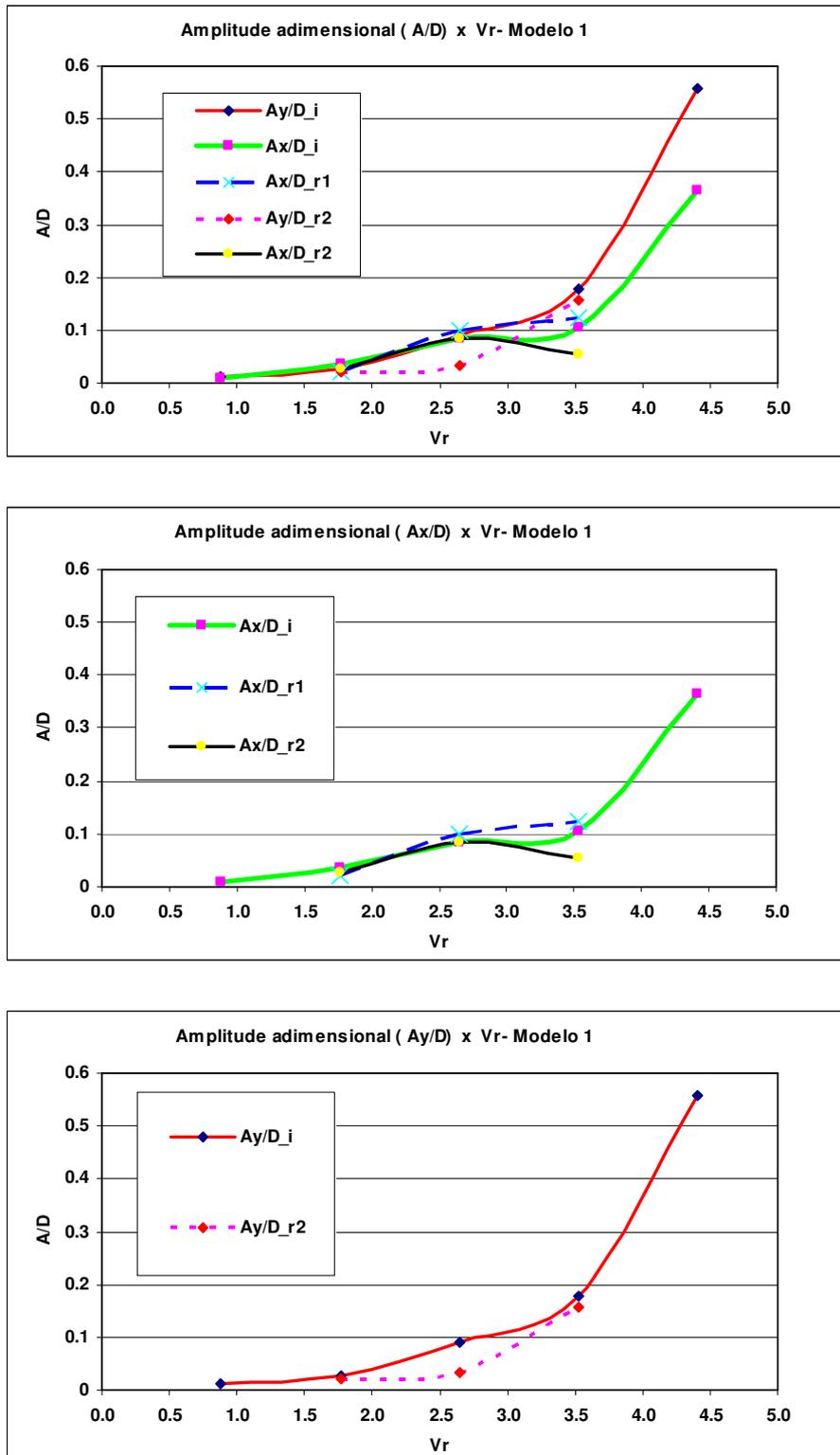


Figura 3.70 – Comparação do Gráfico de $A/D_{sig} \times V_R$ para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 1.

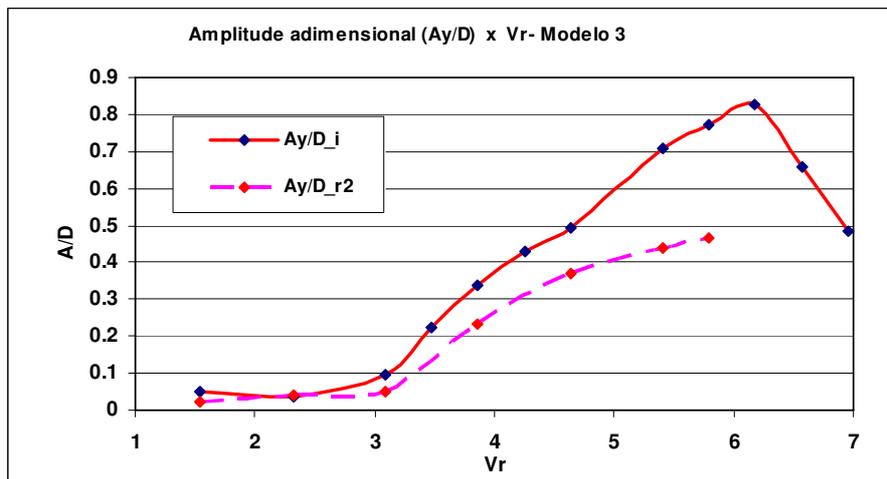
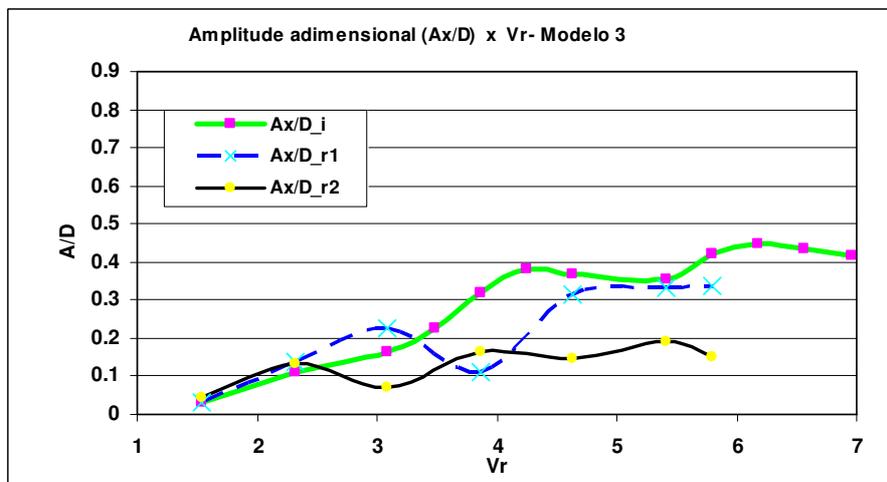
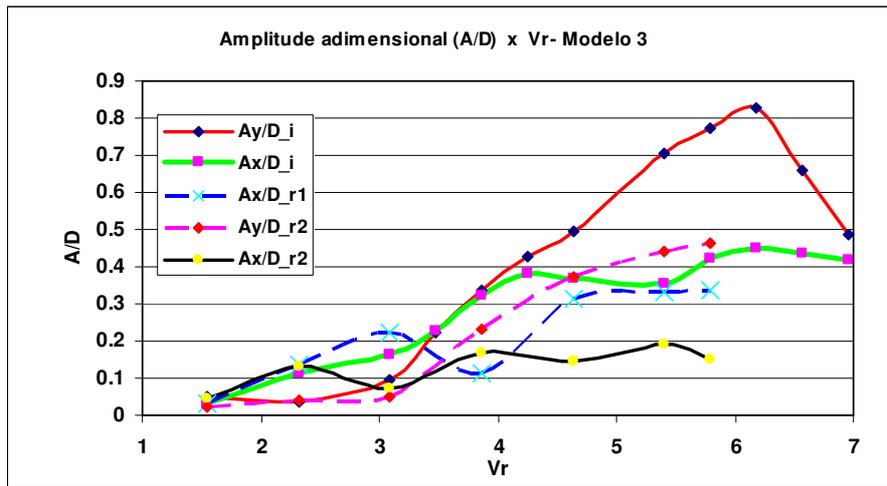


Figura 3.71 – Comparação do Gráfico de $A/D_{sig} \times V_R$ para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 3.

Analisando estes resultados, pode-se verificar que há uma redução na amplitude das vibrações longitudinais para valores elevados de velocidade reduzida para o *riser* de jusante, já o *riser* de montante apresenta um comportamento similar ao *riser* isolado.

Na direção transversal, não há resultados de vibrações para o *riser* de montante. Quanto ao *riser* de jusante, pode-se observar que há uma redução das vibrações.

As Figuras 3.72 e 3.73 apresentam uma comparação dos valores das variações das forças hidrodinâmicas transversais (direção y- sustentação) e longitudinais (direção x- arrasto) de um *riser* isolado com 2 *risers* espaçados de 2D em função do número de Reynolds, para o modelo 3. Estes resultados foram obtidos com as células de carga mostradas na Figura 3.11.

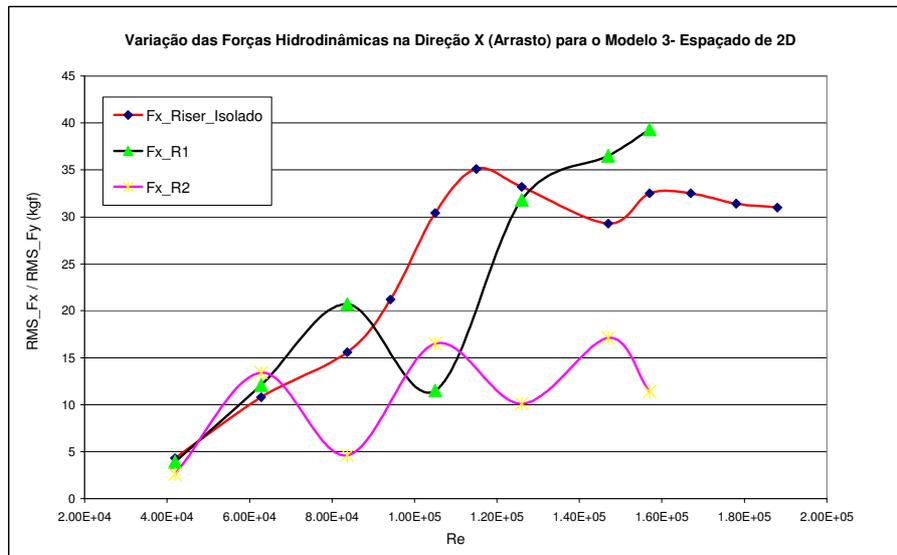


Figura 3.72 – Comparação do Gráfico de RMS_Fx x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 3.

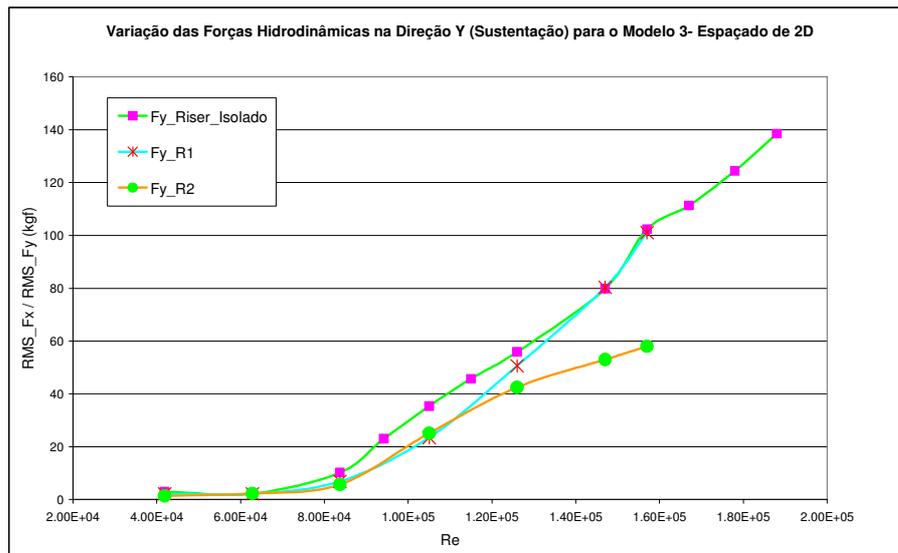


Figura 3.73 – Comparação do Gráfico de RMS_Fy x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 2D para Modelo 3.

Analisando estes resultados, pode-se verificar que há uma redução na variação das forças hidrodinâmicas longitudinais para valores elevados do número de Reynolds para o *riser* de jusante, já o *riser* de montante apresenta um comportamento similar ao *riser* isolado. Este resultado ratifica o que foi observado para as vibrações longitudinais.

Na direção transversal, a variação das forças hidrodinâmicas para o *riser* de montante, mostra que este apresenta um comportamento similar ao *riser* isolado. Quanto ao *riser* de jusante, pode-se observar que a variação da força transversal apresenta uma redução, ratificando o resultado obtido para as vibrações.

3.4.2.3.1.5.2 Comparação com Resultados encontrados na Literatura

Para este arranjo, há os resultados obtidos pela Shell e mencionados na referência [11]. A Tabela 3.65 apresenta um resumo das vibrações transversais obtidas no ensaio em referência e as Figuras 3.74 e 3.75 mostram uma comparação com os resultados obtidos no NMRI, considerando somente o *riser* de jusante.

Tabela 3.65- Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas Estudadas pela Shell, ver referência [11].

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_r1	(Ay/D)_r2
0.76	2.49E+00	2.812	0.0821	0.0456
0.83	2.73E+00	3.089	0.1186	0.0912
0.92	3.00E+00	3.394	0.2099	0.1825
0.98	3.20E+00	3.615	0.3193	0.3102
1.04	3.40E+00	3.837	0.4471	0.3604
1.09	3.59E+00	4.059	0.5292	0.4106
1.16	3.80E+00	4.294	0.5839	0.4380
1.22	4.01E+00	4.530	0.6387	0.4744
1.28	4.20E+00	4.751	1.0128	0.7983
1.35	4.43E+00	5.001	0.9945	0.7208
1.40	4.60E+00	5.194	1.0128	0.6296
1.47	4.82E+00	5.444	1.0949	0.7025
1.52	4.99E+00	5.638	1.1131	1.1268
1.58	5.20E+00	5.873	1.0766	1.1679
1.64	5.38E+00	6.081	1.0584	1.2044
1.71	5.61E+00	6.344	1.0401	1.2089
1.77	5.80E+00	6.552	0.9489	1.2226
1.83	6.02E+00	6.801	0.9124	1.1952
1.89	6.22E+00	7.023	0.8668	1.1861
1.95	6.41E+00	7.245	0.8029	1.1861
2.01	6.61E+00	7.466	0.6660	1.1679
2.07	6.80E+00	7.688	0.9398	1.1952
2.13	7.00E+00	7.909	0.6660	1.1587

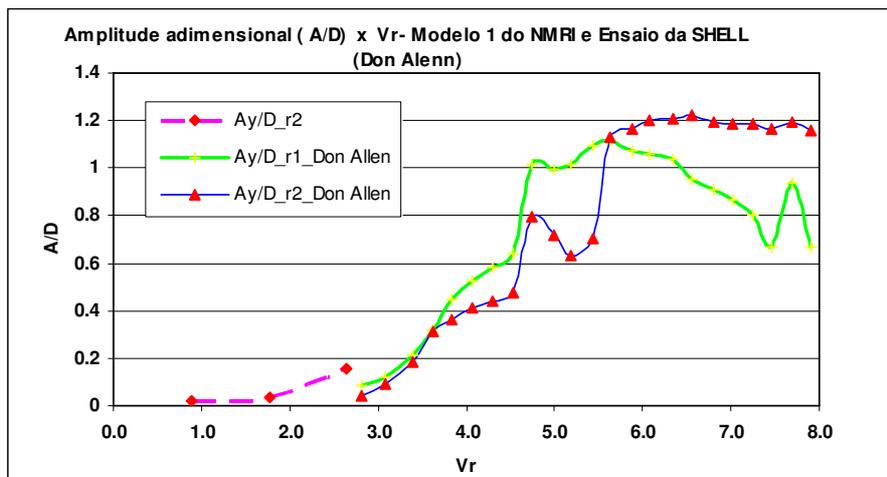


Figura 3.74- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 1 com os Apresentados na Referência [11].

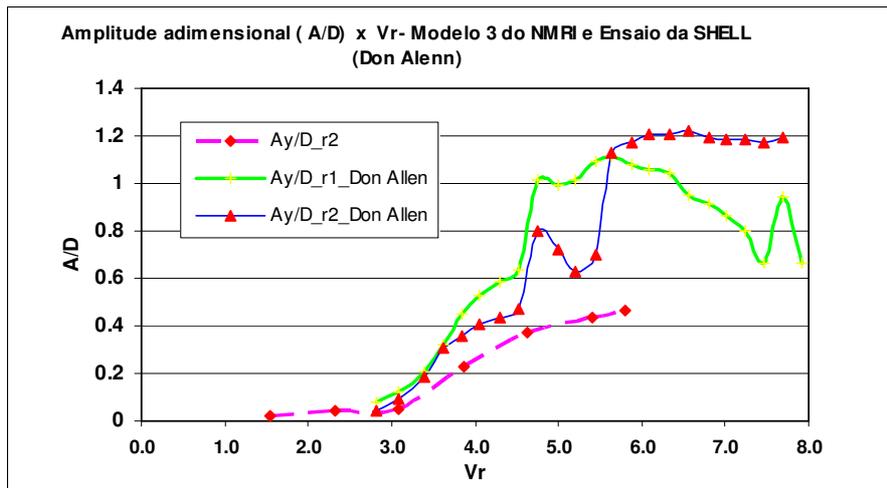


Figura 3.75- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 3 com os Apresentados na Referência [11].

A partir das Figuras 3.71 e 3.72, pode-se verificar que os resultados de amplitude de vibração transversal obtidos pela Shell [11] estão coerentes com os obtidos pelo NMRI para o riser de jusante e para valores baixos de velocidade reduzida, para valores de velocidade reduzida a partir de 4.5, há um aumento súbito das amplitudes adimensionalizadas nos ensaios conduzidos pela Shell. Como os resultados dos ensaios conduzidos no NMRI ajustaram-se bem aos apresentados na referência [21], como apresentado a seguir, e não há maiores informações na referência [11] que permita um melhor entendimento das diferenças observadas para valores elevados de velocidade reduzida. É importante salientar que na referência mencionada foram apresentados somente os valores de Ay/D .

Complementando as comparações dos resultados obtidos nos ensaios do NMRI com os disponíveis na literatura, têm-se os resultados apresentados na referência [21], que mostra os resultados de ensaios conduzidos pelo programa intitulado *Norwegian Deepwater Programme* (NDP). As Figuras 3.76 e 3.77 mostram, respectivamente, as comparações das amplitudes adimensionais versus velocidade reduzida nas direções longitudinal (R1 e R2) e transversal (somente R2 no ensaio do NMRI).

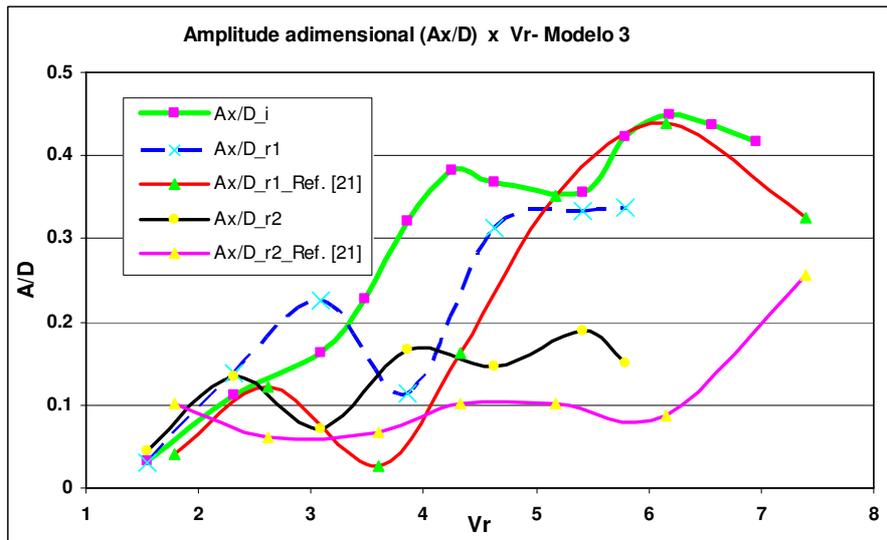


Figura 3.76- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Longitudinal x Velocidade Reduzida.

A partir da Figura 3.76, pode-se observar que os resultados estão coerentes e apresentam valores próximos e com uma mesma tendência, como salientado a seguir:

- o comportamento hidrodinâmico do *riser* 1 (montante) apresenta maiores amplitudes de vibração longitudinal do que o *riser* 2 (jusante), exceto somente no trecho de velocidade reduzida em torno de 3.5. É importante salientar a tendência similar das curvas obtidas em ambos os estudos;
- há um pico da resposta de amplitudes para as velocidades reduzidas do *riser* 1, em ambos os ensaios, em torno de 2.5 (a diferença entre eles se deve a frequência natural do modelo igual a 2.31Hz para o modelo do NMRI e igual 0.73Hz para o modelo da referência [21]), a seguir há uma redução das amplitudes que se amplificam a partir de uma velocidade reduzida de 3.5;
- a amplitude de vibração do *riser* 2 (jusante) é reduzida quando comparada a um riser isolado. Esta tendência ficou clara em ambos os estudos, sendo uma importante constatação para o estudo da interferência;

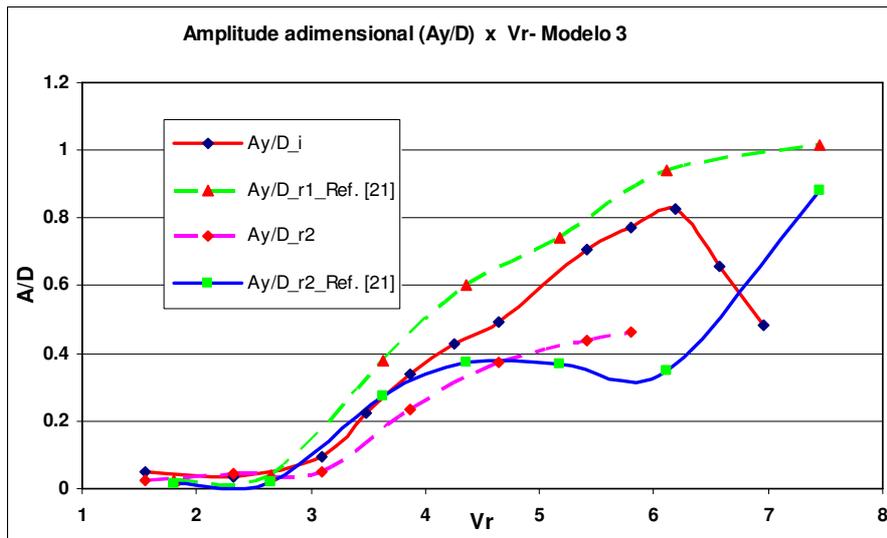


Figura 3.77- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Transversal x Velocidade Reduzida.

A partir da Figura 3.77, pode-se observar que os resultados estão coerentes e apresentam valores próximos e com uma mesma tendência, como salientado a seguir:

- o comportamento hidrodinâmico do *riser* 1 nos ensaios mostrados na referência [21], apresentam respostas das amplitudes de vibração transversal próximas da obtida nos ensaios do NMRI para o *riser* isolado;
- a amplitude de vibração do *riser* 2 (jusante) é reduzida quando comparada a um *riser* isolado. Esta tendência ficou clara em ambos os estudos, sendo uma importante conclusão para o estudo da interferência.

3.4.2.3.1.5.3 Variação do Coeficiente de Arrasto Médio

A partir das forças hidrodinâmicas longitudinais medidas, podem-se obter o coeficiente de arrasto médio. A Figura 3.78 apresenta a comparação das variações deste coeficiente hidrodinâmico entre um *riser* isolado e 2 *risers* alinhados e espaçados de 2D, em função do número de Reynolds.

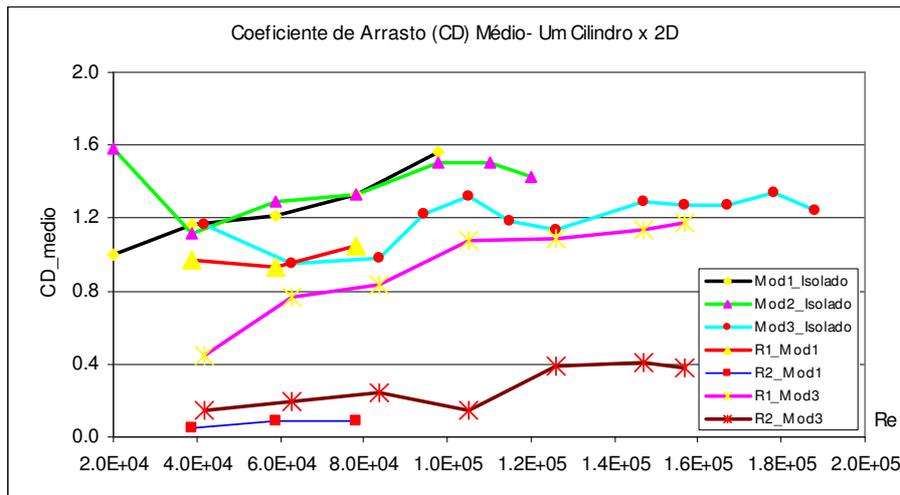


Figura 3.78- Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um Riser Isolado (Modelos 1, 2 e 3) e para 2 Risers Alinhados e Espaçados de 2D (Modelos 1 e 3).

Os valores dos coeficientes de arrasto médios apresentados na Figura 3.78, mostram claramente o efeito de sombra; pode-se verificar que este efeito é mais acentuado para baixos valores do número de Reynolds.

Comparando-se com os resultados obtidos pela Shell, e mencionados na referência [11], têm-se os resultados mostrados na Figura 3.79.

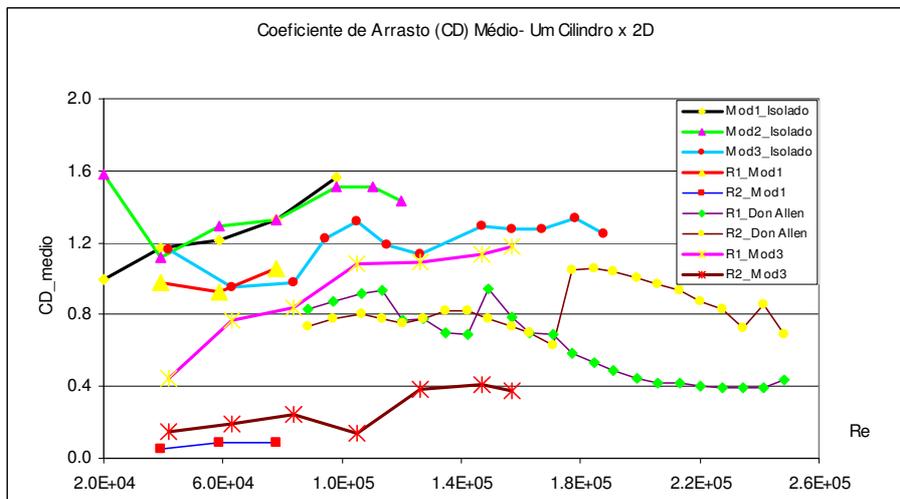


Figura 3.79- Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para para 2 Risers Alinhados e Espaçados de 2D (Modelos 1 e 3) ensaiados no NMRI e os Valores Apresentados na Referência [11].

3.4.2.3.1.5.4 Verificação da Interferência

Conforme mencionado, foram registradas as séries temporais dos deslocamentos longitudinais nos pontos R1L1 e R2L1, ver Figura 3.14, o que nos permite avaliar as deflexões dos modelos, e concluir se houve ou não colisão entre eles.

A seguir, estão apresentadas as séries temporais de deslocamentos para as velocidades de 1, 1.2, 1.4 e 1.5 m/s nos pontos R1L1 e R2L1. E uma verificação se há ou não interferência entre os risers.

As Figuras 3.80 a 3.83 apresentam as séries temporais dos deslocamentos para as velocidades de 1.0, 1.2, 1.4 e 1.5 m/s. Associado a estas Figuras, há uma Figura que mostra ao longo da série temporal se houve ou não colisão; se não houve será zero e se houver será igual a 1 e será indicado o tempo em que ocorreu a colisão.

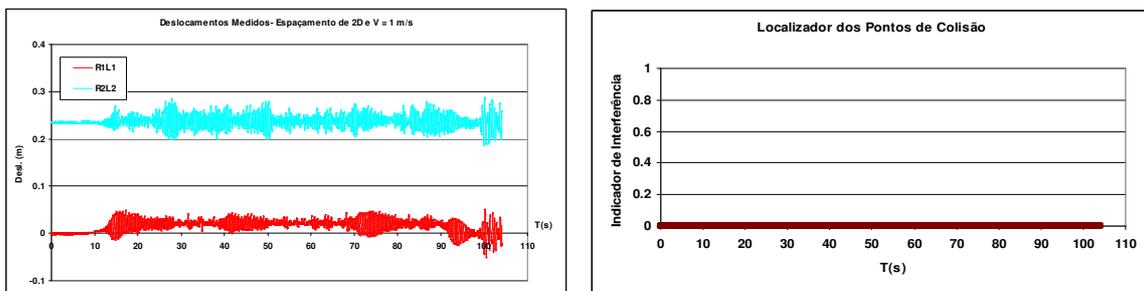


Figura 3.80- Série temporal de deslocamentos para $V= 1\text{m/s}$ e indicação se há colisão.

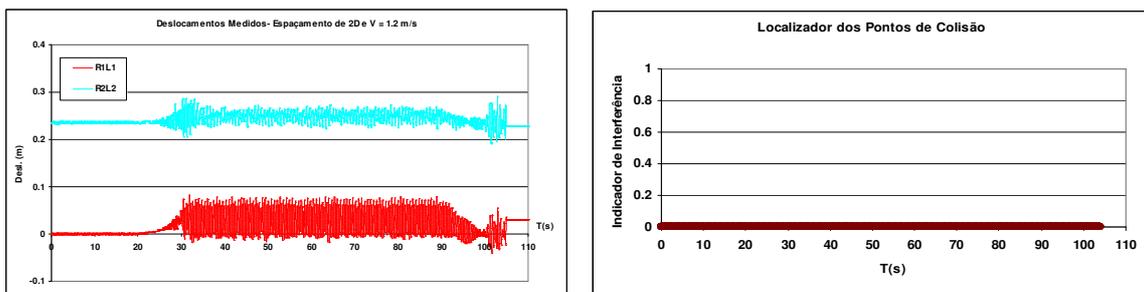


Figura 3.81- Série temporal de deslocamentos para $V= 1.2\text{ m/s}$ e indicação se há colisão.

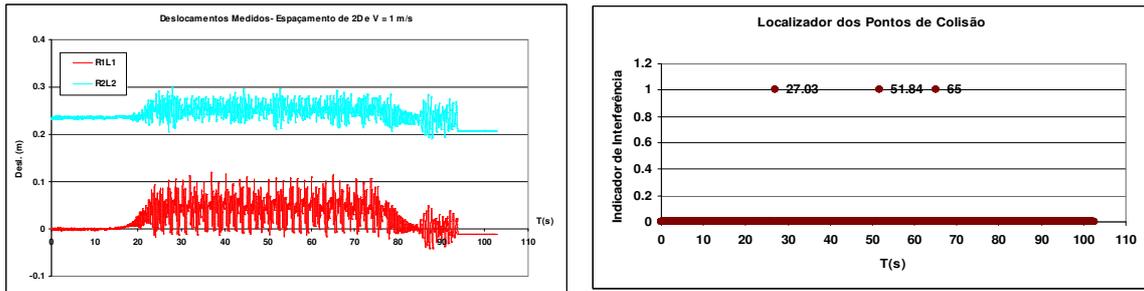
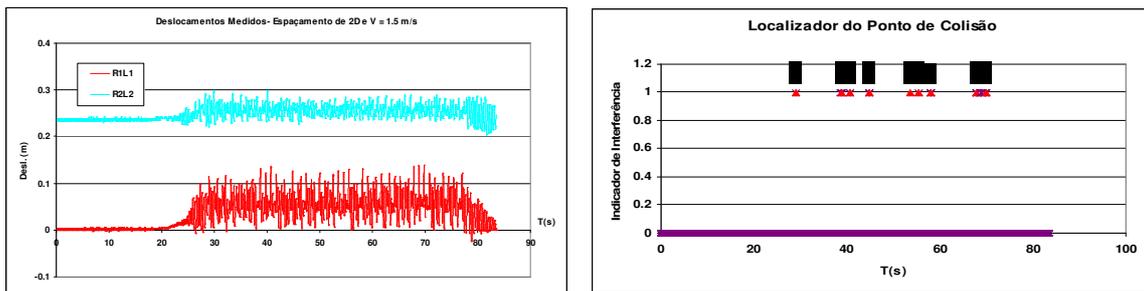


Figura 3.82- Série temporal de deslocamentos para V= 1.4 m/s e indicação se há colisão.



3.83- Série temporal de deslocamentos para V= 1.5 m/s e indicação se há colisão.

Analisando-se os dois casos em que houve colisão, têm-se as seguintes deflexões estáticas:

Tabela 3.66- Deflexões Estáticas Medidas.

Velocidade (m/s)	fR1 (m)	fR2 (m)
1.4	0.0452	0.0188
1.5	0.0567	0.0209

Pode-se obter a distância estática entre os risers: $d_{FINAL} = d_{INICIAL} - (f_{R1} - f_{R2})$

$d_{INICIAL} = 0.114$ m (igual a 1 diâmetro)

Para velocidade de 1.4 m/s, tem-se: $d_{FINAL} = 0.114 - (0.0452 - 0.0188) = 0.0879$ m

Para velocidade de 1.5 m/s, tem-se: $d_{FINAL} = 0.114 - (0.0567 - 0.0209) = 0.0785$ m

Como se pode observar, haverá colisão entre os modelos para as maiores velocidades, isto é, velocidades de 1.4 e 1.5 m/s. Considerando que devido somente a parcela estática, não haveria colisão, pode-se concluir que esta, é causada pelo vibração longitudinal, e que estas vibrações dos dois risers estão defasadas. Isto nos mostra que a interferência é um fenômeno dinâmico, não podendo ser tratado de forma estática.

3.4.2.3.2 Espaçamento 3D

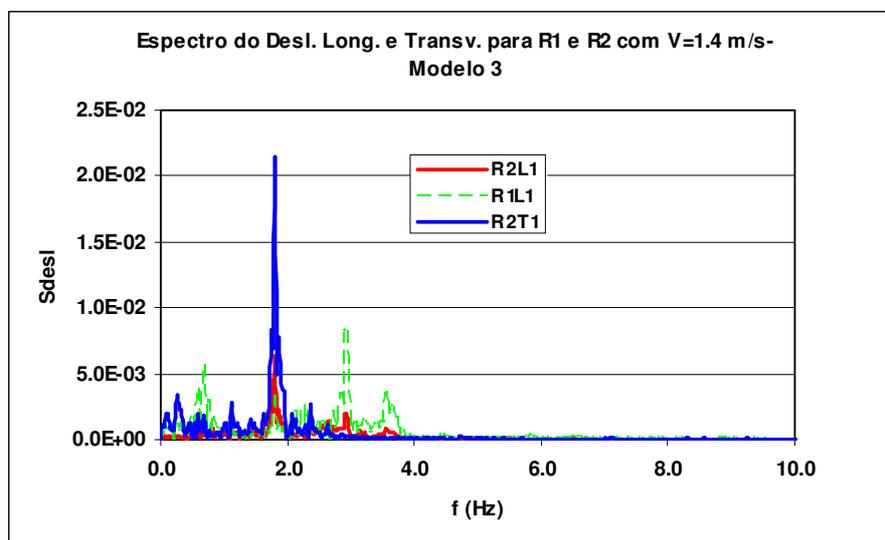
Conforme mencionado para este arranjo foi o usado o modelo 1, submetido as seguintes velocidades de escoamento de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s, o modelo 2, submetido as seguintes velocidades de escoamento de 0.8, 1.0 e 1.1 m/s e o modelo 3, submetido às velocidades de escoamento de 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8 m/s.

Assim como foi feito para o espaçamento de 2D, com o objetivo de sintetizar o texto, serão somente apresentados os resultados obtidos para o modelo 3 e para as velocidades que induziram maiores amplitudes de vibrações, isto é, próximas do ponto de *lock in*. Os demais casos estão apresentados no Anexo C.

A seguir, estão apresentados os resultados obtidos para o modelo 3 e para as velocidades de escoamento iguais a 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8 m/s.

3.4.2.3.2.1 Velocidade de 1.4 m/s

A Figura 3.84 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.



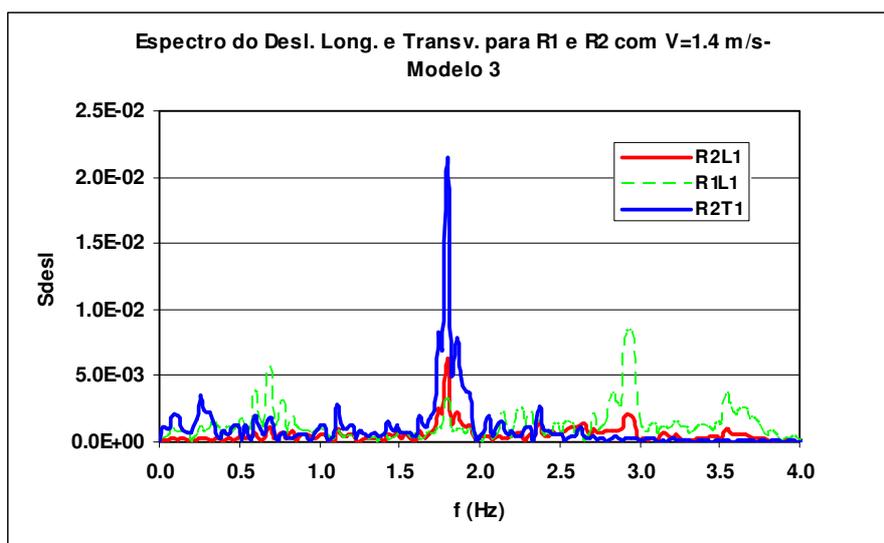


Figura 3.84- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1 e 2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal para o *riser 2* e longitudinal dos *risers 1 e 2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.8 Hz na direção transversal do *riser 2*. Na direção longitudinal o *riser 1* foi excitado em uma larga faixa de frequências, compreendida entre 0 a 4 Hz (Curva verde tracejada); sendo a energia de excitação maior que na direção longitudinal do *riser 2*. Contudo, inferior a energia de excitação do *riser 2* na direção transversal. É importante salientar, que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D.

A Figura 3.85 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.86 e 3.87 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 4 Hz.

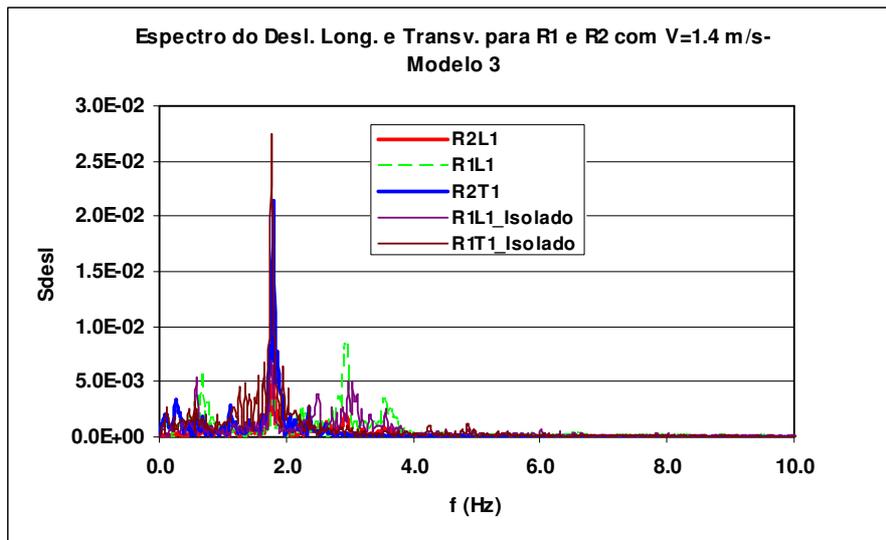


Figura 3.85- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser 2* e longitudinal dos *Risers 1* e *2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

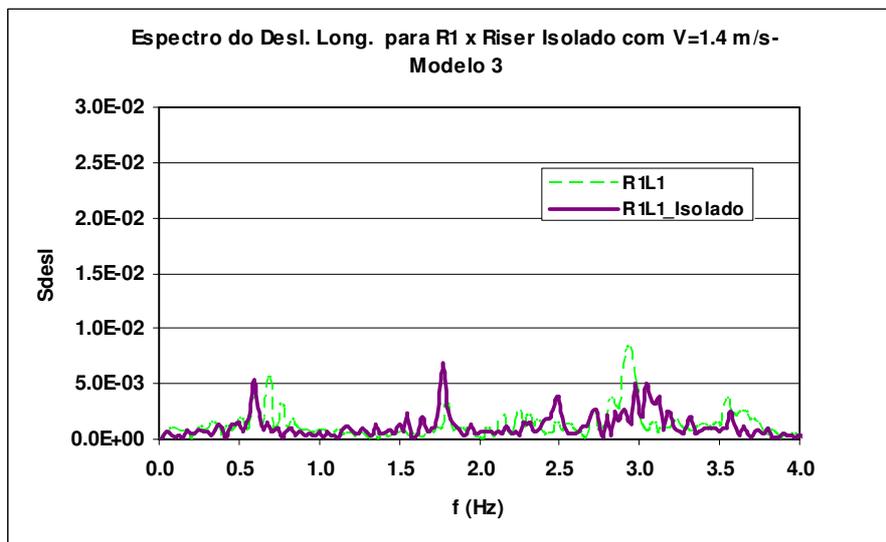


Figura 3.86- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser 1* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

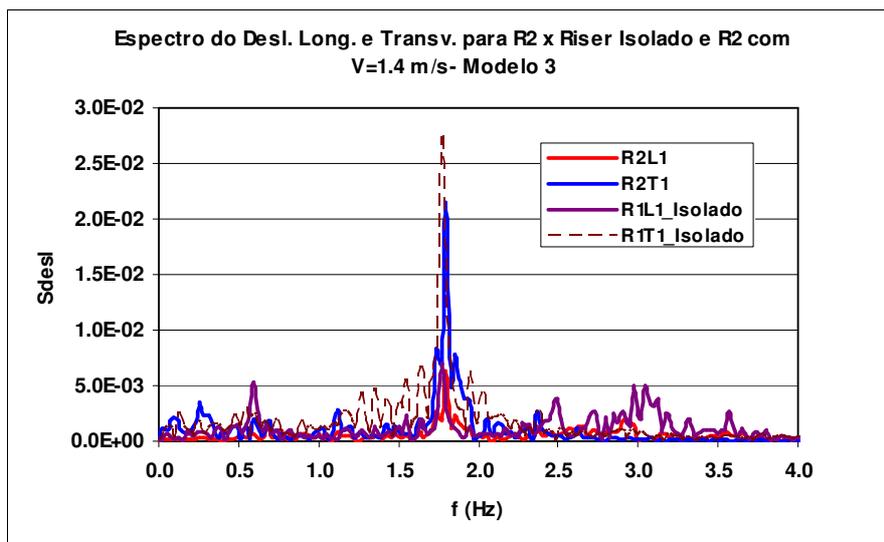


Figura 3.87- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- Há uma pequena variação no pico da frequência excitada na direção transversal do *riser 2*;
- Há uma redução da energia das vibrações na direção transversal para o *riser 2*;
- Na direção longitudinal para ambos os *risers*, a energia de excitação é reduzida e está distribuída em uma larga faixa de frequências.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.67, mostram que o *riser 2* foi excitado com maior amplitude na direção transversal.

Tabela 3.67- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.3606	0.1842		
L2	0.3573	0.1787		
L3	N.D	N.D		
L4	N.D	N.D		
T1				0.5096
T2				0.4937
T3				0.4158

A Figura 3.88 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o riser 2, aproximando-se a trajetória de uma figura achatada. Este tipo de trajetória é encontrado na literatura e denominado de banana-shaped [27].

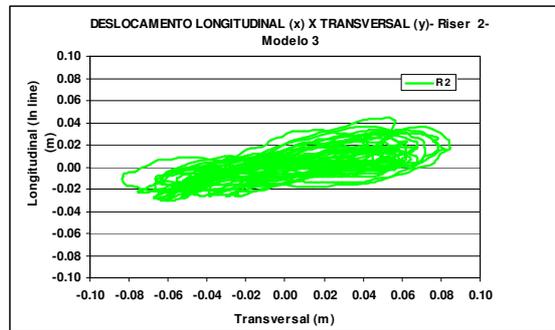


Figura 3.88- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Riser 2 do Modelo 3- Velocidade de 1.4 m/s.

3.4.2.3.2.1.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.68 apresenta estes resultados.

Tabela 3.68- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.47 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	154.063	57.536	162.002	118.350
Médio	52.265	20.579	-2.872	-0.029
Desvio Padrão	33.540	9.943	80.857	59.195
Mínimo	-34.241	-12.938	-161.271	-121.158

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.69:

Tabela 3.69- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.7 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.103	0.434

Ao compararmos os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.4.2 apresentado anteriormente, pode-se verificar que há um efeito de sombra sobre o riser de jusante ainda expressivo, não tanto como para o caso de espaçamento igual a 2D. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela

interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (F_x) e transversais (F_y) para ambos os *risers*.

3.4.2.3.2.2 Velocidade de 1.5 m/s

A Figura 3.89 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

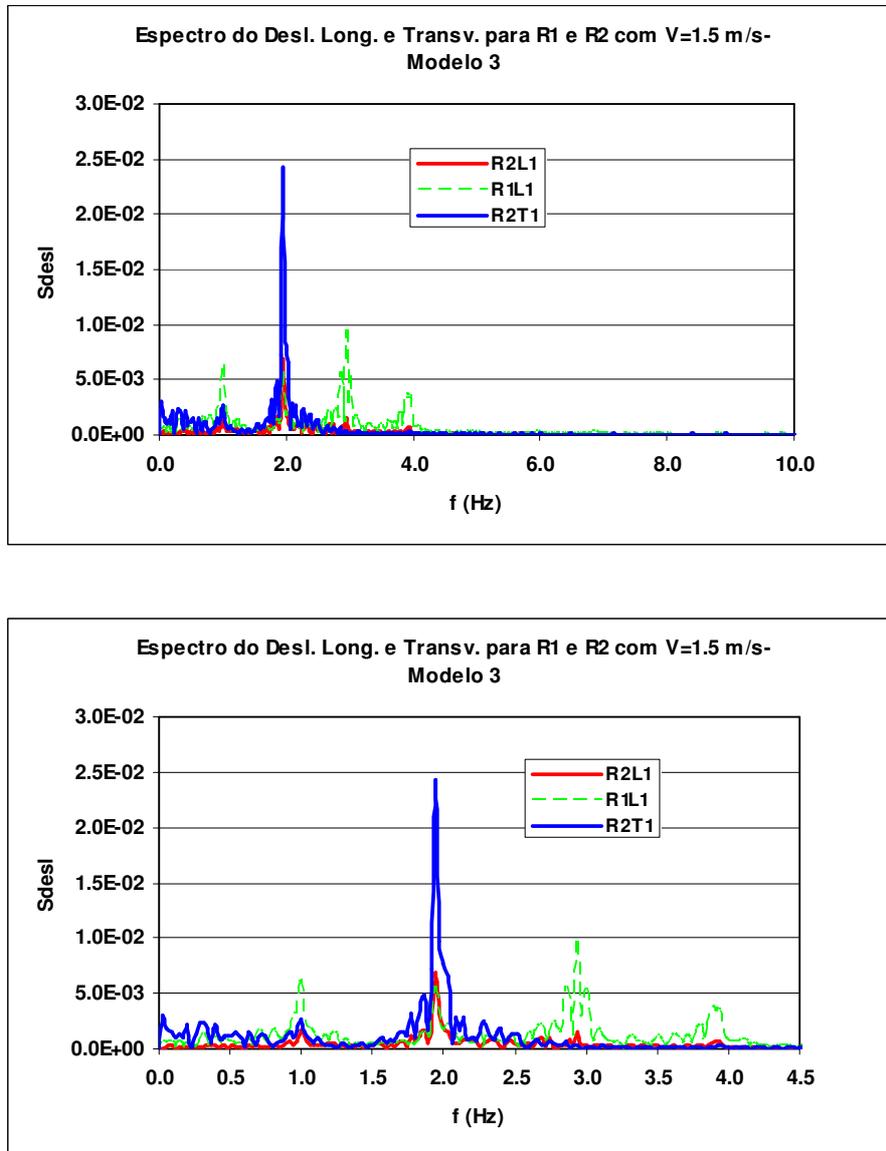


Figura 3.89- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe nas Faixas de Frequência de 0 a 4.5 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.95 Hz na direção transversal do *riser 2*, nesta mesma frequência houve uma pequena parcela de energia de excitação na direção longitudinal para ambos os *risers*. Já na direção longitudinal o *riser 1* foi excitado em uma larga faixa de frequências, compreendida entre 0.5 a 4.5 Hz (Curva verde tracejada), sendo a energia de excitação maior que na direção longitudinal do *riser 2*. Contudo, inferior à energia de excitação na direção transversal do *riser 2*. É importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para este mesmo espaçamento, isto é, 3D com velocidade 1.4 m/s.

A Figura 3.90 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.91 e 3.92 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

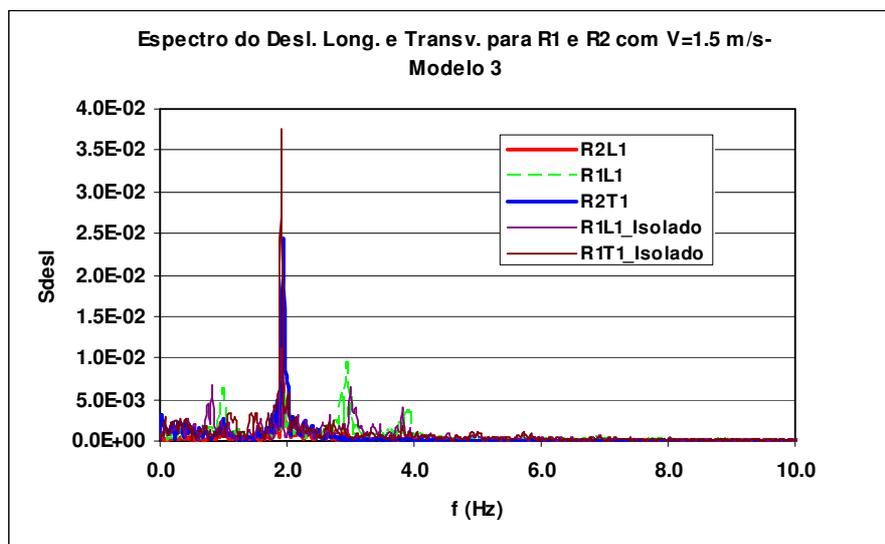


Figura 3.90- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser 2* e longitudinal dos *Risers 1* e *2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

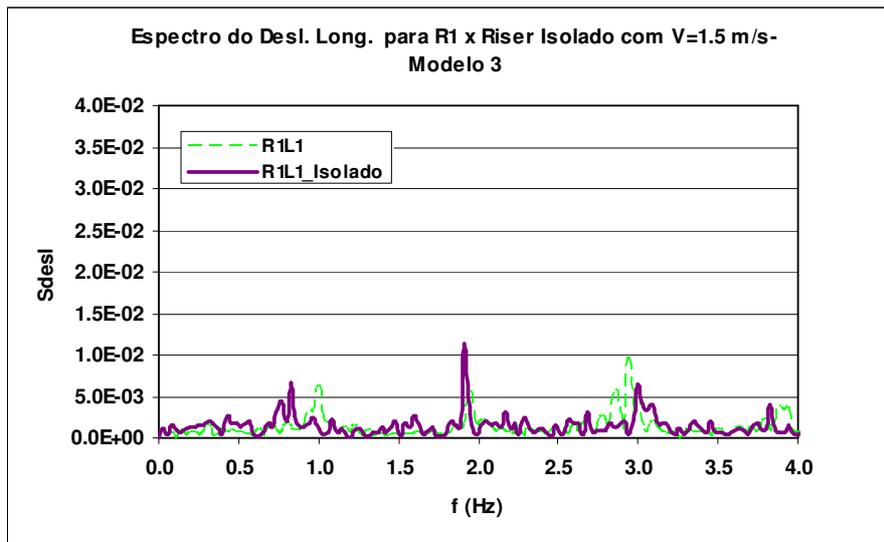


Figura 3.91- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser* 1 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

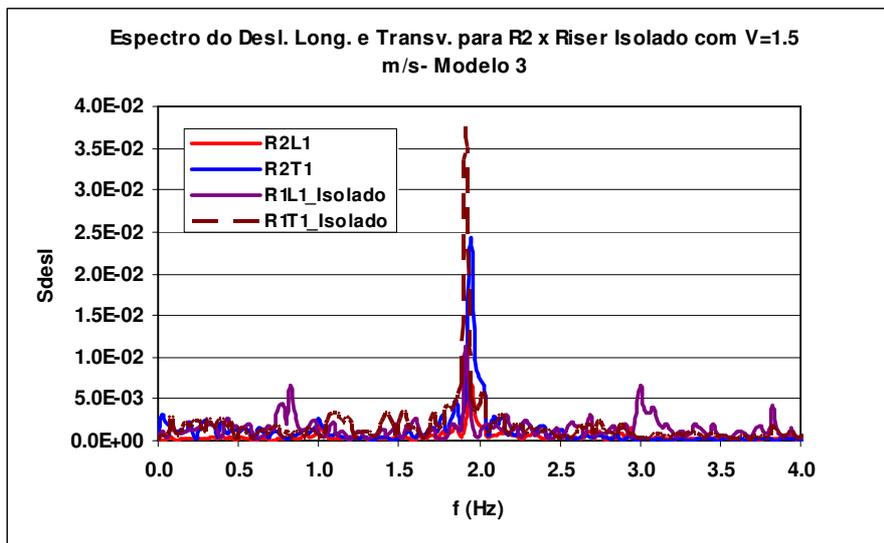


Figura 3.92- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser* 2 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- Há uma pequena variação no pico das frequências excitadas na direção transversal para o *riser* 2;
- Há uma redução da energia de vibrações na direção transversal do *riser* 2;
- A energia de excitação na direção longitudinal é reduzida e distribuída em uma larga faixa de frequências para ambos os *risers*.

- É importante salientar, que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para o mesmo espaçamento, isto é , 3D com velocidade 1.4 m/s.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.70, mostram que o *riser 2* foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela 3.70- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.377	0.177		
L2	0.373	0.171		
L3	N.D	N.D		
L4	N.D	N.D		
T1				0.561
T2				0.542
T3				0.457

A Figura 3.93 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser 2*, aproximando-se a trajetória da forma achatada. Este tipo de trajetória é encontrado na literarura e denominado de banana-shaped [27].

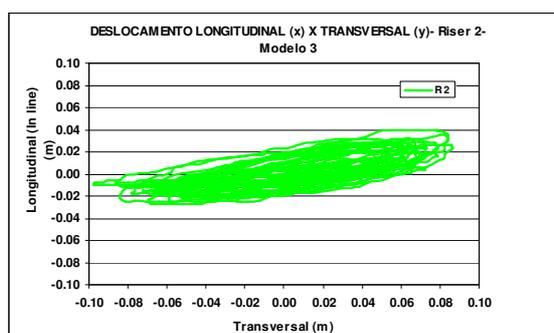


Figura 3.93- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Riser 2 do Modelo 3- Velocidade de 1.5 m/s.

3.4.2.3.2.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.71, apresenta estes resultados.

Tabela 3.71- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.57 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	188.451	48.046	180.385	135.270
Médio	66.209	20.082	-1.320	0.254
Desvio Padrão	37.058	8.287	104.572	67.497
Mínimo	-31.496	-7.456	-198.194	-128.058

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.72:

Tabela 3.72- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.57 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.217	0.369

Ao compararmos os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.5.2 apresentado anteriormente, pode-se verificar que há um efeito de sombra sobre o riser de jusante ainda expressivo, não tanto como para o caso de espaçamento igual a 2D. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (F_x) e transversais (F_y) para ambos os *risers*.

3.4.2.3.2.3 Velocidade de 1.6 m/s

A Figura 3.94 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

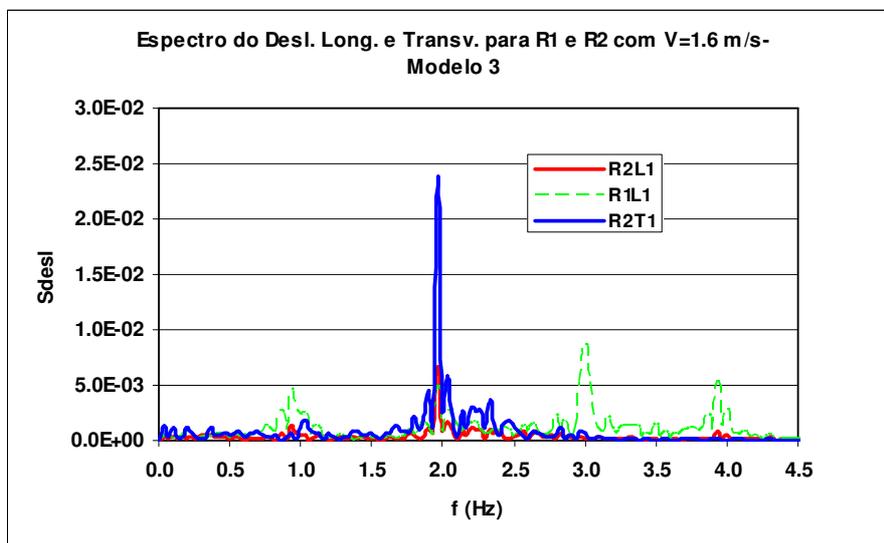
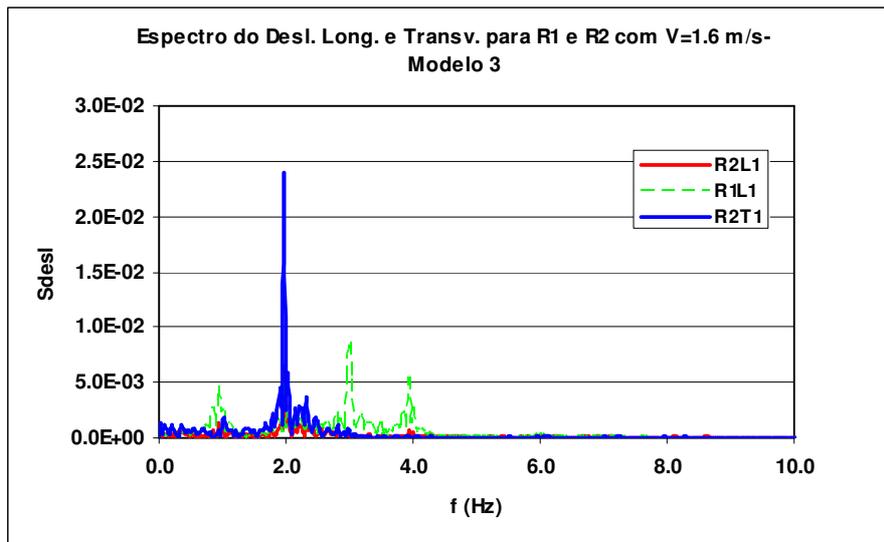


Figura 3.94- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz, para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal dos *risers* 1 e 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.97 Hz na direção transversal do *riser* 2, nesta mesma frequência houve uma pequena parcela de energia de excitação na direção longitudinal para ambos os *risers*. Já o *riser* 1 na direção longitudinal foi excitado em uma larga faixa de frequências, compreendida entre 0.5 a 3.5 Hz (Curva verde tracejada- R1L1). Sendo a energia de excitação maior na direção longitudinal do *riser* 1 do que na direção longitudinal do *riser* 2; contudo bem inferior à energia de excitação na direção transversal do *riser* 2. É importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para o mesmo espaçamento, isto é, 3D com as velocidades 1.4 e 1.5 m/s.

A Figura 3.95 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.96 e 3.97 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

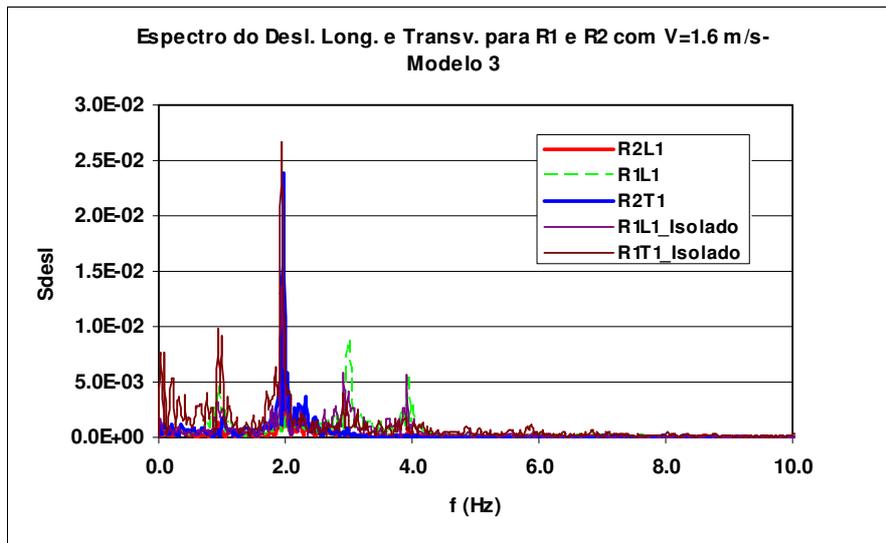


Figura 3.95- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser* 2 e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

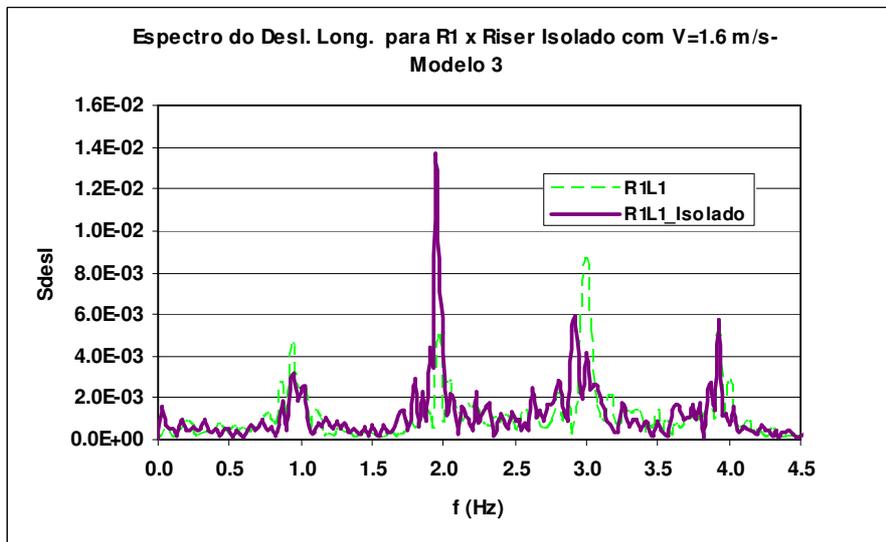


Figura 3.96- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser* 1 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

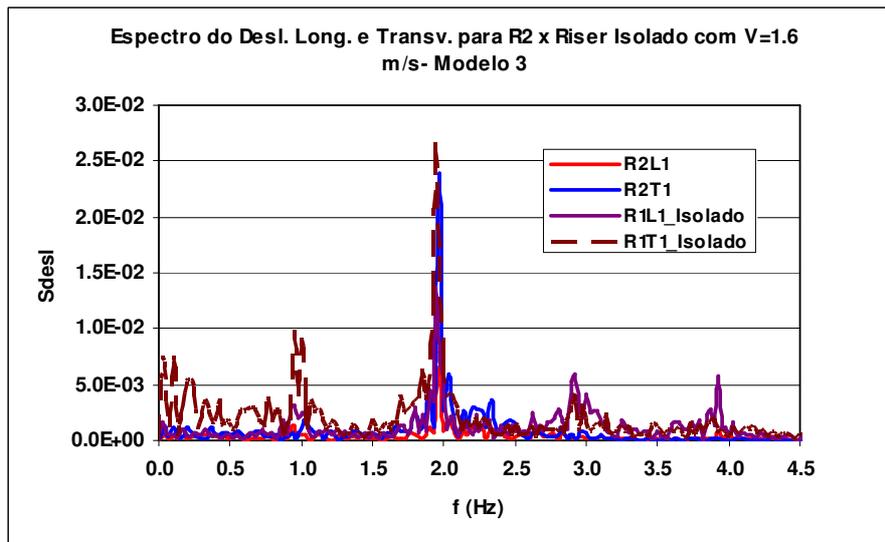


Figura 3.97- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma redução da energia de excitação do *riser 2* na direção transversal;
- a energia das vibrações na direção longitudinal é reduzida;
- é importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para o mesmo espaçamento, isto é, 3D com velocidades de 1.4 e 1.5 m/s.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.73, mostram que o *riser 2* foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela 3.73- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.3326	0.1477		
L2	0.3296	0.1464		
L3				
L4				
T1				0.4797
T2				0.4633
T3				0.3930

A Figura 3.98 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o riser 2. Quanto à trajetória do deslocamento do riser 2 é achatada, aproximando-se da forma conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

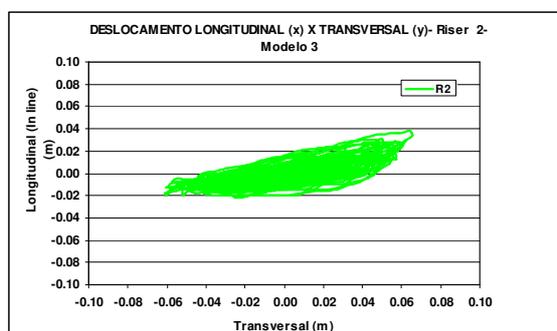


Figura 3.98- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Riser 2 do Modelo 3- Velocidade = 1.6 m/s.

3.4.2.3.2.3.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.74, apresenta estes resultados.

Tabela 3.74- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.67 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	204.843	57.745	228.683	149.064
Médio	72.626	24.666	11.442	1.587
Desvio Padrão	43.475	8.710	108.753	63.080
Mínimo	-24.183	-1.887	-180.536	-126.306

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.75:

Tabela 3.75- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.7 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.173	0.398

Ao compararmos os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.6.2 apresentado anteriormente, pode-se verificar que há um efeito de sombra sobre o riser de jusante ainda expressivo, não tanto como para o caso de espaçamento igual a 2D. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela

interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (F_x) e transversais (F_y) para ambos os *risers*.

3.4.2.3.2.4 Velocidade de 1.7 m/s

A Figura 3.99 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

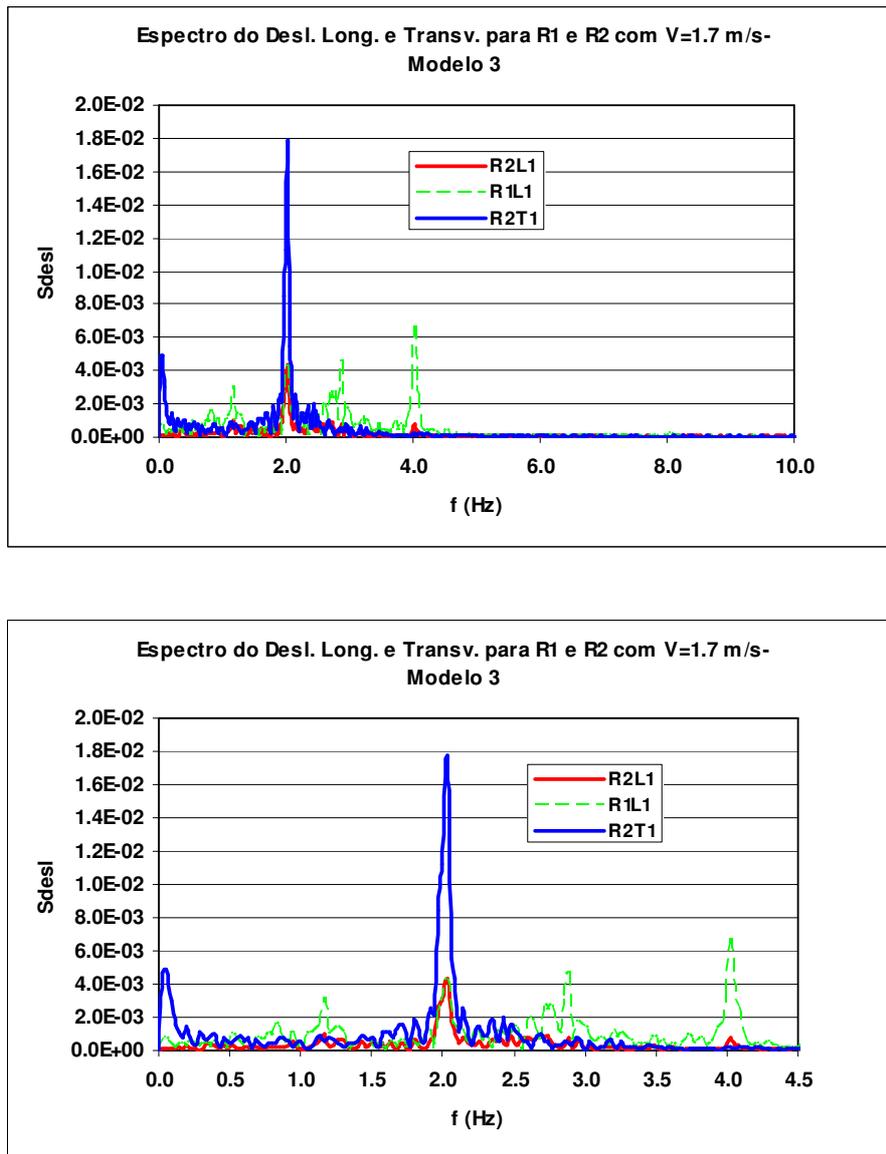


Figura 3.99- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4.5 Hz, para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal para o *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2 Hz na direção transversal do *riser 2*, nesta mesma frequência houve uma pequena parcela de energia de excitação na direção longitudinal para ambos os *risers*. Já na direção longitudinal do *riser 1*, foram excitados harmônicos em faixas de frequências de 2.7 a 3.5Hz e 3.8 a 4.2Hz (Curva verde tracejada); sendo a energia de excitação maior que na direção longitudinal do *riser 2*, contudo bem inferior à energia de excitação de do *riser 2* na direção transversal. É importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para o mesmo espaçamento, isto é, 3D com as velocidades 1.4, 1.5 e 1.6 m/s.

A Figura 3.100 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.101 e 3.102 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

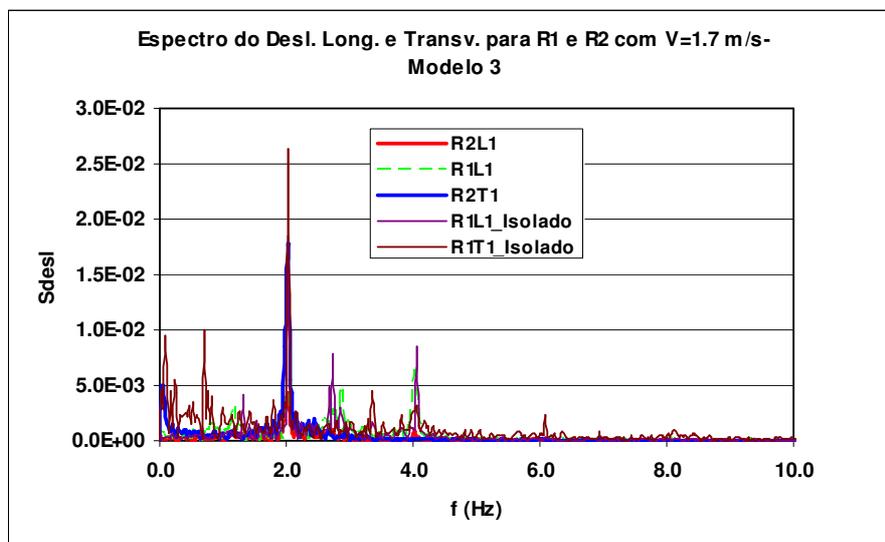


Figura 3.100- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser 2* e longitudinal dos *Risers 1* e *2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

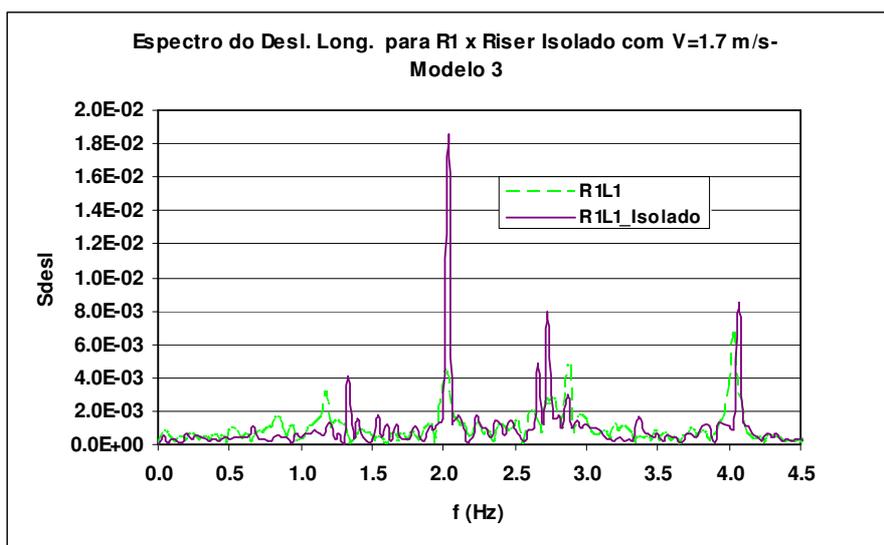


Figura 3.101- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser* 1 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

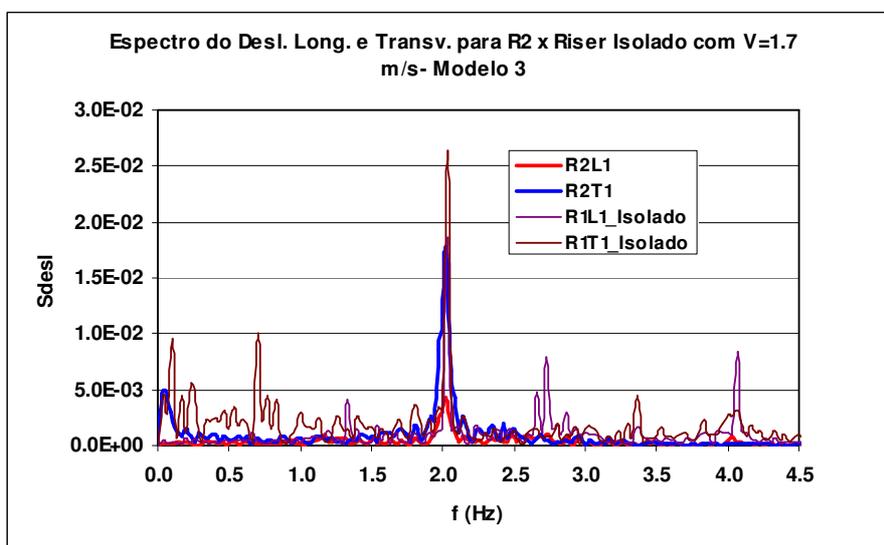


Figura 3.102- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser* 2 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- em uma frequência em torno de 2 Hz, há uma redução da energia de excitação do *riser* 2 na direção transversal;
- a energia de excitação das vibrações na direção longitudinal para ambos os *risers* é reduzida e distribuída em uma larga faixa de frequências.
- é importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para o mesmo espaçamento, isto é, 3D com velocidade 1.4 e 1.5 m/s.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.76, mostram que o *riser 2* foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela 3.76- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.2904	0.1373		
L2	0.2874	0.1357		
L3				
L4				
T1				0.4675
T2				0.4571
T3				0.3944

A Figura 3.103 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser 2*. Quanto à trajetória do deslocamento obtida para o *riser 2* aproxima da figura conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

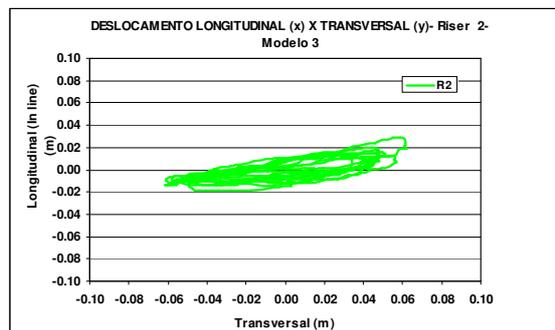


Figura 3.103- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser 2* do Modelo 3- Velocidade de 1.7 m/s.

3.4.2.3.2.4.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.77, apresenta estes resultados.

Tabela 3.77- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.78 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	234.973	69.576	254.910	137.016
Médio	82.842	26.547	9.080	1.652
Desvio Padrão	44.085	10.188	128.327	63.453
Mínimo	-7.799	0.393	-202.345	-124.218

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.78:

Tabela 3.78- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.78 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.185	0.380

Ao compararmos os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.7.2 apresentado anteriormente, pode-se verificar que há um efeito de sombra sobre o riser de jusante ainda expressivo, não tanto como para o caso de espaçamento igual a 2D. Também, pode-se observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (Fx) e transversais (Fy) para ambos os *risers*.

3.4.2.3.2.5 Velocidade de 1.8 m/s

A Figura 3.104 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

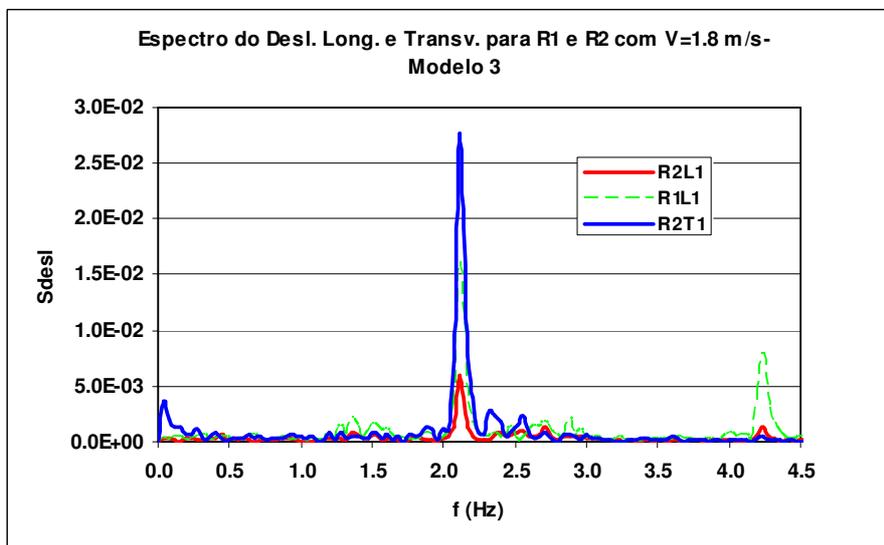
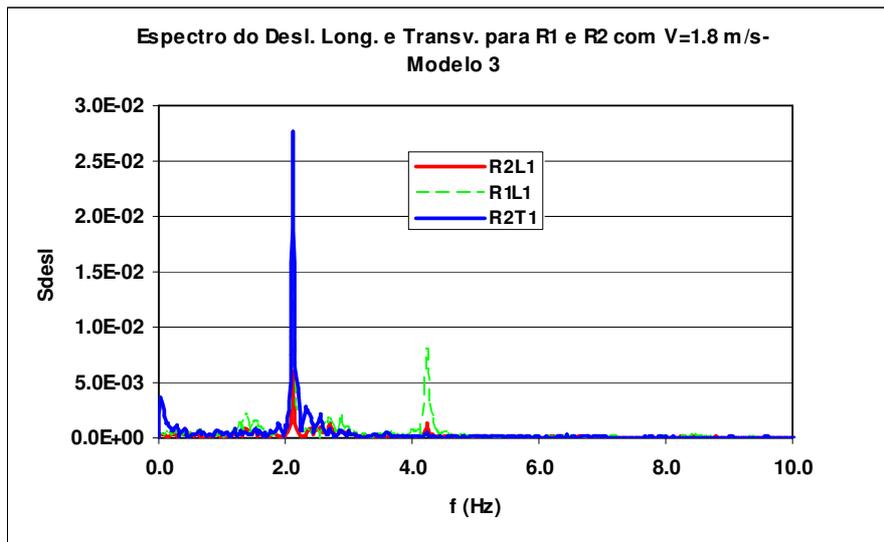


Figura 3.104- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhes nas Faixas de Frequência de 0 a 4.5, 1.5 a 3 Hz, para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.1Hz na direção transversal do *risers 2*, nesta mesma frequência houve uma pequena parcela de energia de excitação na direção longitudinal para ambos os *risers*; já na direção longitudinal, o *riser 1* foi excitado através de 1 harmônico com pico de 4.2Hz (Curva verde tracejada). É importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para o mesmo espaçamento, isto é, 3D com as velocidades 1.4, 1.5, 1.6 e 1.7 m/s.

A Figura 3.105 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.106 e 3.107 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5Hz.

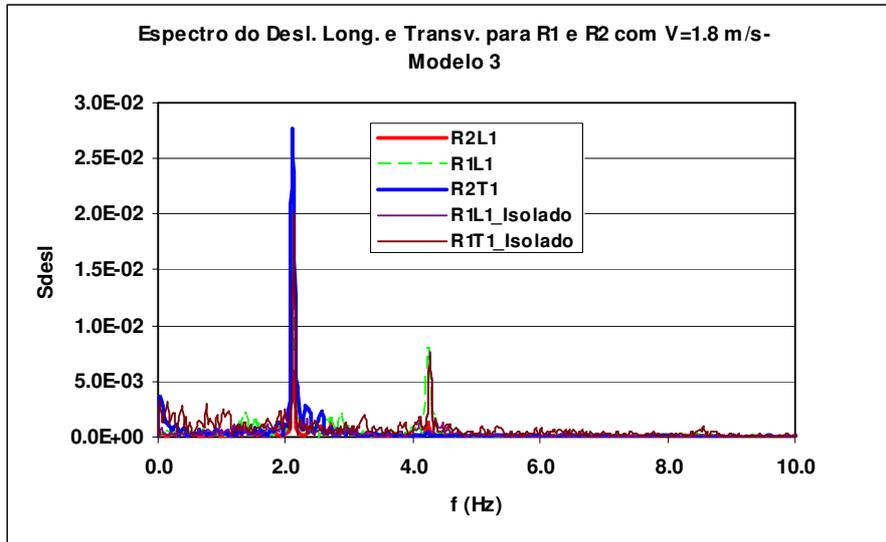


Figura 3.105- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal do *Riser 2* e longitudinal dos *Risers 1* e *2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

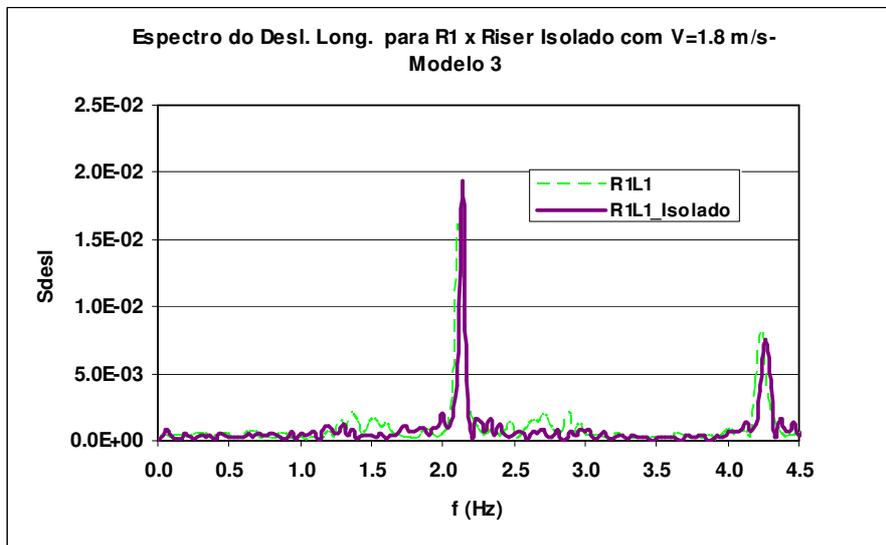


Figura 3.106- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinal do *Riser 1* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

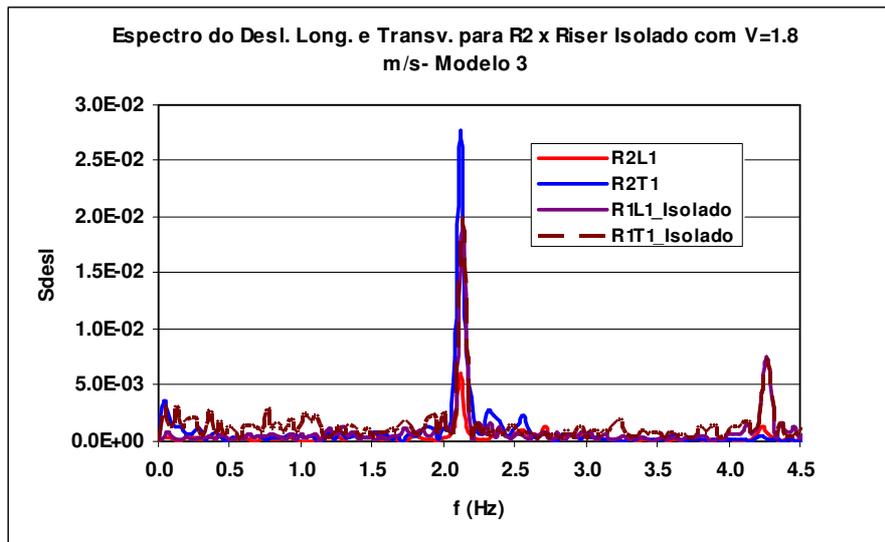


Figura 3.107- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há um aumento da energia de excitação do *riser 2* na direção transversal;
- a energia de excitação das vibrações na direção longitudinal para ambos os *risers* está bastante reduzida e distribuída em uma larga faixa de frequências;
- é importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e para o mesmo espaçamento, isto é, 3D com velocidade 1.4 e 1.5 m/s.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.79, mostram que o *riser 2* foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela 3.79- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.3668	0.1319		
L2	0.3600	0.1298		
L3				
L4				
T1				0.5451
T2				0.5275
T3				0.4487

A Figura 3.108 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser 2*. Quanto à trajetória do deslocamento obtida para o *riser 2* aproxima da figura conhecida na literatura como banana-shaped [27].

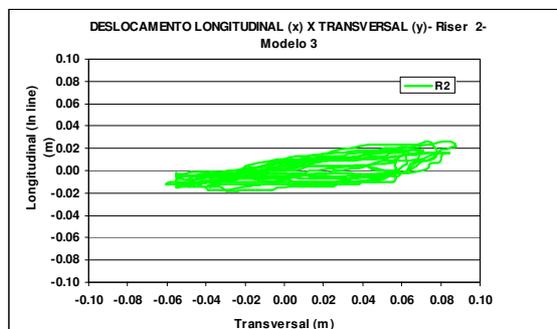


Figura 3.108- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser 2* do Modelo 3- Velocidade de 1.8 m/s.

3.4.2.3.2.5.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.80 apresenta estes resultados.

Tabela 3.80- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.88 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	249.320	66.071	261.557	137.887
Médio	94.447	27.375	9.706	1.818
Desvio Padrão	56.627	10.894	140.634	67.982
Mínimo	-11.090	-12.407	-216.990	-120.206

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.81:

Tabela 3.81- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.88 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.206	0.349

Ao compararmos os valores acima com o obtido para um riser isolado, ver Anexo C, pode-se verificar que há um efeito de sombra sobre o riser de jusante ainda expressivo, não tanto como para o caso de espaçamento igual a 2D. Também, pode-se

observar que as forças hidrodinâmicas geradas pela interação entre os risers irão afetar, também, as forças longitudinais (F_x) e transversais (F_y) para ambos os risers.

3.4.2.3.2.6 Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 3D

As Tabelas 3.82, 3.83 e 3.84, apresentam um resumo dos resultados das vibrações nas direções transversal e longitudinal para um *riser* isolado e compara com os resultados para os *risers* 1 e 2 espaçados de 3D para os modelos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 3.82- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 1.

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D) _i	(Ax/D) _i	(Ay/D) _{r1}	(Ax/D) _{r1}	(Ay/D) _{r2}	(Ax/D) _{r2}
0.2	1.94E+04	0.891	0.007	0.0173	N.D	N.D	N.D	N.D
0.4	3.88E+04	1.782	0.146	0.0177	N.D	0.041	0.049	0.04
0.6	5.81E+04	2.672	0.067	0.071	N.D	0.041	0.055	0.04
0.8	7.75E+04	3.563	0.104	0.118	N.D	0.132	0.124	0.049

Tabela 3.83- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 2.

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D) _i	(Ax/D) _i	(Ay/D) _{r1}	(Ax/D) _{r1}	(Ay/D) _{r2}	(Ax/D) _{r2}
0.8	7.75E+04	3.200	0.118	0.104	N.D	0.118	0.146	0.044
1	9.69E+04	4.000	0.33	0.191	N.D	0.2025	0.2294	0.0705
1.1	1.07E+05	4.400	0.477	0.33	N.D	0.323	0.2781	0.041

Tabela 3.84- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 3.

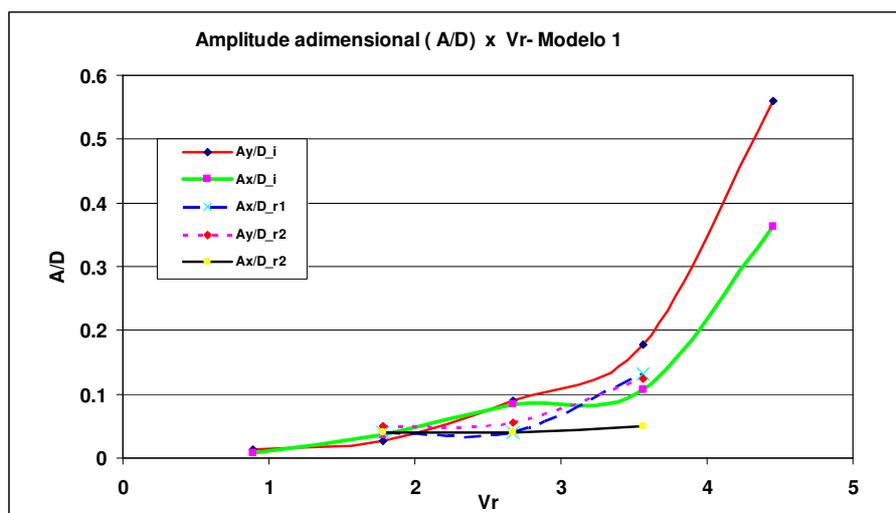
V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D) _i	(Ax/D) _i	(Ay/D) _{r1}	(Ax/D) _{r1}	(Ay/D) _{r2}	(Ax/D) _{r2}
0.4	4.19E+04	1.545	0.0485	0.0324	N.D	0.0402	0.0659	0.0782
0.6	6.28E+04	2.318	0.0356	0.1122	N.D	0.1096	0.0530	0.0503
0.8	8.37E+04	3.091	0.0951	0.1619	N.D	0.206	0.091	0.107
0.9	9.42E+04	3.863	0.2226	0.2279	N.D	N.D	N.D	N.D
1	1.05E+05	4.636	0.3371	0.3206	N.D	0.2454	0.3328	0.1174
1.1	1.15E+05	5.408	0.4287	0.3818	N.D	N.D	N.D	N.D
1.2	1.26E+05	5.795	0.4952	0.3673	N.D	0.4013	0.2404	0.1052
1.4	1.47E+05	6.181	0.7068	0.6264	N.D	0.3606	0.5096	0.1842
1.5	1.57E+05	6.567	0.7713	0.423	N.D	0.3770	0.561	0.1770
1.6	1.67E+05	6.954	0.8277	0.45	N.D	0.3326	0.4797	0.148
1.7	1.78E+05	1.545	0.6569	0.4364	N.D	0.2904	0.4675	0.1373
1.8	1.88E+05	2.318	0.4849	0.4174	N.D	0.3668	0.5451	0.1319

Notas:

- Frequência natural do modelo 1, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 1.85 Hz;
- Frequência natural do modelo 2, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 2.06 Hz;
- Frequência natural do modelo 3, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 2.31 Hz;
- A velocidade reduzida é expressa por: $V_R = \frac{V}{f_{NAT} \cdot D}$
- As frequências naturais da estrutura são iguais nas direções x e y.
- N.D: Não disponível.

3.4.2.3.2.6.1 Caracterização da Interação Hidrodinâmica para um Espaçamento de 3D

As Figuras 3.109, 3.110 e 3.111 apresentam uma comparação dos valores das amplitudes adimensionalizadas significativas das vibrações transversais e longitudinais de um *riser* isolado com 2 *risers* espaçados de 3D em função da velocidade reduzida, para os modelos 1, 2 e 3



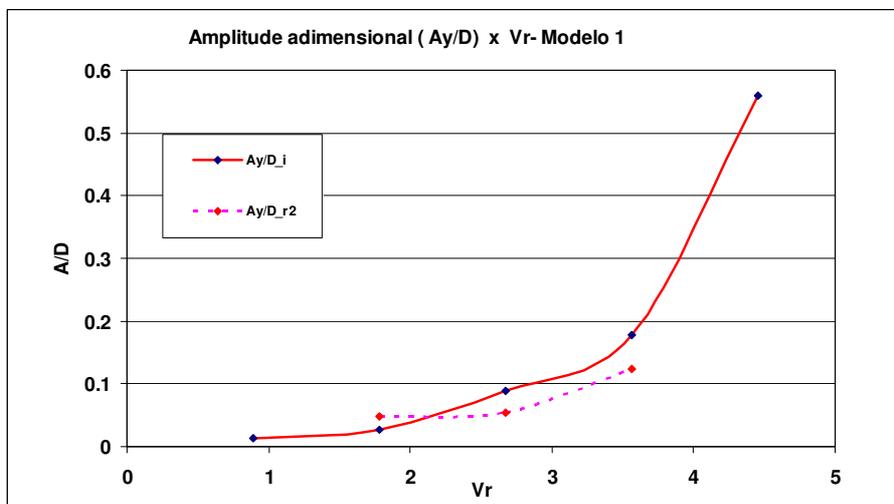
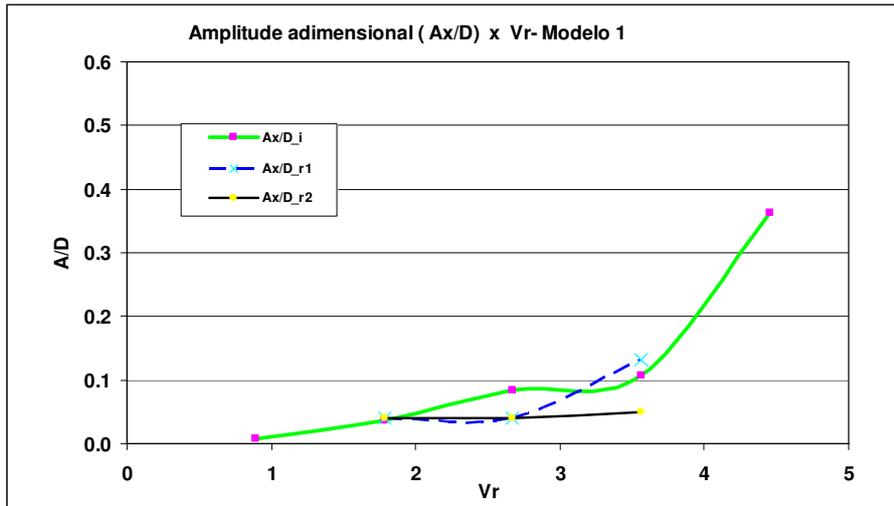
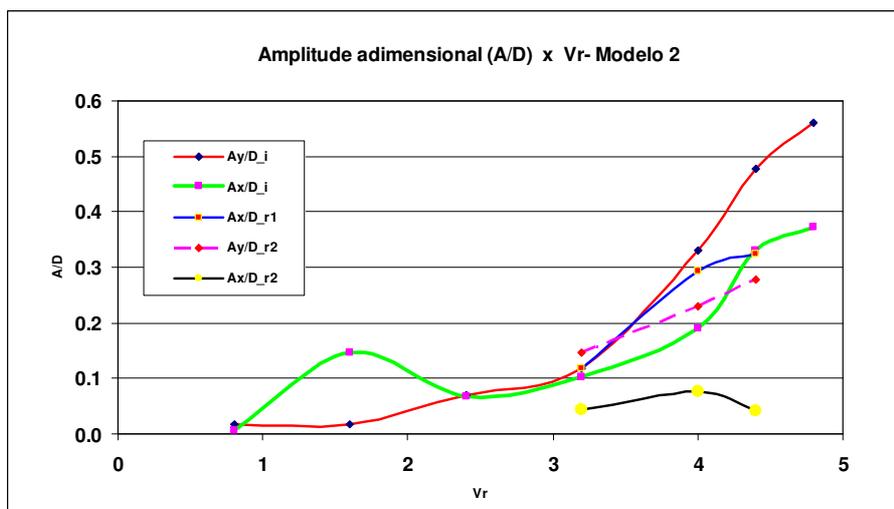


Figura 3.109– Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados com Espaçamento de 3D – Modelo 1.



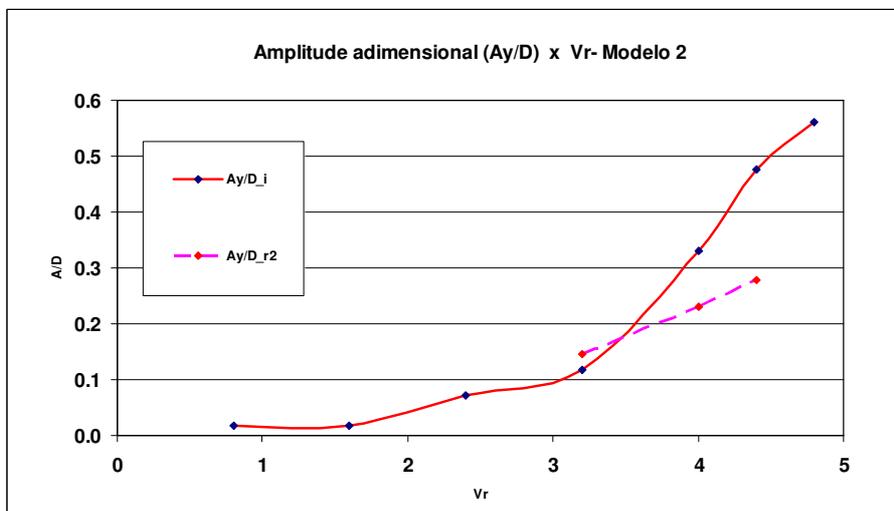
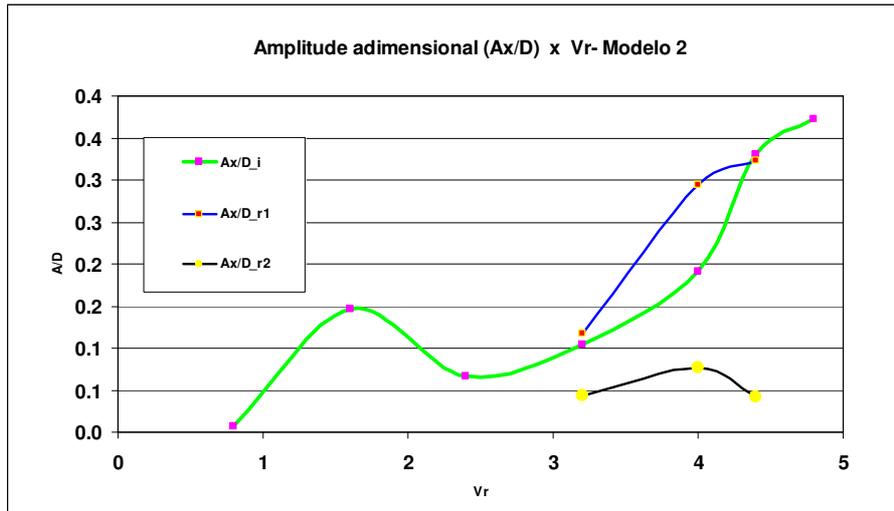
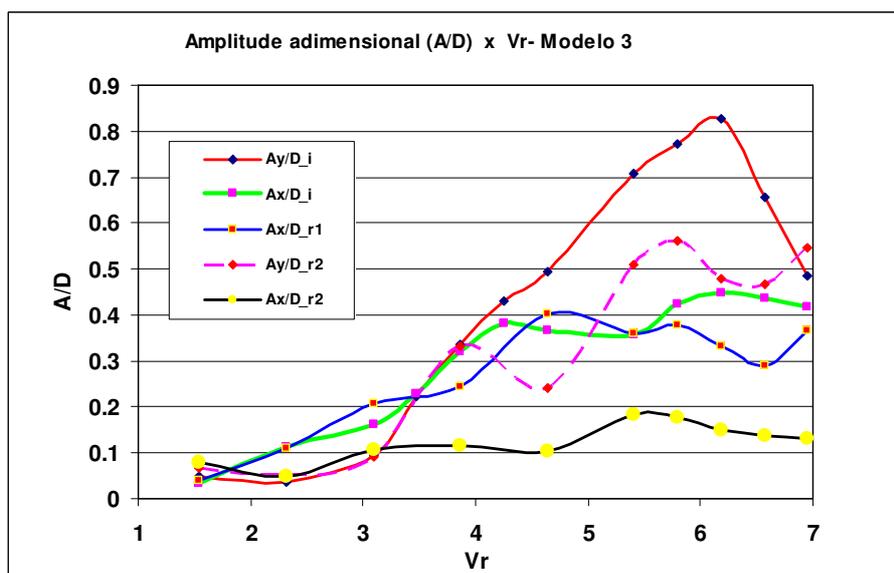


Figura 3.110 – Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados com Espaçamento de 3D – Modelo 2.



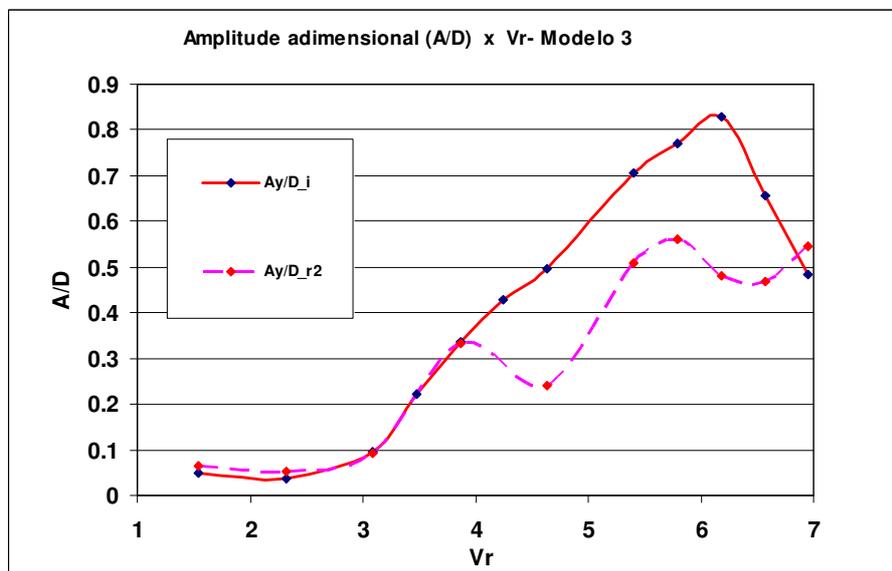
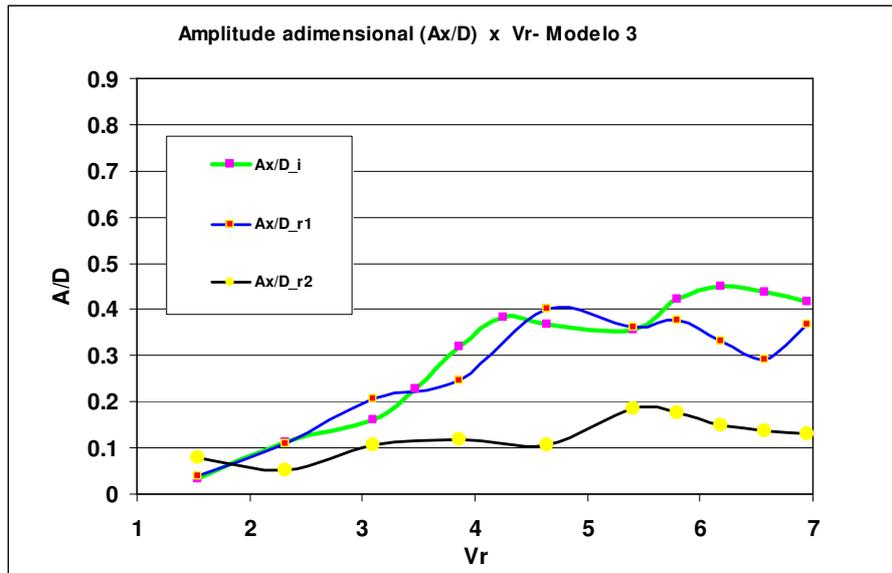


Figura 3.111 – Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados com Espaçamento de 3D – Modelo 3.

Analisando estes resultados, pode-se verificar que há uma redução na amplitude das vibrações longitudinais para valores elevados de velocidade reduzida para o *riser* de jusante, já o *riser* de montante apresenta um comportamento similar ao *riser* isolado.

Na direção transversal, não há resultados de vibrações para o *riser* de montante. Quanto ao *riser* de jusante, pode-se observar que há uma redução das vibrações. É importante salientar que comportamento hidrodinâmico similar foi, também, observado para um espaçamento de 2D.

As Figuras 3.112 e 3.113 apresentam uma comparação dos valores das variações das forças hidrodinâmicas transversais (direção y- sustentação) e longitudinais (direção x- arrasto) de um *riser* isolado com 2 *risers* espaçados de 3D em função do número de Reynolds, para o modelo 3. Estes resultados foram obtidos com as células de carga mostradas na Figura 3.11.

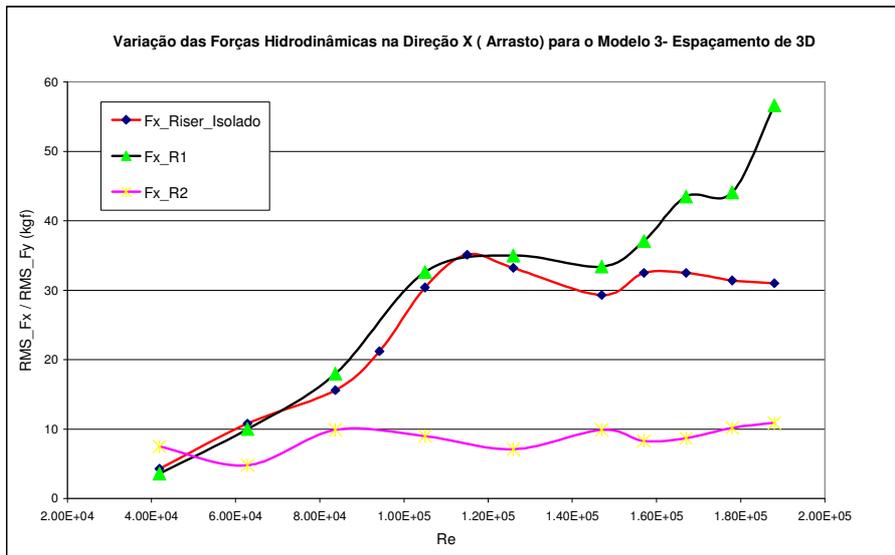


Figura 3.112 – Comparação do Gráfico de RMS_Fx x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 3D para Modelo 3.

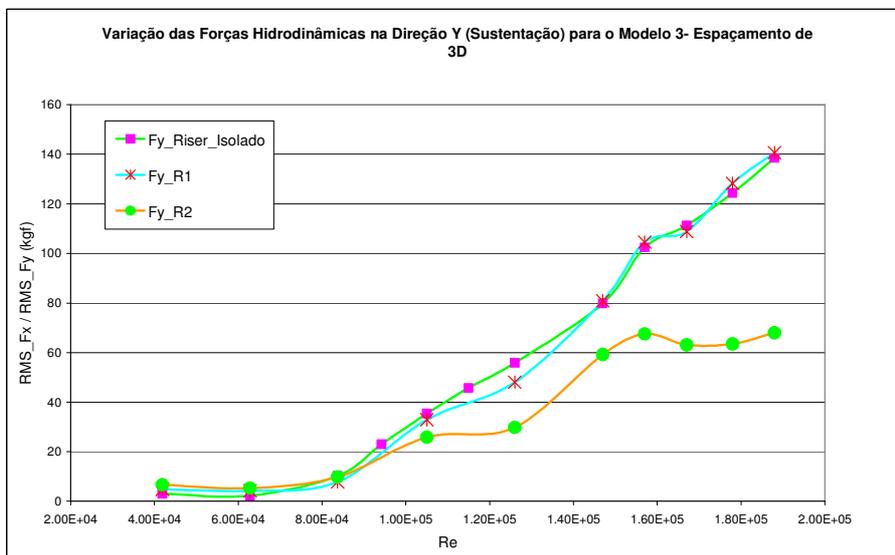


Figura 3.113 – Comparação do Gráfico de RMS_Fy x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 3D para Modelo 3.

Analisando estes resultados, pode-se verificar que há uma redução na variação das forças hidrodinâmicas longitudinais para valores elevados do número de Reynolds

para o riser de jusante, já o riser de montante apresenta um comportamento similar ao riser isolado. Este resultado ratifica o que foi observado para as vibrações longitudinais.

Na direção transversal, a variação das forças hidrodinâmicas para o riser de montante, mostra que este apresenta um comportamento similar ao riser isolado. Quanto ao riser de jusante, pode-se observar que a variação da força transversal apresenta uma redução, ratificando o resultado obtido para as vibrações.

3.4.2.3.2.6.2 Comparação com Resultados Encontrados na Literatura

Para este arranjo, assim como para um espaçamento igual a 2D, também, há os resultados obtidos pela Shell e mencionados na referência [11]. A Tabela 3.85 apresenta um resumo das vibrações transversais obtidas no ensaio em referência, e as Figuras 3.114, 3.115 e 3.116 mostram uma comparação com os resultados obtidos no NMRI.

Tabela 3.85- Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas Estudadas pela Shell, ver referência [11].

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_r1	(Ay/D)_r2
0.76	2.49E+00	2.812	0.1316	0.1316
0.83	2.73E+00	3.089	0.2467	0.1973
0.92	3.00E+00	3.394	0.4604	0.3947
0.98	3.20E+00	3.615	0.5098	0.4111
1.04	3.40E+00	3.837	0.4933	0.2960
1.09	3.59E+00	4.059	1.0360	0.6578
1.16	3.80E+00	4.294	1.1018	0.8222
1.22	4.01E+00	4.530	1.1018	0.8222
1.28	4.20E+00	4.751	1.1018	0.9044
1.35	4.43E+00	5.001	1.1018	0.9538
1.40	4.60E+00	5.194	1.0195	0.9373
1.47	4.82E+00	5.444	0.9702	0.8716
1.52	4.99E+00	5.638	0.8716	1.0524
1.58	5.20E+00	5.873	0.8551	1.0524
1.64	5.38E+00	6.081	0.8222	1.0689
1.71	5.61E+00	6.344	0.7893	1.0853
1.77	5.80E+00	6.552	0.7893	1.1018
1.83	6.02E+00	6.801	0.7893	1.0853
1.89	6.22E+00	7.023	0.8058	1.0689
1.95	6.41E+00	7.245	0.8222	1.0524
2.01	6.61E+00	7.466	0.6907	0.9538
2.07	6.80E+00	7.688	0.6907	0.9373
2.13	7.00E+00	7.909	0.6249	0.8222

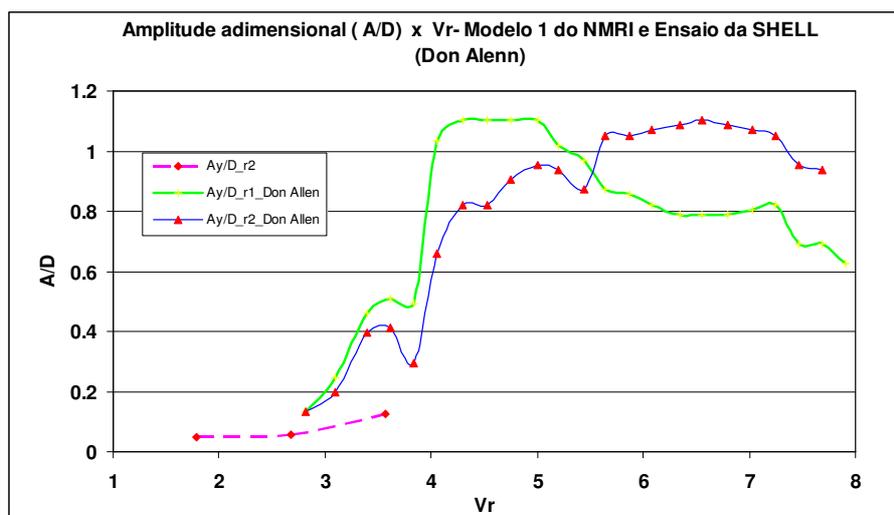


Figura 3.114- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 1 com os Apresentados na Referência [11].

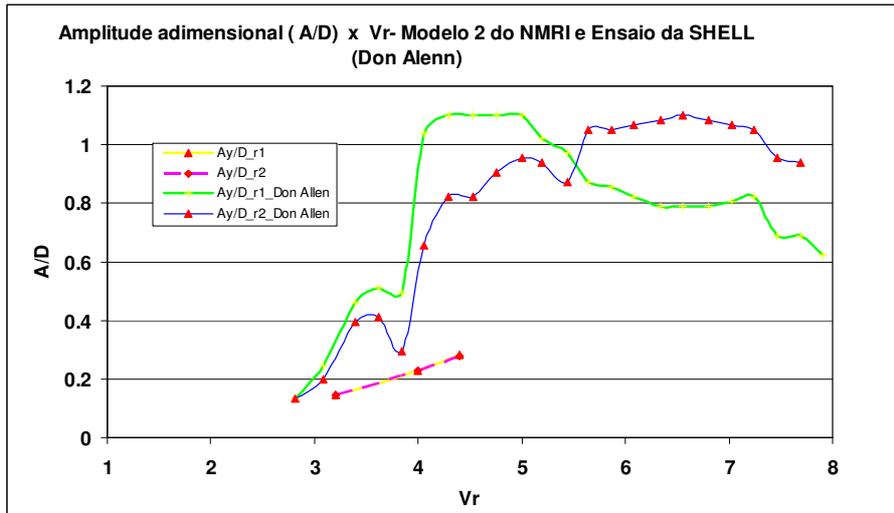


Figura 3.115- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 2 com os Apresentados na Referência [11].

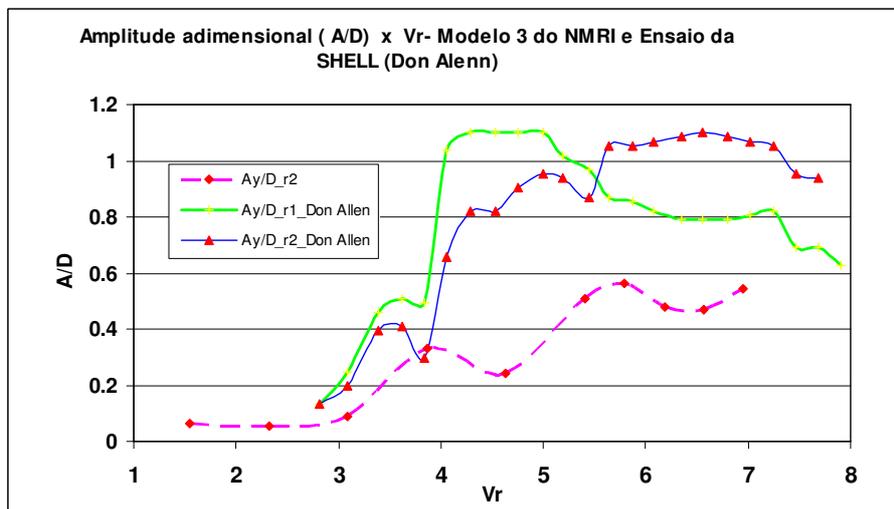


Figura 3.116- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para os Modelo 3 com os Apresentados na Referência [11].

A partir das Figuras 3.114, 3.115 e 3.116, e assim como observado para um espaçamento de 2D, pode-se verificar que os resultados de amplitude de vibração transversal para o *riser* de jusante obtidos estão coerentes somente para valores baixos de velocidade reduzida; para valores de velocidade reduzida a partir de 4, há um aumento súbito das amplitudes adimensionalizadas nos ensaios conduzidos pela Shell. Assim como para o arranjo espaçado de 2D, os resultados dos ensaios conduzidos no NMRI ajustaram-se bem aos apresentados na referência [21], como apresentado a seguir, e não há maiores informações sobre os ensaios na referência [11] que permita um melhor entendimento das diferenças observadas para valores elevados de velocidade reduzida. É importante salientar que na referência mencionada foram apresentados somente os valores de Ay/D .

Complementando as comparações dos resultados obtidos nos estudos do NMRI com os disponíveis na literatura, têm-se os resultados apresentados na referência [21], que apresenta os resultados de ensaios conduzidos pelo programa intitulado *Norwegian Deepwater Programme* (NDP). As Figuras 3.117 e 3.118 mostram, respectivamente, as comparações das amplitudes adimensionais versus velocidade reduzida nas direções longitudinal e transversal.

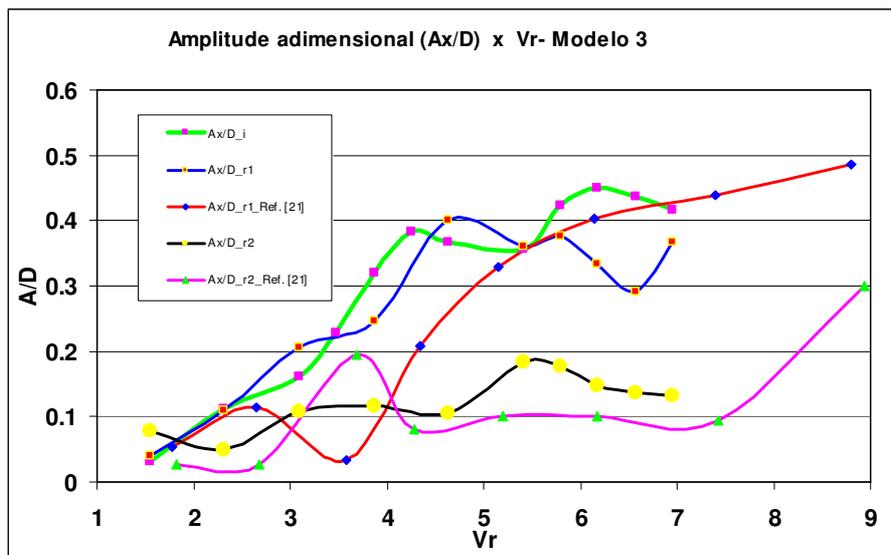


Figura 3.117- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Longitudinal x Velocidade Reduzida.

A partir da Figura 3.117, pode-se observar que os resultados estão coerentes e apresentam uma mesma tendência, como salientado a seguir:

- o comportamento hidrodinâmico do *riser* 1(montante) apresenta maiores amplitudes de vibração longitudinal do que o *riser* 2 (jusante), em ambos os estudos;
- para o modelo ensaiado no NMRI, o *riser* 1 (montante), apresenta comportamento similar ao riser isolado para toda faixa de velocidade reduzida , já o modelo da referência [21] apresenta uma redução da amplitude para baixos valores de velocidade reduzida, como uma tendência a igualar com o que foi obtido nos estudos do NMRI para valores elevados de velocidade reduzida;
- a resposta do *riser* 2 (jusante) apresenta uma redução expressiva da amplitude de vibração na direção longitudinal quando comparada a do

riser isolado. Esta tendência ficou clara em ambos os estudos, sendo uma importante conclusão para o estudo da interferência;

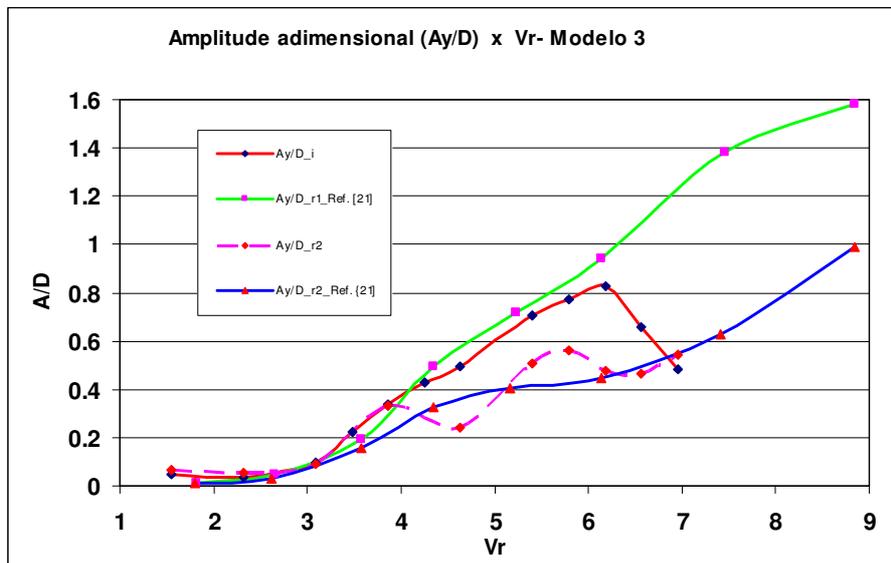


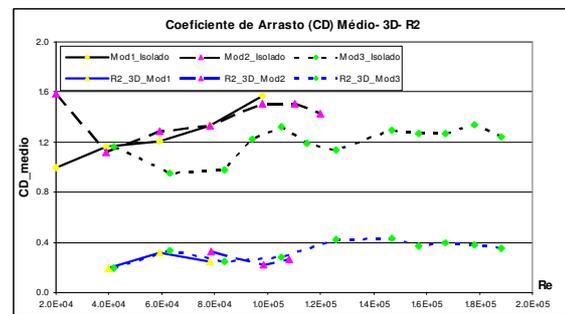
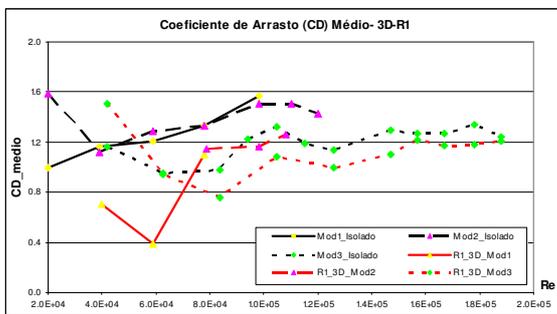
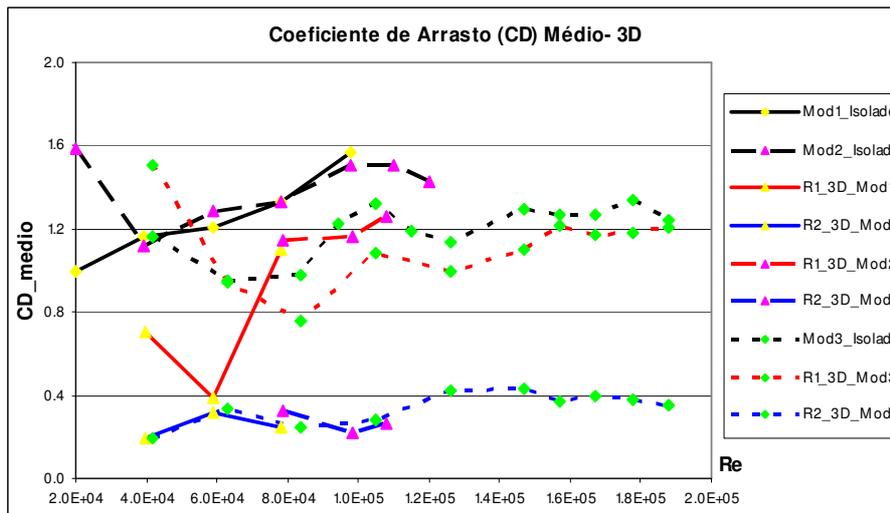
Figura 3.118- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI e os obtidos na Referência [21]. Amplitude Adimensional Transversal x Velocidade Reduzida.

A partir da Figura 3.118, pode-se observar que os resultados estão coerentes e apresentam resultados próximos e com uma mesma tendência, como salientado a seguir:

- o comportamento hidrodinâmico do *riser* 1 nos ensaios apresentados na referência [21], mostram que este se aproxima do *riser* isolado. Esta mesma tendência foi observada para um espaçamento de 2D;
- a resposta do *riser* 2 (jusante) apresenta uma redução da amplitude de vibração na direção transversal quando comparada a do *riser* isolado. Esta tendência ficou clara em ambos os estudos, sendo uma importante constatação para o estudo da interferência.

3.4.2.3.2.6.3 Variação do Coeficiente de Arrasto Médio

A partir das forças hidrodinâmicas longitudinais medidas, podem-se obter o coeficiente de arrasto médio. A Figura 3.119 apresenta a comparação das variações deste coeficiente hidrodinâmico entre um *riser* isolado e 2 *risers* alinhados e espaçados de 3D, em função do número de Reynolds.



3.119 - Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um Riser Isolado (Modelo 1, 2 e 3) e para 2 Risers Alinhados e Espaçados de 3D (Modelo 1, 2 e 3).

Comparando-se com os resultados obtidos pela Shell, e mencionados na referência [11], têm-se os resultados mostrados na Figura 3.120.

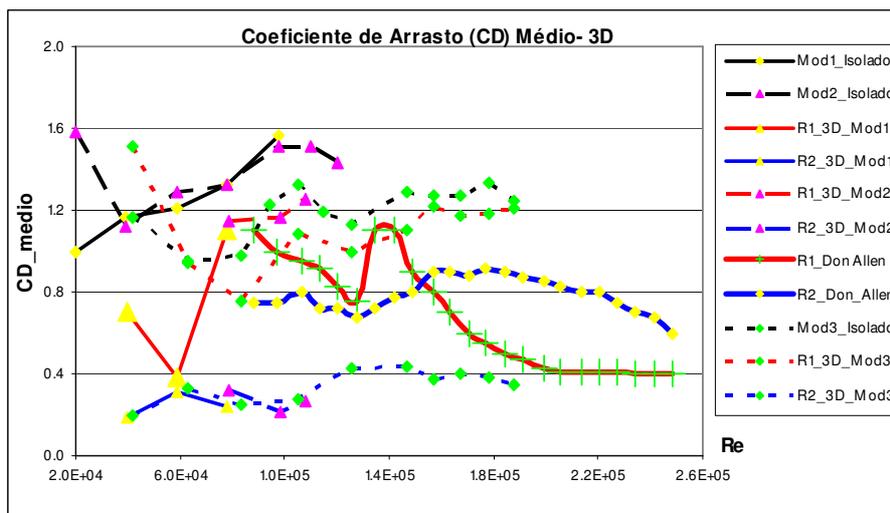


Figura 3.120- Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para para 2 Risers Alinhados e Espaçados de 3D (Modelo 1, 2 e 3) ensaiados no NMRI e os Valores Apresentados na Referência [11].

A partir da observação dos resultados, pode-se verificar a existência do efeito de sombra, ratificando os resultados obtidos para um espaçamento de 2D. Também, pode-se observar que o efeito de sombra é mais acentuado para menores valores do número de Reynolds.

3.4.2.3.2.6.4 Verificação da Interferência

Conforme mencionado, foram registradas as séries temporais dos deslocamentos longitudinais nos pontos R1L1 e R2L1, ver Figura 3.14 apresentada anteriormente, o que nos permite avaliar as deflexões dos modelos, e concluirmos se houve ou não colisão entre eles.

A seguir, estão apresentadas as séries temporais de deslocamentos para as velocidades de 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8 m/s nos pontos R1L1 e R2L1. E uma avaliação se há ou não interferência entre os risers.

As Figuras 3.121 a 3.125 apresentam as séries temporais dos deslocamentos para uma velocidade de 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8 m/s. Associado a estas figuras, há uma figura que mostra ao longo da série temporal se houve ou não colisão; se não houver será zero e se houver será igual a 1 e será indicado o tempo em que ocorreu a colisão.

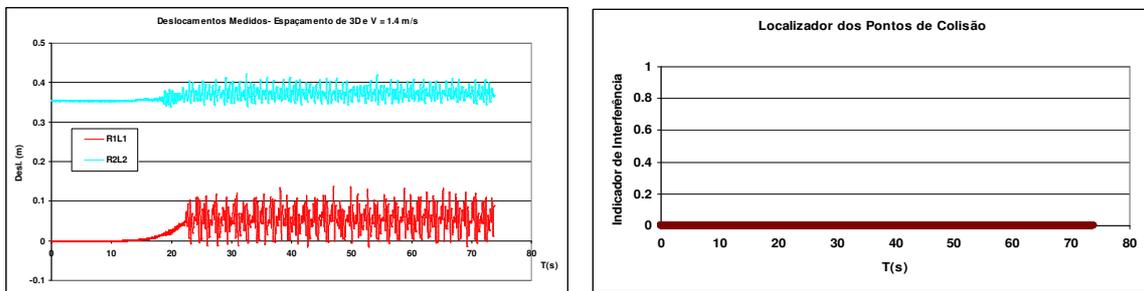


Figura 3.121- Série temporal de deslocamentos para $V = 1.4$ m/s e indicação se há colisão.

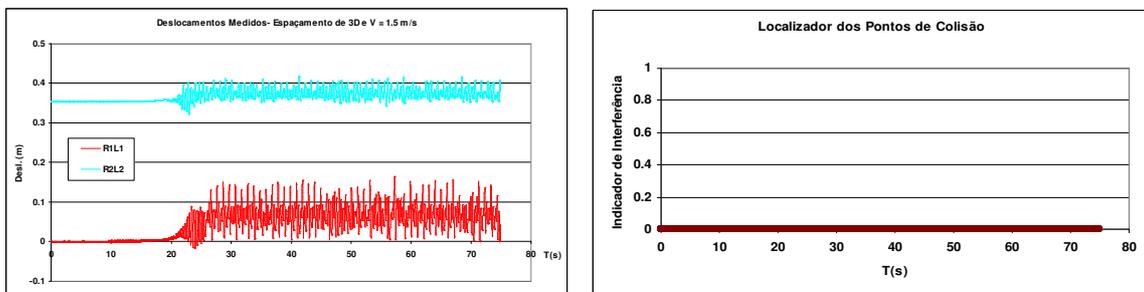


Figura 3.122- Série temporal de deslocamentos para $V = 1.5$ m/s e indicação se há colisão.

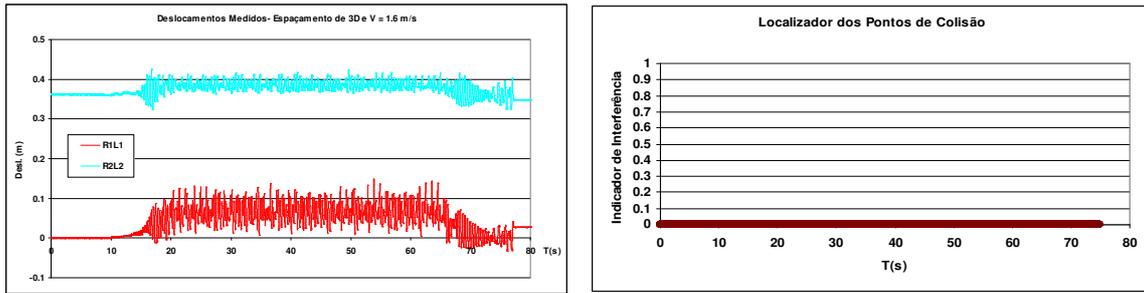


Figura 3.123- Série temporal de deslocamentos para $V= 1.6$ m/s e indicação se há colisão.

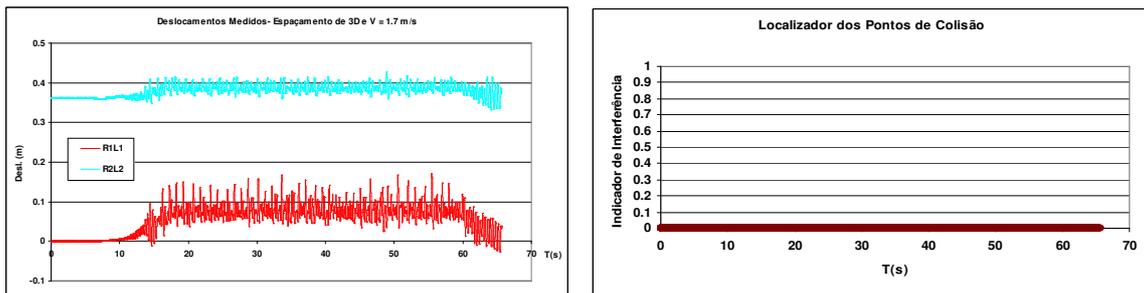


Figura 3.124- Série temporal de deslocamentos para $V= 1.7$ m/s e indicação se há colisão.

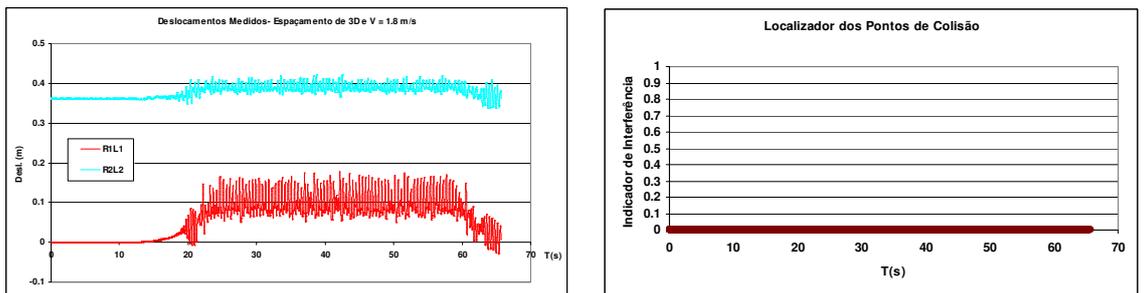


Figura 3.125- Série temporal de deslocamentos para $V= 1.8$ m/s e indicação se há colisão.

Como se pode observar, não houve colisão entre os modelos.

3.4.2.3.3 Espaçamento 4D

Conforme mencionado para este arranjo foi o usado o modelo 1, submetido as seguintes velocidades de escoamento 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

Como há uma tendência linear das forças hidrodinâmicas entre os espaçamentos de 3 e 5D e a janela disponível do tanque de reboque do NMRI exigia uma redução da matriz de ensaios; já que houve os imprevistos das quebras dos modelos 1 e 2, optou-se em não realizar estudos com modelo 3, isto é, tubo de PVC com 7 mm de espessura.

Os resultados para este espaçamento estão disponíveis somente para o modelo 1 e podem ser vistos no Anexo C. A seguir, é apresentado somente um resumo dos resultados.

3.4.2.3.3.1 Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 4D

A Tabela 3.86 apresenta um resumo dos resultados dos deslocamentos transversais e longitudinais para um *riser* isolado e compara com os resultados para os *risers* 1 e 2 espaçados de 4D.

Tabela 3.86- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas.

V(m/s)	Re	V _r	(Ay/D) _i	(Ax/D) _i	(Ay/D) _{r1}	(Ax/D) _{r1}	(Ay/D) _{r2}	(Ax/D) _{r2}
0.2	2.00E+04	0.891	0.007	0.0173	N.D	N.D	N.D	N.D
0.4	3.90E+04	1.782	0.146	0.0177	N.D	0.041	0.067	0.047
0.6	5.90E+04	2.672	0.067	0.071	N.D	0.083	0.110	0.041
0.8	7.80E+04	3.563	0.104	0.118	N.D	0.1286	0.138	0.078

Notas:

- Frequência natural do modelo 1, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 1.85 Hz;
- A velocidade reduzida é expressa por: $V_R = \frac{V}{f_{NAT} \cdot D}$
- As frequências naturais da estrutura são iguais nas direções x e y.

A Figura 3.126 apresenta os gráficos da amplitude de vibração adimensionalizada versus a velocidade reduzida para um *riser* isolado e dois *risers* alinhados e espaçados de 4D. Para este caso, há somente os resultados do modelo 1 e não foi possível atingir o valor da velocidade reduzida crítica, que corresponderia ao ponto denominado na literatura de *lock in*, isto é, quando a frequência de despreendimento dos vórtices se aproxima da frequência natural da estrutura.

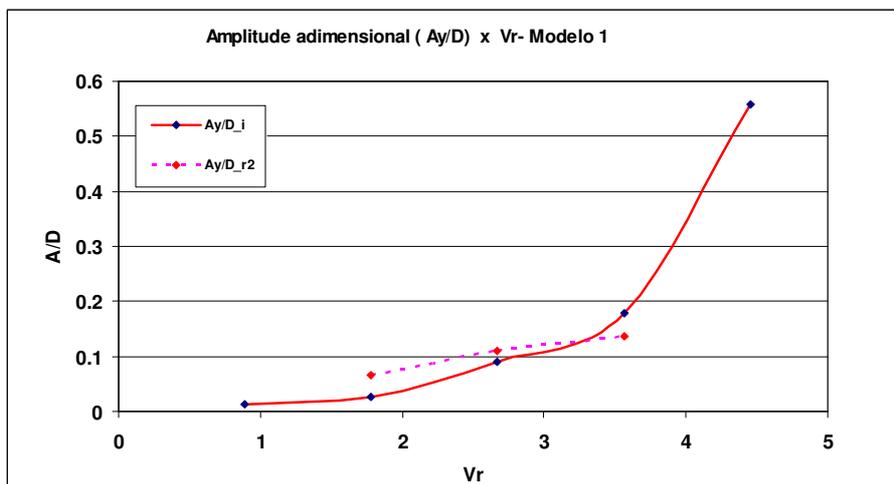
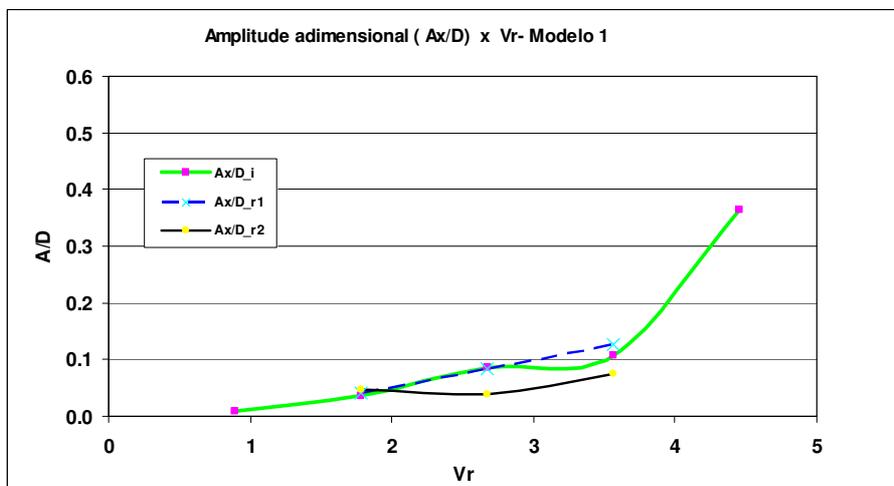
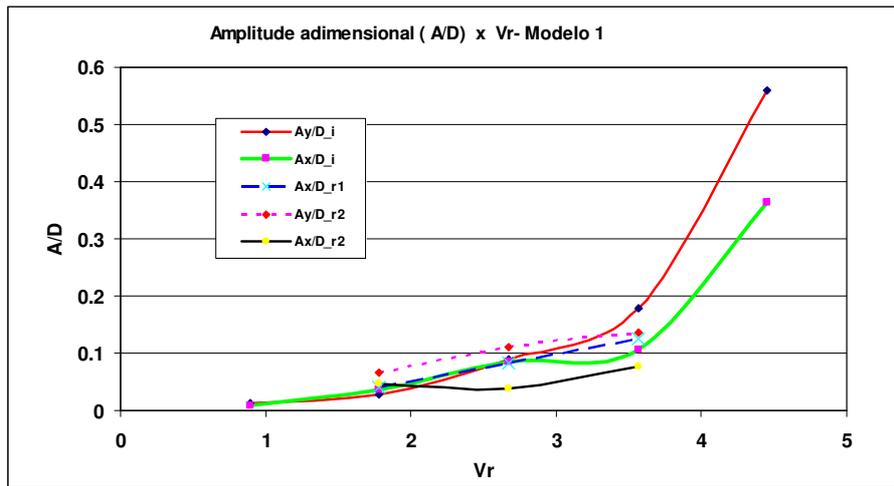


Figura 3.126 – Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados com Espaçamento de 4D – Modelo 1.

Analisando-se estes resultados, pode-se verificar que há uma redução da amplitude das vibrações longitudinais para valores de velocidade reduzida superiores a 2 para o *riser* de jusante; já o *riser* de montante se comporta como um *riser* isolado.

Na direção transversal, para o intervalo de velocidade reduzida estudado para este modelo, o comportamento do *riser 2* (jusante) será próximo ao do *riser* isolado.

3.4.2.3.3.1 Comparação com os Resultados encontrados na Literatura

Para este arranjo, há os resultados obtidos pela Shell e mencionados na referência [11]. A Tabela 3.87 apresenta um resumo das vibrações transversais obtidas no ensaio em referência e a Figura 3.127, mostra uma comparação com os resultados obtidos no NMRI.

Tabela 3.87- Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas Estudadas pela Shell, ver referência [11].

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_r1	(Ay/D)_r2
0.76	8.83E+04	2.812	0.1316	0.1316
0.83	9.70E+04	3.089	0.2467	0.1973
0.92	1.07E+05	3.394	0.4604	0.3947
0.98	1.13E+05	3.615	0.5098	0.4111
1.04	1.20E+05	3.837	0.4933	0.2960
1.09	1.27E+05	4.059	1.0360	0.6578
1.16	1.35E+05	4.294	1.1018	0.8222
1.22	1.42E+05	4.530	1.1018	0.8222
1.28	1.49E+05	4.751	1.1018	0.9044
1.35	1.57E+05	5.001	1.1018	0.9538
1.40	1.63E+05	5.194	1.0195	0.9373
1.47	1.71E+05	5.444	0.9702	0.8716
1.52	1.77E+05	5.638	0.8716	1.0524
1.58	1.84E+05	5.873	0.8551	1.0524
1.64	1.91E+05	6.081	0.8222	1.0689
1.71	1.99E+05	6.344	0.7893	1.0853
1.77	2.06E+05	6.552	0.7893	1.1018
1.83	2.13E+05	6.801	0.7893	1.0853
1.89	2.20E+05	7.023	0.8058	1.0689
1.95	2.27E+05	7.245	0.8222	1.0524
2.01	2.34E+05	7.466	0.6907	0.9538
2.07	2.41E+05	7.688	0.6907	0.9373
2.13	2.48E+05	7.909	0.6249	0.8222

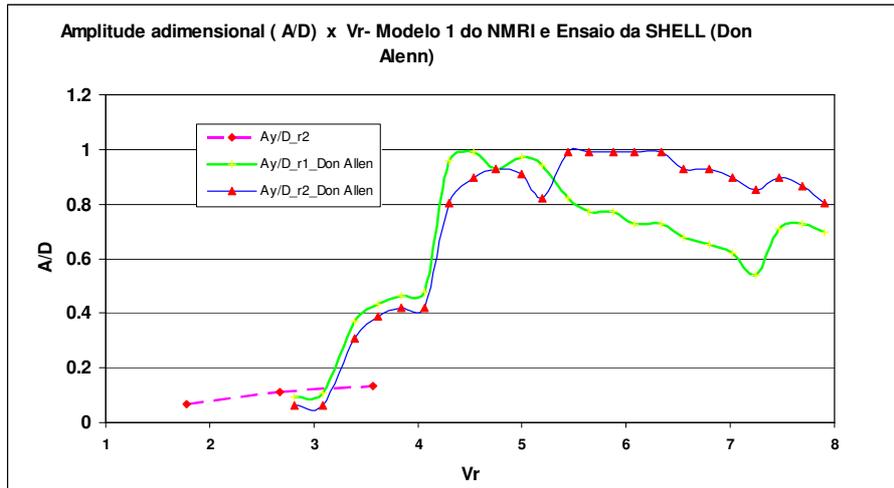


Figura 3.127- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 1 com os Apresentados na Referência [11].

Os resultados obtidos no NMRI foram para valores baixos de velocidade reduzida, e não permite que haja uma análise mais profunda.

3.4.2.3.3.1.2 Variação do Coeficiente de Arrasto

A partir das forças hidrodinâmicas longitudinal medida, pode-se obter o coeficiente de arrasto médio. A Figura 3.128 apresenta uma comparação das variações dos coeficientes hidrodinâmicos entre um *riser* isolado e 2 *risers* alinhados espaçados de 4D.

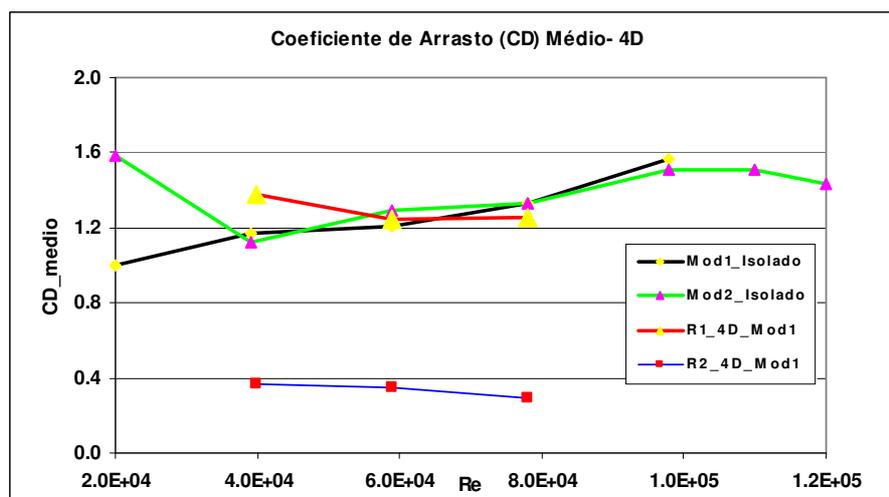


Figura 3.128- Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um *Riser* Isolado e para 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 4D.

Os resultados ratificam as conclusões anteriores da existência do efeito de sombra.

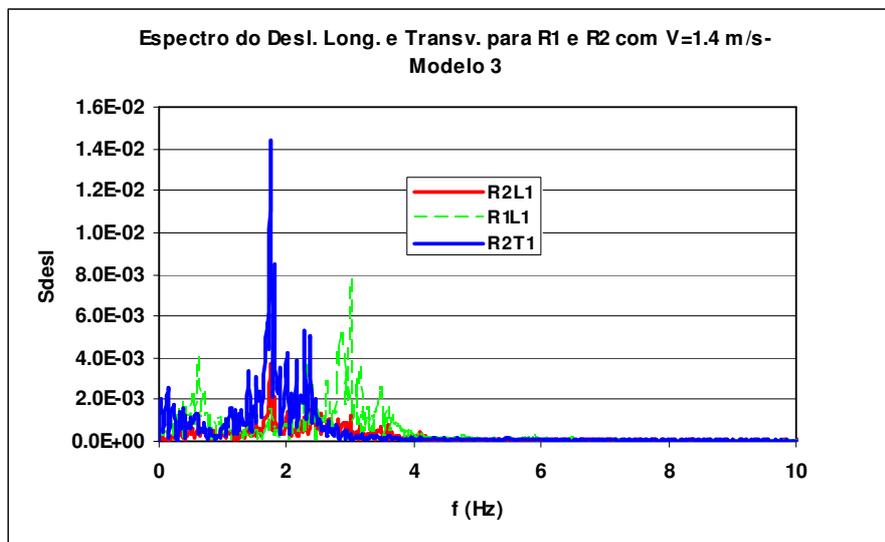
3.4.2.3.4 Espaçamento 5D

A seguir estão apresentados os resultados obtidos para o modelo 3 e para as velocidades de escoamento iguais a 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8 m/s.

Como para um espaçamento igual a 3D já não houve colisão, iremos verificar para as velocidades mencionadas, somente o comportamento hidrodinâmico. Isto é, as vibrações por desprendimento de vórtices e os efeitos da esteira sobre os *risers*.

3.4.2.3.4.1 Velocidade de 1.4 m/s

A Figura 3.129 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.



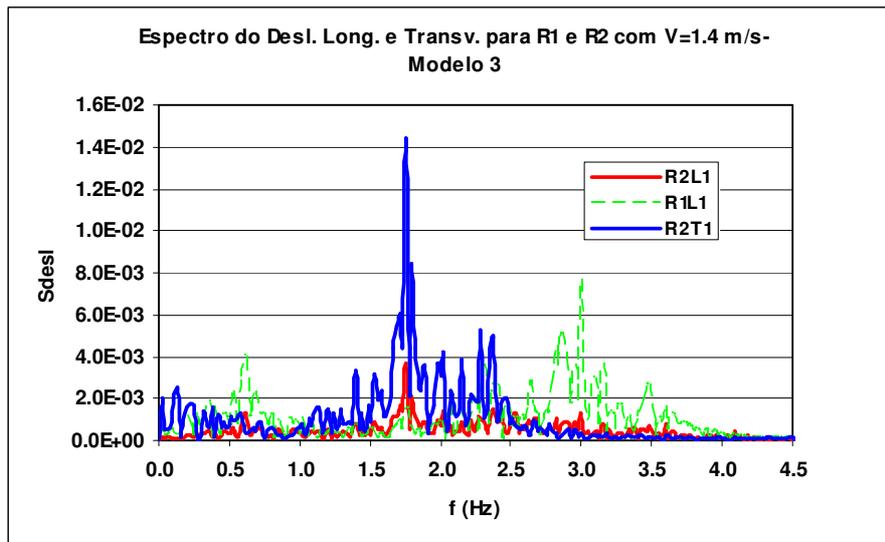


Figura 3.129- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1 e 2* e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 4.5Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal para o *riser 2* e longitudinal dos *risers 1 e 2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.8 Hz na direção transversal do *riser 2*. Na direção longitudinal, o *riser 1* foi excitado em uma larga faixa de frequências de 0 a 4 Hz (Curva verde tracejada- R1L1), sendo a energia de excitação maior que na direção longitudinal do *riser 2*. Contudo, inferior à energia de excitação do *riser 2* na direção transversal. É importante salientar, que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamentos de 2D e 3D.

A Figura 3.130 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados e espaçados de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.131 e 3.132 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

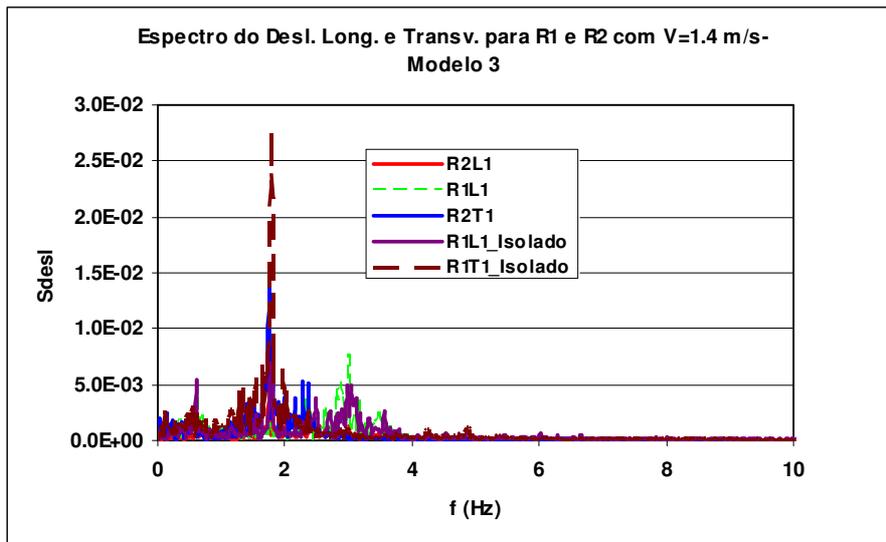


Figura 3.130- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

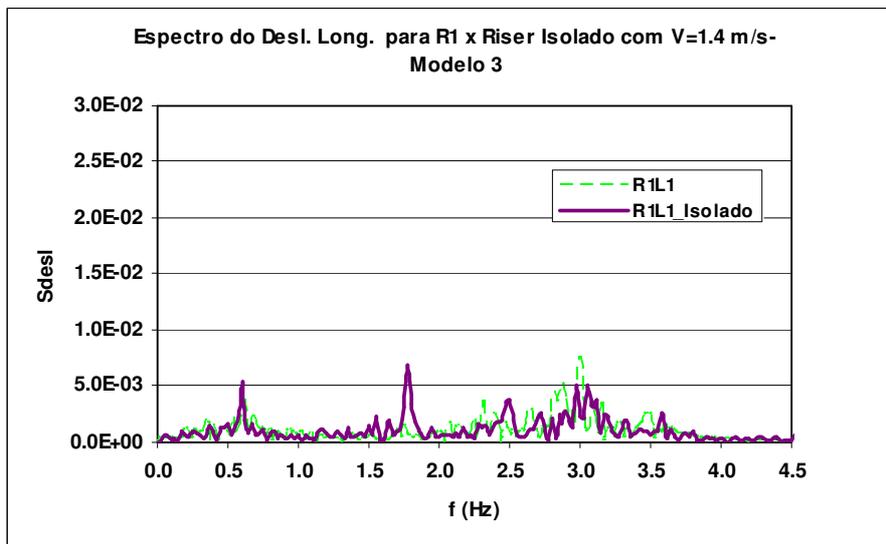


Figura 3.131- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

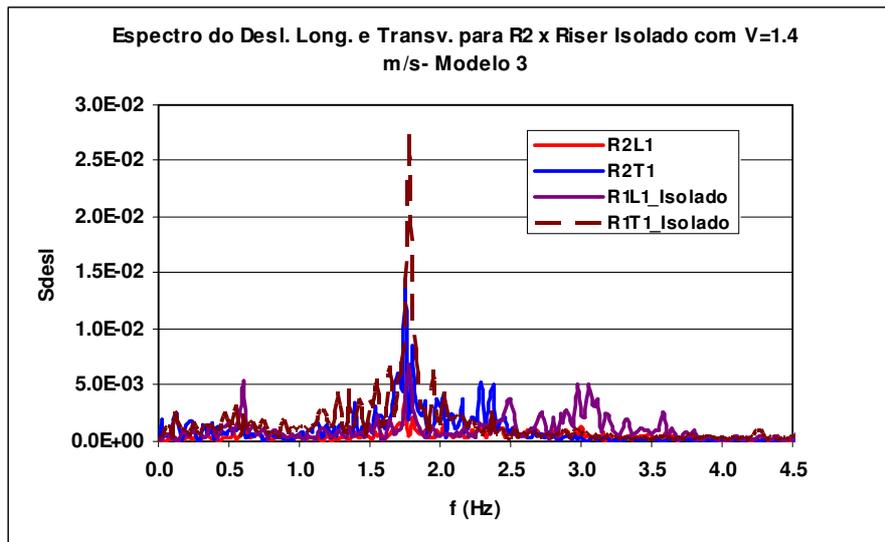


Figura 3.132- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal do *riser* 2 e longitudinal, para ambos os *risers*;
- a energia das vibrações de ambos os *risers* em ambas as direções estão distribuídas em uma larga faixa de frequências;
- é importante salientar que comportamento similar foi observado para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e 3D.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, estão apresentados na Tabela 3.88, mostram que o *riser* 2 foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela 3.88 - Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.3607	0.1573		
L2	0.3585	0.1513		
L3				
L4				
T1				0.4727
T2				0.4574
T3				0.3864

A Figura 3.133 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser* 2, aproximando-se a trajetória da obtida para um espaçamento de 3D.

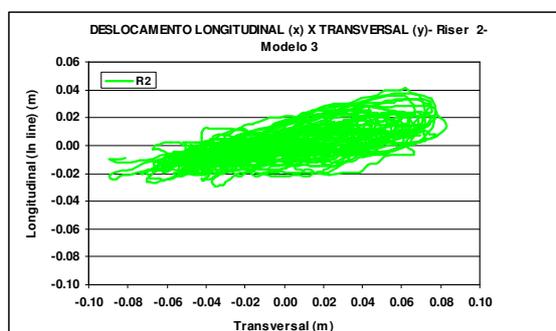


Figura 3.133- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser* 2- Velocidade de 1.4 m/s.

3.4.2.3.4.1.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga; a Tabela 3.89 apresenta estes resultados.

Tabela 3.89- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.47 \times 10^5$, para o Modelo 3.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	168.409	49.691	135.743	120.828
Médio	49.901	16.973	-6.723	0.077
Desvio Padrão	34.484	10.058	68.728	50.053
Mínimo	-34.939	-14.329	-146.244	-126.795

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.90:

Tabela 3.90- Coeficientes Hidrodinâmicos para $Re = 1.47 \times 10^5$, para o modelo 3.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.053	0.358

Ao compararmos os valores acima com o obtido para um *riser* isolado, ver item 3.4.2.1.4.2 apresentado anteriormente, pode-se verificar que o efeito de sombra ainda é expressivo.

3.4.2.3.4.2 Velocidade de 1.6 m/s

A Figura 3.134 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

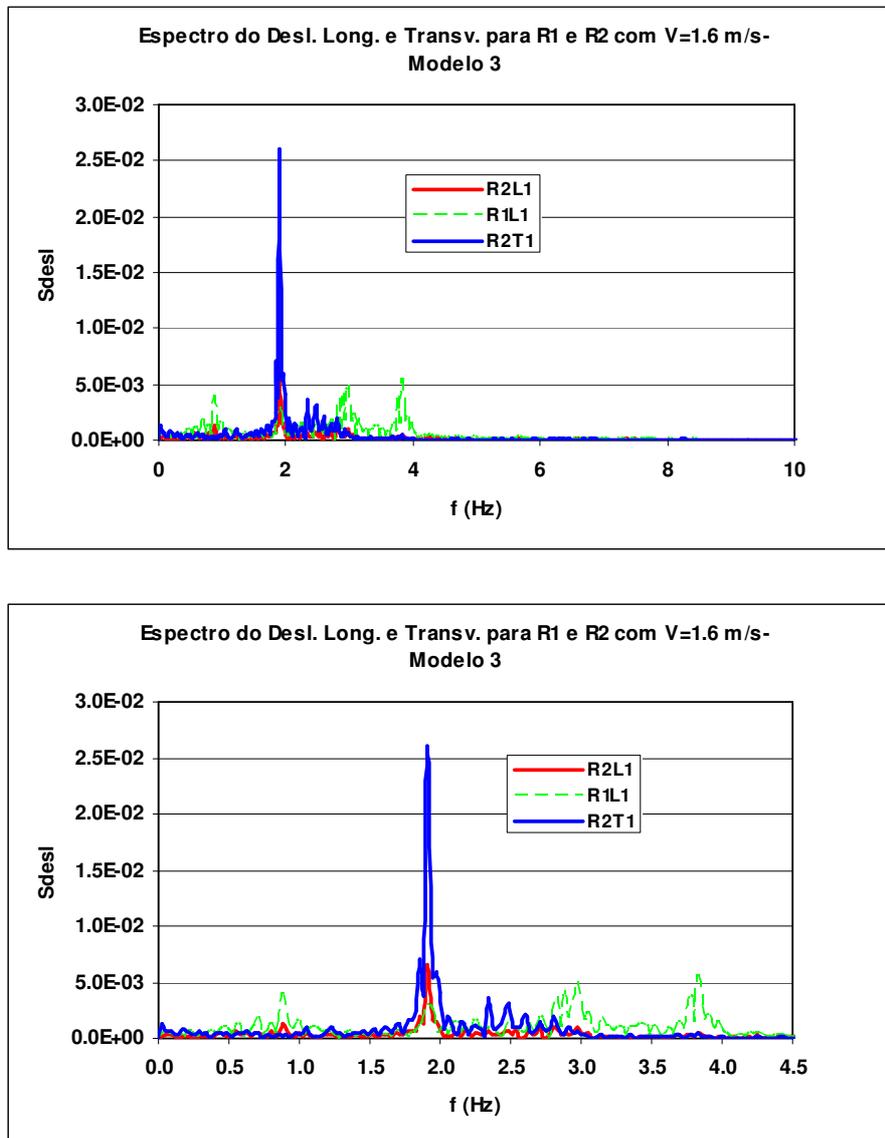


Figura 3.134 - Espectro do Deslocamento Transversal do *Riser* 2 e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe nas Faixas de Frequências de 0 a 4.5 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.9Hz na direção transversal do *riser* 2, nesta mesma frequência houve uma pequena parcela de energia de excitação na direção longitudinal para ambos os *risers*. Já na direção longitudinal o *riser* 1 foi excitado em uma larga faixa de frequência de 0 a 4.1

Hz (Curva verde tracejada), sendo a energia de excitação maior que na direção longitudinal do *riser* 2, contudo bem inferior à energia de excitação na direção transversal do *riser* 2. É importante salientar que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e 3D.

A Figura 3.135 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.136 e 3.137 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 4.5 Hz.

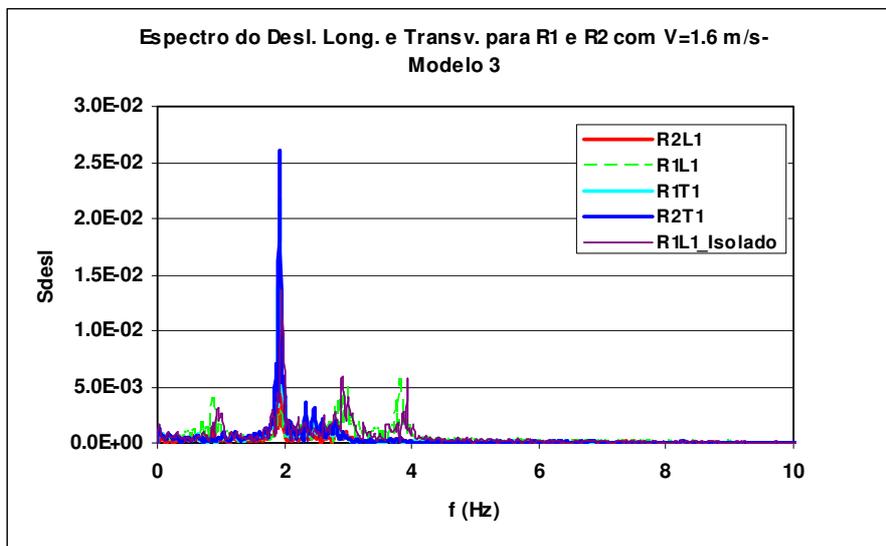


Figura 3.135- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

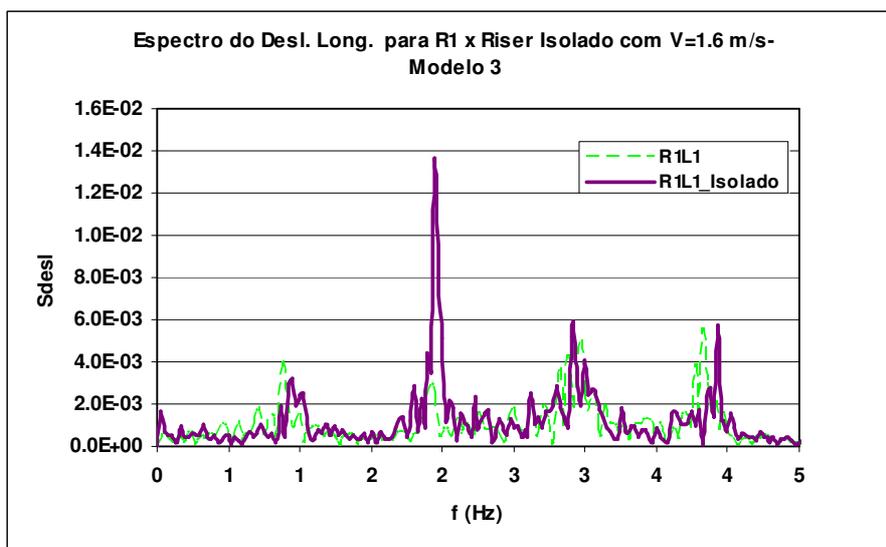


Figura 3.136- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

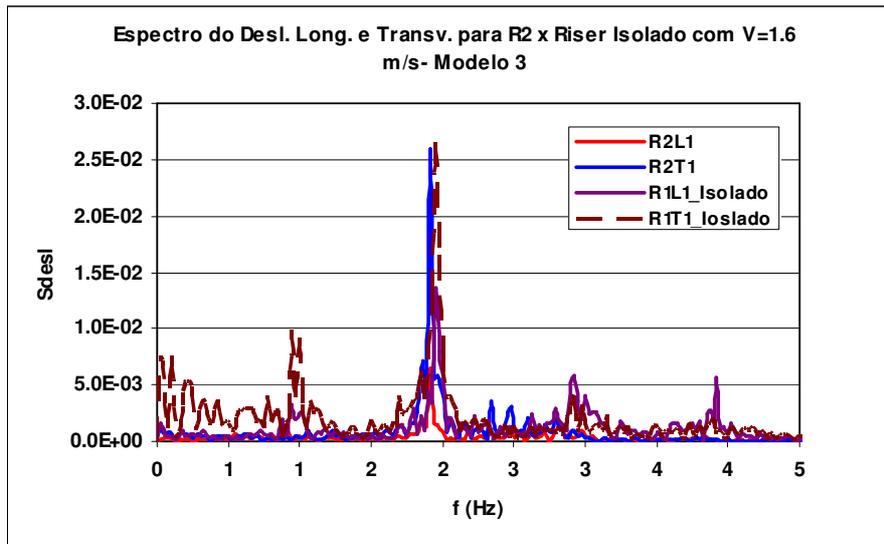


Figura 3.137- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena variação no pico da frequência excitada na direção transversal do *riser 2*;
- na direção longitudinal de ambos os *risers*, a energia de excitação está reduzida e distribuída em uma larga faixa de frequências.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.91, mostram que o *riser 2* foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela 3.91 - Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 *risers* medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.2991	0.1509		
L2	0.2988	0.1487		
L3				
L4				
T1				0.5335
T2				0.5150
T3				0.4465

A Figura 3.138 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser 2*. Trajetória similar foi obtida para a mesma velocidade com espaçamento de 3D. Para o *riser 2* a trajetória é achatada, aproximando-se da forma conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

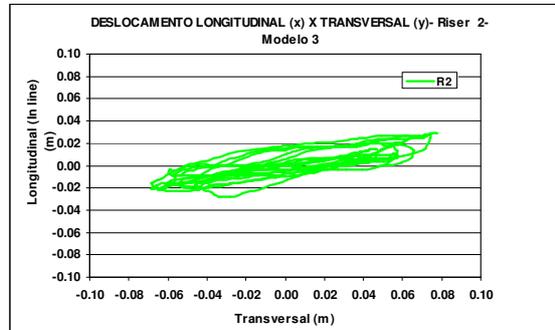


Figura 3.138- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser 2*- Velocidade de 1.6 m/s.

3.4.2.3.4.2.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através de células de carga. A Tabela 3.92 apresenta estes resultados.

Tabela 3.92- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.67 \times 10^5$.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	223.238	46.511	221.252	128.583
Médio	71.849	19.338	6.720	1.045
Desvio Padrão	42.806	8.281	104.219	59.214
Mínimo	-7.343	-3.828	-171.089	-121.134

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.93:

Tabela 3.93- Coeficientes Hidrodinâmicos para $Re = 1.67 \times 10^5$.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.161	0.312

Ao compararmos os valores acima com os obtidos para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.6.2, apresentado anteriormente, pode-se verificar que há, ainda, um efeito de sombra sobre o riser de jusante, ainda, expressivo.

3.4.2.3.4.3 Velocidade de 1.7 m/s

A Figura 3.139 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.

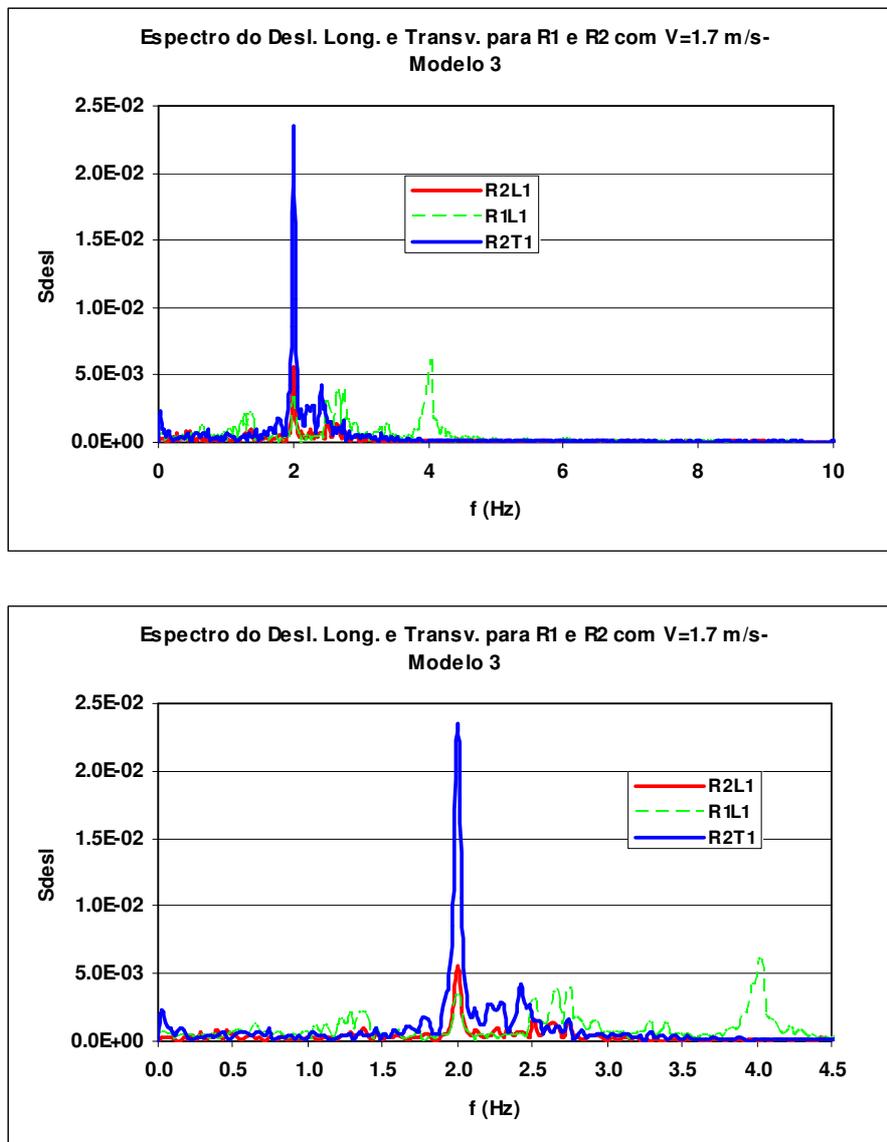


Figura 3.139- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 4.5 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2Hz na direção transversal do *riser 2*, nesta mesma frequência houve uma pequena parcela de energia de excitação na direção longitudinal para ambos os *risers*. Já na direção longitudinal, o *riser 1* foi excitado em uma larga faixa de frequências, compreendida entre 0.5 a 4.5 Hz (Curva verde tracejada), sendo a energia de excitação maior que na direção longitudinal do *riser 2*. Contudo, bem inferior à energia de excitação na direção transversal do *riser 2*. É importante salientar, que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e 3D.

A Figura 3.140 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.141 e 3.142 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

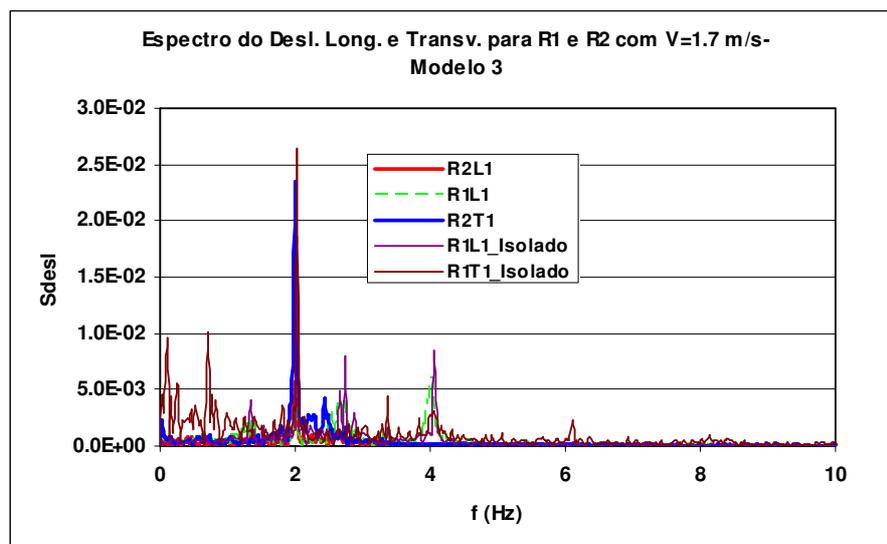


Figura 3.140- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers 1* e *2* com o *Riser* Isolado.

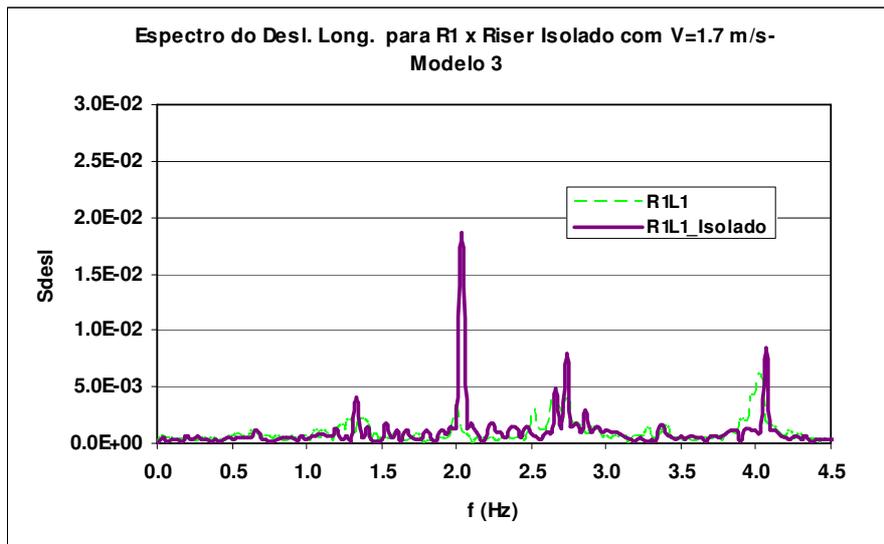


Figura 3.141- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* com o *Riser Isolado*.

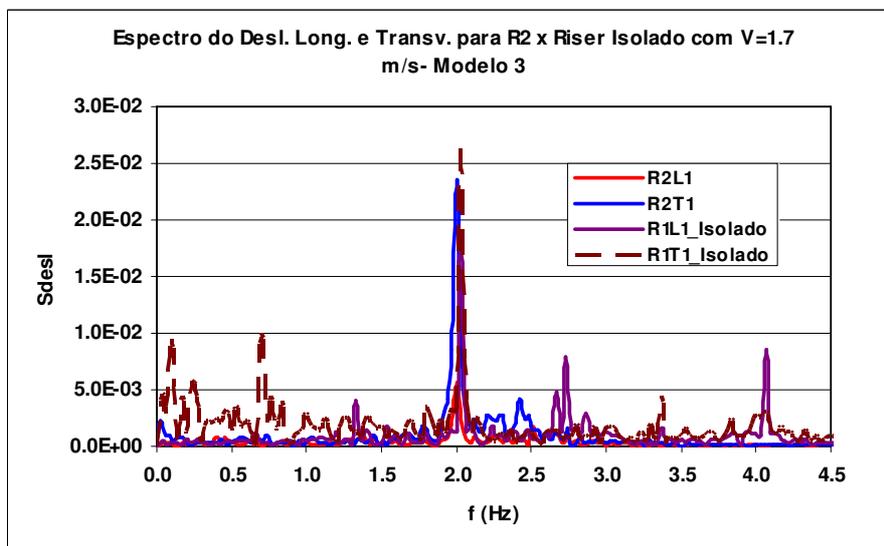


Figura 3.142- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena variação no pico da frequência excitada na direção transversal do *riser 2*;
- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal do *riser 2*;
- na direção longitudinal para ambos os *risers*, a energia de excitação está reduzida e distribuída em uma larga faixa de frequências;

- é importante salientar que foi observado um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e 3D e para este mesmo espaçamento com velocidade de 1.6 m/s.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.94, mostram que *riser 2* foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela 3.94 - Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.2766	0.1475		
L2	0.2764	0.1463		
L3				
L4				
T1				0.5333
T2				0.5155
T3				0.4460

A Figura 3.143 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o *riser 2*. Para o *riser 2* a trajetória é achatada, aproximando-se da forma conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

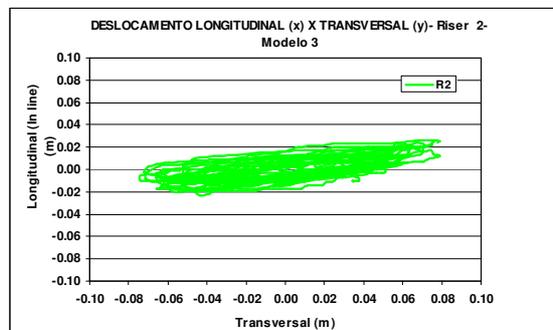


Figura 3.143- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser 2*- Velocidade de 1.7 m/s.

3.4.2.3.4.3.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.95 apresenta estes resultados.

Tabela 3.95- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.78 \times 10^5$.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	269.825	64.648	243.976	128.349
Médio	96.380	28.042	7.713	1.503
Desvio Padrão	47.418	10.478	120.759	61.333
Mínimo	-15.640	-5.052	-204.969	-125.294

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.96:

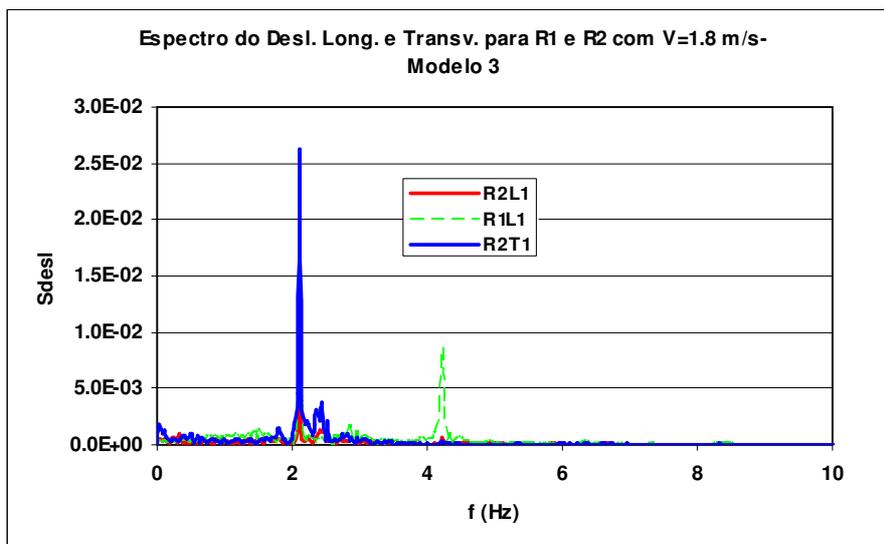
Tabela 3.96- Coeficientes Hidrodinâmicos para $Re = 1.67 \times 10^5$.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.379	0.401

Ao compararmos os valores acima com os obtidos para um riser isolado, ver item 3.4.2.1.6.2, apresentado anteriormente, pode-se verificar que há, ainda, um efeito de sombra sobre o *riser* de jusante, ainda, expressivo.

3.4.2.3.4.4 Velocidade de 1.8 m/s

A Figura 3.144 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1.



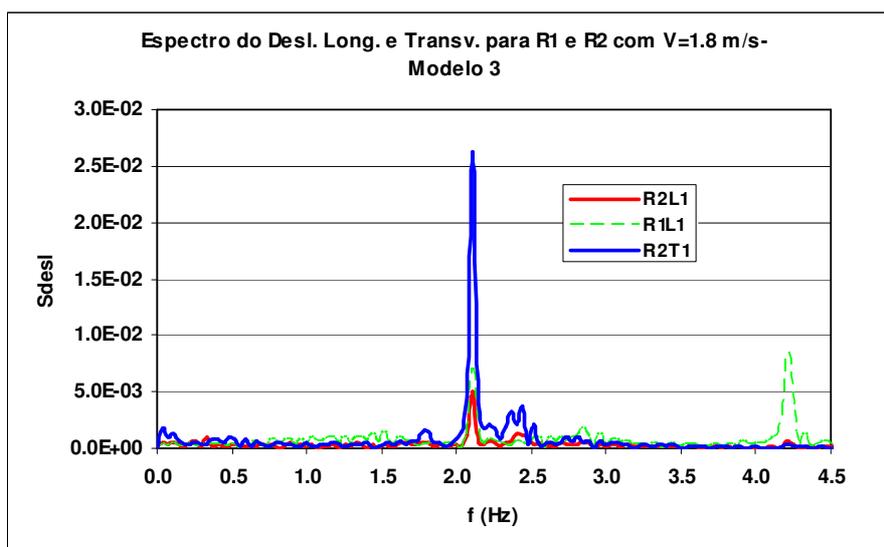


Figura 3.144- Espectro do Deslocamento Transversal do *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 4.5 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.1 Hz na direção transversal do *riser 2*, nesta mesma frequência houve uma pequena parcela de energia de excitação na direção longitudinal para ambos os *risers*. Já na direção longitudinal, o *riser 1* foi excitado em uma faixa de frequências, compreendida entre 4 a 4.5 Hz (Curva verde tracejada), sendo a energia de excitação maior que na direção longitudinal do *riser 2*. Contudo, bem inferior à energia de excitação na direção transversal do *riser 2*. É importante salientar, que houve um comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e 3D.

A Figura 3.145 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos 2 *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras 3.146 e 3.147 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 4.5 Hz.

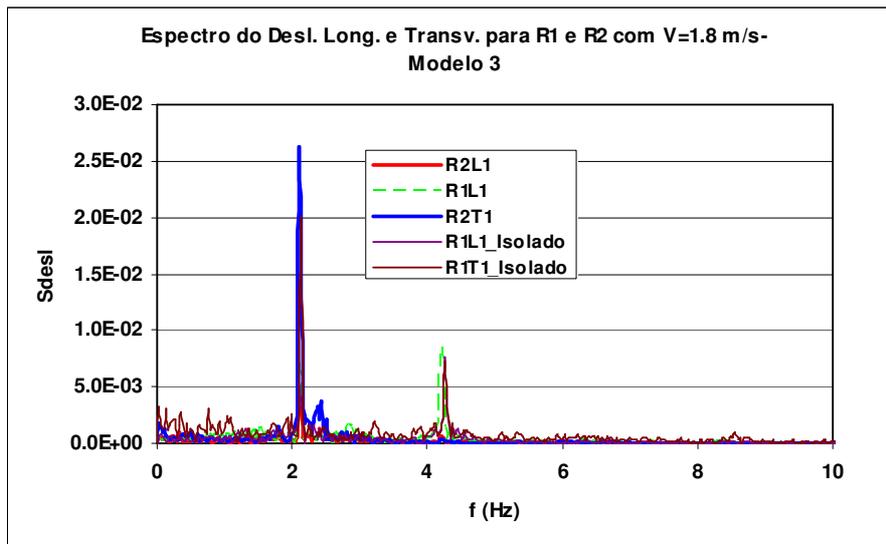


Figura 3.145- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

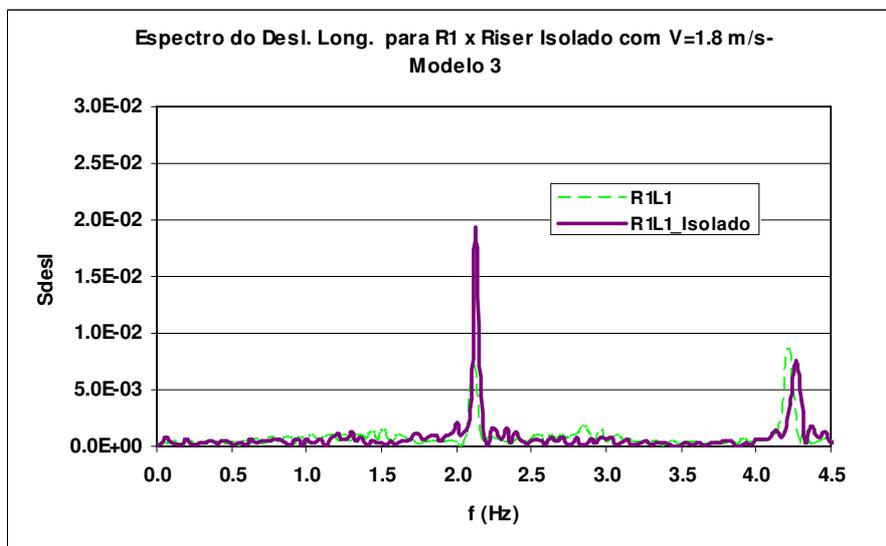


Figura 3.146- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

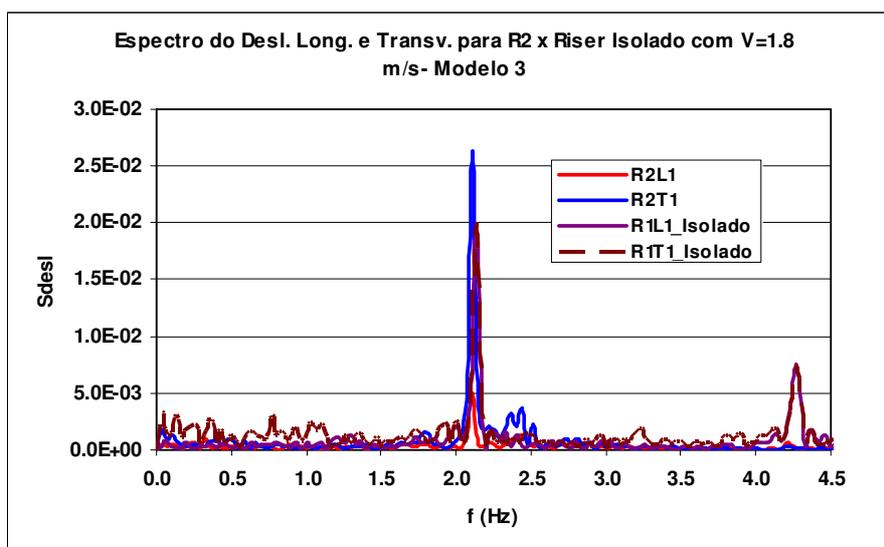


Figura 3.147- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena variação no pico da frequência excitada na direção transversal do *riser 2*;
- há uma pequena redução da energia de vibração na direção transversal, para o *riser 2*;
- na direção longitudinal para ambos os *risers*, a energia de excitação está reduzida e distribuída em uma larga faixa de frequências.
- é importante salientar, que foi observado comportamento similar para a mesma velocidade com espaçamento de 2D e 3D.

Os valores de A/D obtidos para os 2 *risers*, apresentados na Tabela 3.97, mostram que o *riser 2* foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela 3.97 - Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os 2 risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.2477	0.1121		
L2	0.2435	0.1103		
L3				
L4				
T1				0.4977
T2				0.4813
T3				0.4116

A Figura 3.148 mostra que há predominância do deslocamento transversal para o riser 2. Para o riser 2 a trajetória é achatada, aproximando-se da forma conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

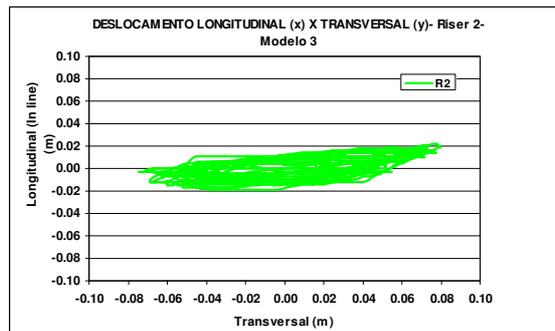


Figura 3.148- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinais e Transversais para o Riser 2- Velocidade de 1.8 m/s.

3.4.2.3.4.4.1 Forças e Coeficientes Hidrodinâmicos

Foram medidas as forças hidrodinâmicas na direção transversal e longitudinal através das células de carga, a Tabela 3.98 apresenta estes resultados.

Tabela 3.98 - Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.88 \times 10^5$.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	251.498	72.567	268.930	128.797
Médio	93.460	29.125	8.927	1.942
Desvio Padrão	57.096	11.702	133.039	60.086
Mínimo	-7.874	3.125	-207.020	-115.161

A partir das forças hidrodinâmicas médias na direção longitudinal, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios, apresentados na Tabela 3.99:

Tabela 3.99 - Coeficientes Hidrodinâmicos para $Re = 1.88 \times 10^5$.

	CD	
	R1	R2
Médio	1.193	0.372

Ao compararmos os valores acima com os obtidos para um *riser* isolado, ver Anexo C, apresentado anteriormente, pode-se verificar que há, ainda, um efeito de sombra sobre o riser de jusante, ainda, expressivo.

3.4.2.3.4.5 Resumos e Análise dos Resultados para um Espaçamento de 5D

As Tabelas 3.100 e 3.101 apresentam um resumo dos resultados dos deslocamentos transversais e longitudinais para um *riser* isolado e compara com os resultados para os *risers* 1 e 2 espaçados de 5D para os modelos 1 e 3.

Tabela 3.100- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 1.

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_i	(Ax/D)_i	(Ay/D)_r1	(Ax/D)_r1	(Ay/D)_r2	(Ax/D)_r2
0.2	2.00E+04	0.891	0.007	0.0173	N.D	N.D	N.D	N.D
0.4	3.90E+04	1.782	0.146	0.0177	N.D	0.038	0.055	0.037
0.6	5.90E+04	2.672	0.067	0.071	N.D	0.083	0.084	0.032
0.8	7.80E+04	3.563	0.104	0.118	N.D	0.118	0.114	0.064

Tabela 3.101- Resumo das Frequências, Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas para o Modelo 3.

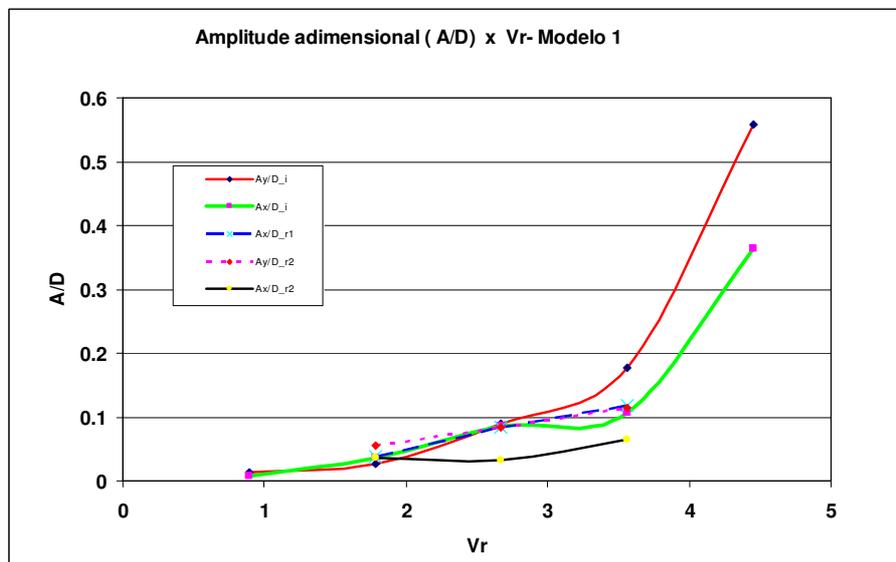
V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_i	(Ax/D)_i	(Ay/D)_r1	(Ax/D)_r1	(Ay/D)_r2	(Ax/D)_r2
0.4	4.19E+04	1.545	0.0485	0.0415	N.D	0.0402	0.0535	0.0569
0.6	6.28E+04	2.318	0.0356	0.1122	N.D	0.1132	0.0345	0.0249
0.8	8.37E+04	3.091	0.0951	0.1619	N.D	0.1743	0.0803	0.0774
1	1.05E+05	3.863	0.3371	0.3206	N.D	0.3701	0.2071	0.1035
1.2	1.26E+05	4.636	0.4952	0.3673	N.D	0.4067	0.2379	0.0672
1.4	1.47E+05	5.408	0.7068	0.6264	N.D	0.3607	0.4727	0.1573
1.6	1.67E+05	6.181	0.8277	0.45	N.D	0.2991	0.5335	0.1509
1.7	1.78E+05	6.567	0.6569	0.4364	N.D	0.2766	0.5333	0.1475
1.8	1.88E+05	6.954	0.4849	0.4174	N.D	0.2477	0.4977	0.1121

Notas:

- Freqüência natural do modelo 1, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 1.85 Hz;
- Freqüência natural do modelo 3, obtida através de ensaio de vibrações livres, é igual a 2.31 Hz;
- A velocidade reduzida é expressa por: $V_R = \frac{V}{f_{NAT} \cdot D}$
- As freqüências naturais da estrutura são iguais nas direções x e y.

3.4.2.3.4.5.1 Caracterização da Interação Hidrodinâmica para um Espaçamento de 5D

As Figuras 3.149 e 3.150 apresentam uma comparação dos valores das amplitudes adimensionalizadas significativas das vibrações transversais e longitudinais de um *riser* isolado com dois *risers* espaçados de 5D em função da velocidade reduzida, para os modelos 1 e 3.



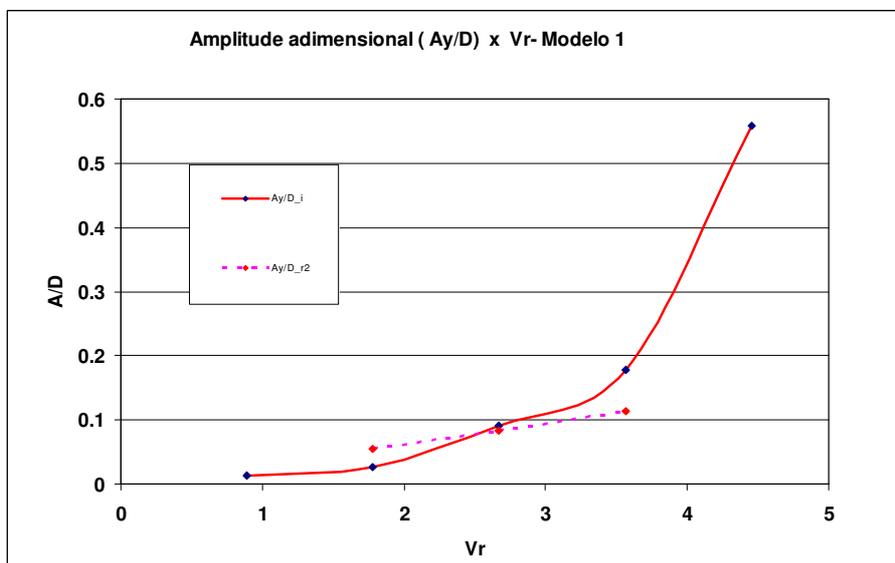
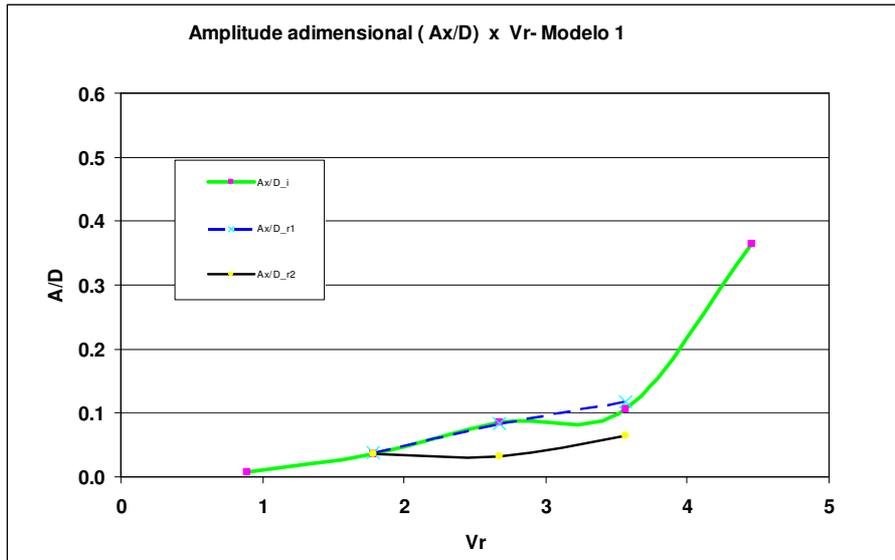
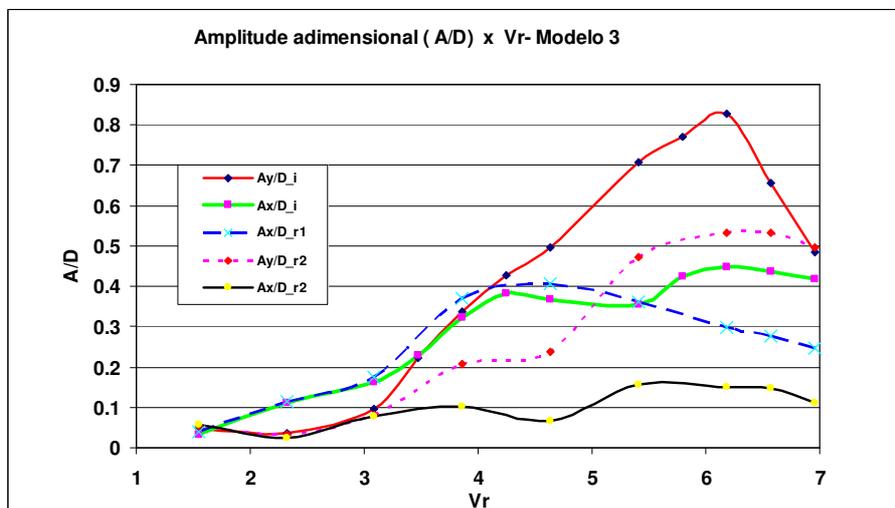


Figura 3.149 – Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados com Espaçamento de 5D – Modelo 1.



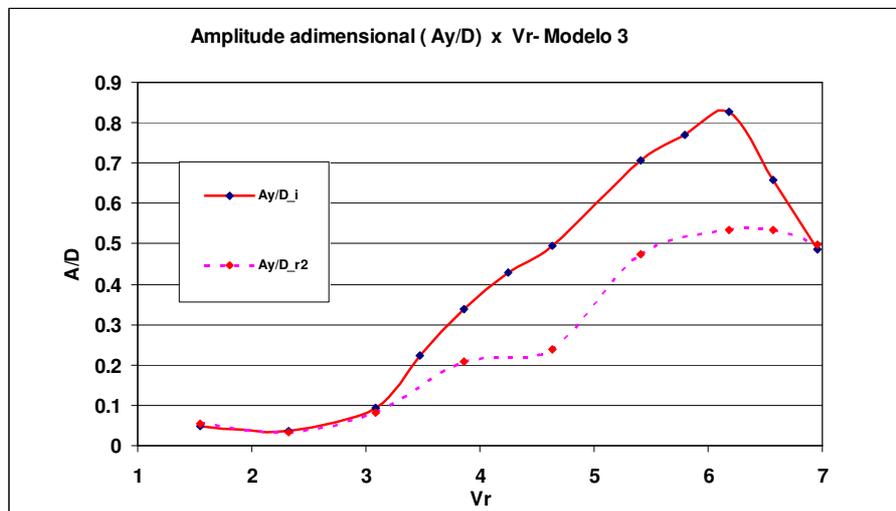
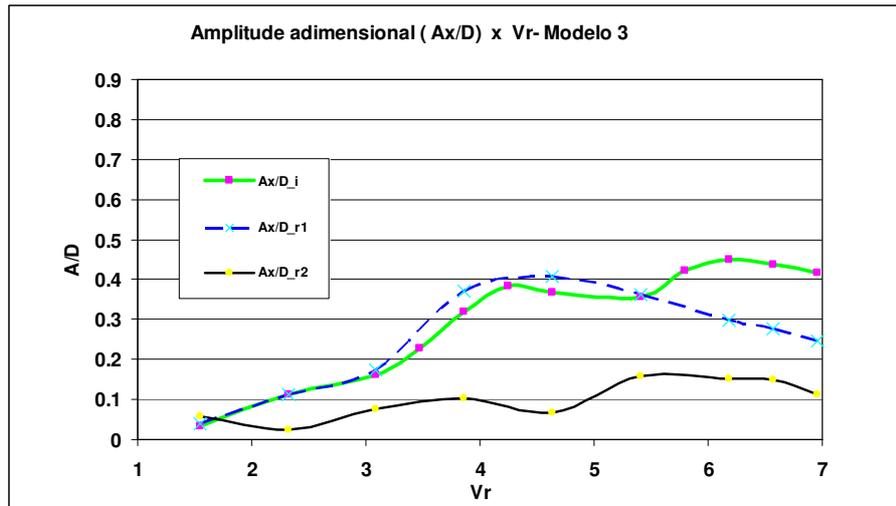


Figura 3.150 – Comparação do Gráfico de Amplitude adimensionalizada (A/D) x Velocidade Reduzida para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados com Espaçamento de 5D – Modelo 3.

Analisando estes resultados, pode-se verificar que há uma redução na amplitude das vibrações longitudinais para valores elevados de velocidade reduzida. Sendo esta redução da amplitude das vibrações longitudinais mais expressiva para o riser de jusante.

Na direção transversal, também, haverá uma redução da amplitude das vibrações, sendo esta redução mais expressiva para o riser de montante.

As Figuras 3.151 e 3.152 apresentam uma comparação dos valores das variações das forças hidrodinâmicas transversais (direção y- sustentação) e longitudinais (direção x- arrasto) de um *riser* isolado com 2 *risers* espaçados de 5D em função do número de

Reynolds, para o modelo 3. Estes resultados foram obtidos com as células de carga mostradas na Figura 3.11.

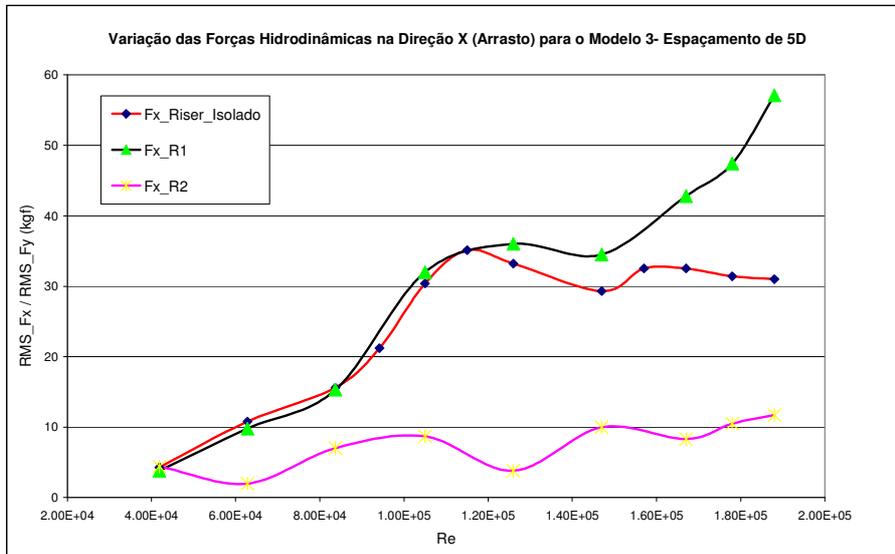


Figura 3.151 – Comparação do Gráfico de RMS_Fx x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 5D para Modelo 3.

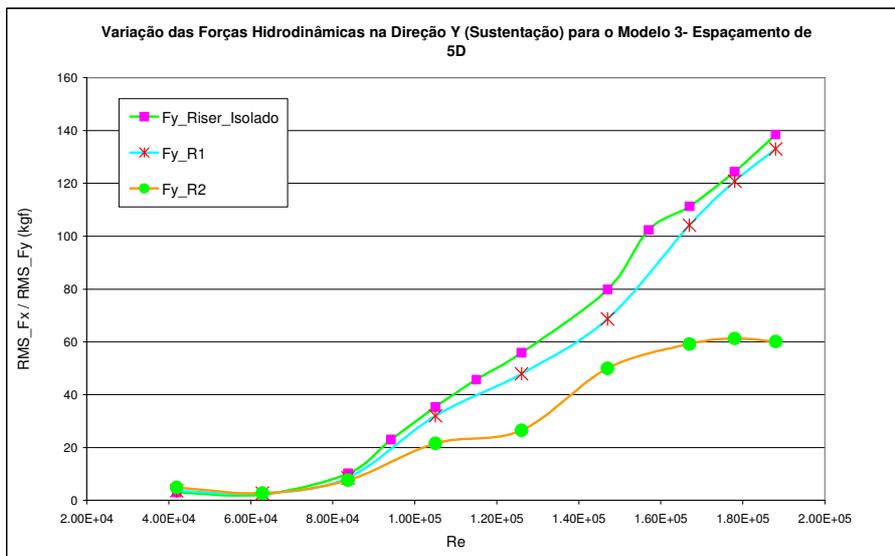


Figura 3.152 – Comparação do Gráfico de RMS_Fy x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 5D para Modelo 3.

Analisando estes resultados, pode-se verificar que há uma redução na variação das forças hidrodinâmicas longitudinais para valores elevados do número de Reynolds para o riser de jusante, já o riser de montante apresenta um comportamento similar ao riser isolado. Este resultado ratifica o que foi observado para as vibrações longitudinais.

Na direção transversal, a variação das forças hidrodinâmicas para o riser de montante, mostra que este apresenta um comportamento similar ao riser isolado. Quanto ao riser de jusante, pode-se observar que a variação da força transversal apresenta uma redução, ratificando o resultado obtido para as vibrações.

3.4.2.3.4.5.2 Comparação com os Resultados encontrados na Literatura

Para este arranjo, há os resultados obtidos pela Shell e mencionados na referência [11]. A Tabela 3.102 apresenta um resumo das vibrações transversais obtidas no ensaio em referência; a Figura 3.153 mostra uma comparação com os resultados obtidos no NMRI.

Tabela 3.102- Amplitudes Adimensionais e Velocidades Reduzidas Estudadas pela Shell, ver referência [11].

V(m/s)	Re	Vr	(Ay/D)_r1	(Ay/D)_r2
0.76	2.49E+00	2.812	0.0604	0.0604
0.83	2.73E+00	3.089	0.0967	0.0725
0.92	3.00E+00	3.394	0.3626	0.2780
0.98	3.20E+00	3.615	0.4351	0.3989
1.04	3.40E+00	3.837	0.4351	0.2538
1.09	3.59E+00	4.059	0.4835	0.3989
1.16	3.80E+00	4.294	0.9307	0.7373
1.22	4.01E+00	4.530	0.9670	0.9065
1.28	4.20E+00	4.751	0.8703	0.9186
1.35	4.43E+00	5.001	0.7494	0.8098
1.40	4.60E+00	5.194	0.7132	0.9428
1.47	4.82E+00	5.444	0.6890	0.9670
1.52	4.99E+00	5.638	0.6648	0.9670
1.58	5.20E+00	5.873	0.6527	0.9428
1.64	5.38E+00	6.081	0.6044	0.9065
1.71	5.61E+00	6.344	0.5923	0.8945
1.77	5.80E+00	6.552	0.5923	0.8703
1.83	6.02E+00	6.801	0.5198	0.8219
1.89	6.22E+00	7.023	0.6165	0.9186
1.95	6.41E+00	7.245	0.6044	0.8098
2.01	6.61E+00	7.466	0.6044	0.7494
2.07	6.80E+00	7.688	0.6044	0.7252
2.13	7.00E+00	7.909	0.6406	0.7252

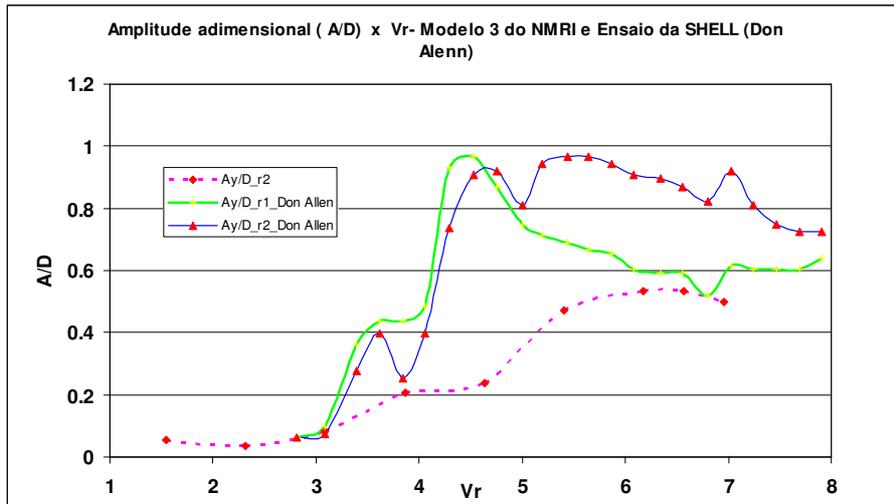
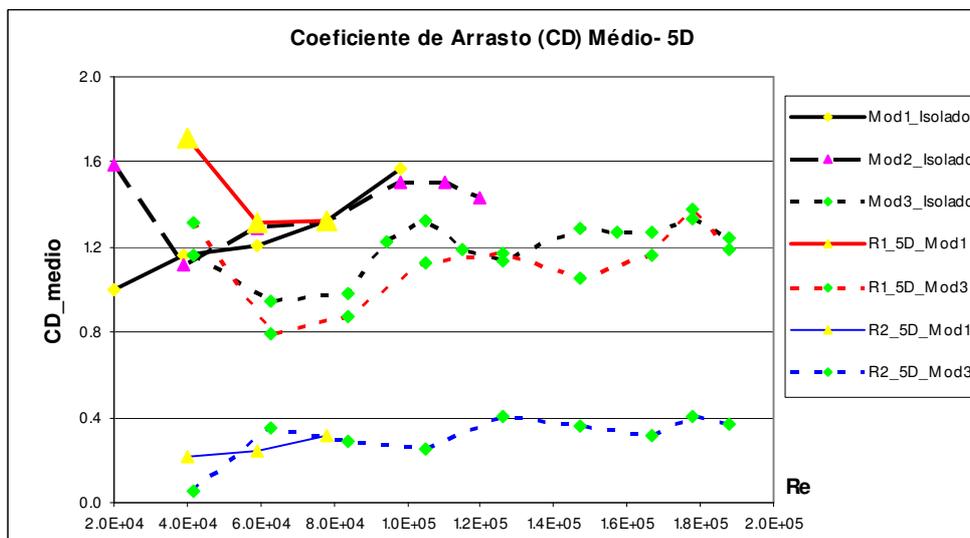


Figura 3.153- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI para o Modelo 3 com os Apresentados na Referência [11].

A partir da Figura 3.150, pode-se verificar que os resultados de amplitude de vibração transversal do *riser 2* estão próximos para valores baixos de velocidade reduzida, como observado para um espaçamento de 2 e 3D.

3.4.2.3.4.5.3 Variação do Coeficiente de Arrasto Médio

A partir das forças hidrodinâmicas longitudinais medidas, podem-se obter os coeficientes de arrasto médios. A Figura 3.154 apresenta a comparação das variações deste coeficiente hidrodinâmico entre um riser isolado e 2 risers alinhados e espaçados de 5D, em função do número de Reynolds.



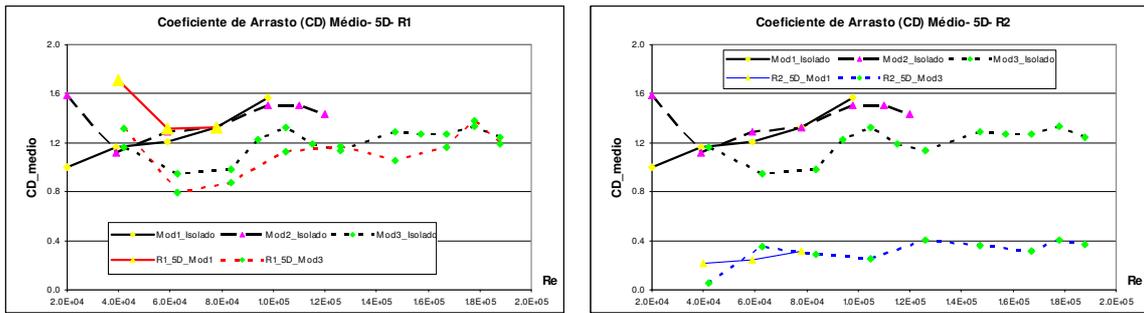


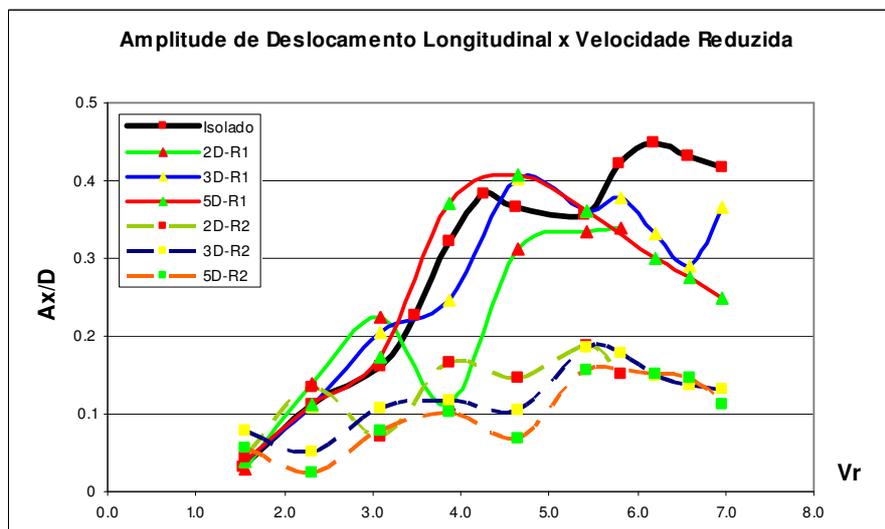
Figura 3.154- Coeficiente de Arrasto Médio x Número Reynolds para um *Riser* Isolado e para dois *Risers* Alinhados e Espaçados de 5D.

Analisando a Figura 3.154, pode-se verificar a ocorrência do efeito de sombra e que este efeito é mais expressivo para valores menores do número de Reynolds.

3.4.2.4 RESUMO FINAL DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Visando estabelecer uma tendência do comportamento hidrodinâmico em função do espaçamento relativo, foram obtidos gráficos mostrando as amplitudes adimensionalizadas das vibrações transversais e longitudinais em função da velocidade reduzida, para os diferentes espaçamentos estudados.

As Figuras 3.155 e 3.156 mostram as variações mencionadas para o modelo 3.



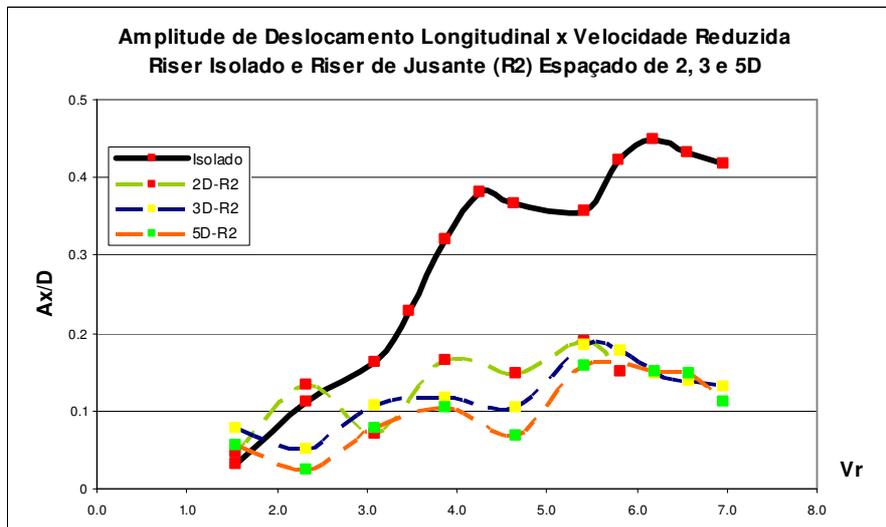
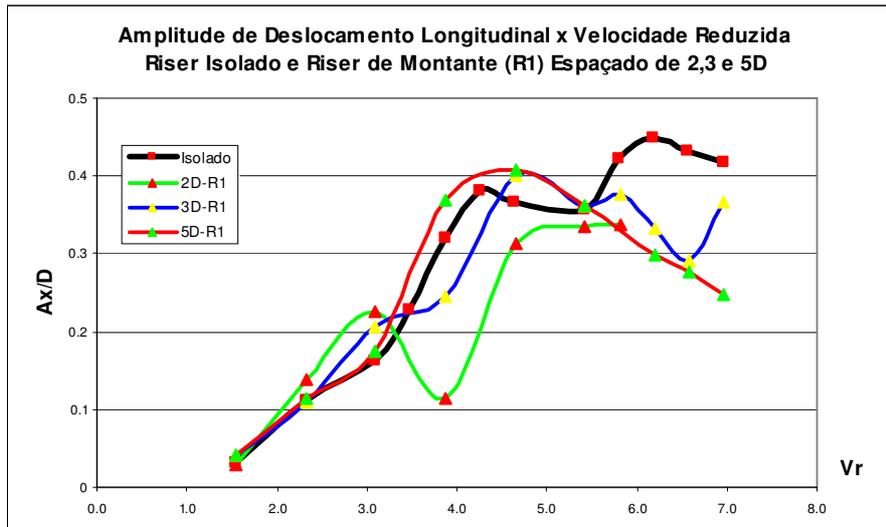


Figura 3.155- Amplitude Adimensional Longitudinal em Função da Velocidade Reduzida para Diferentes Espaçamentos.

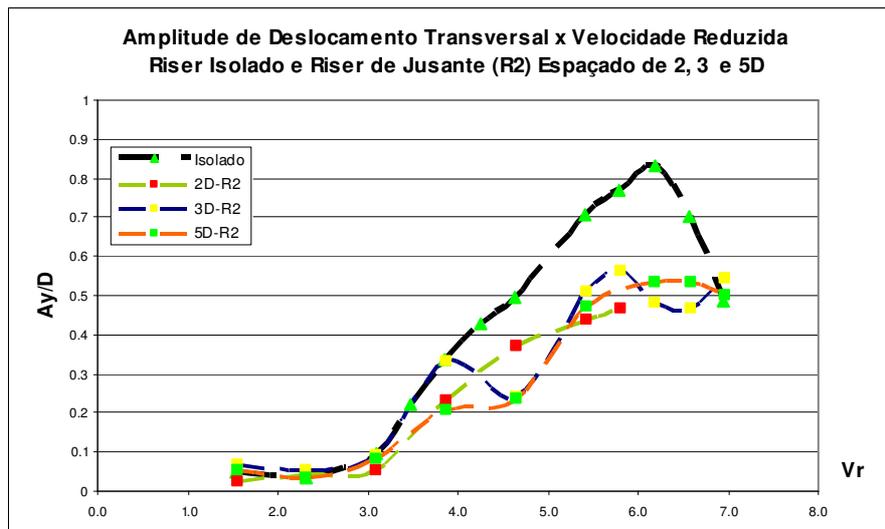


Figura 3.156- Amplitude Adimensional Transversal do *Riser 2* (Jusante) em Função da Velocidade Reduzida para Diferentes Espaçamentos.

Analisando os resultados pode-se observar que:

- na direção longitudinal há uma redução da amplitude de vibração para o *riser 2* (jusante). Já para o *riser 1* (montante) não há redução significativa, comportando-se como um *riser* isolado;
- para o *riser 1*, na direção longitudinal, há uma tendência de redução da amplitude de vibração quando o espaçamento é igual a 2D;
- para o *riser 2*, na direção longitudinal, há uma tendência de de redução da amplitude de vibração quando o espaçamento é igual a 5D;
- na direção transversal, pode-se observar que as amplitudes das vibrações do *riser 2* não irão se alterar significativamente devido ao espaçamento;

As Figuras 3.157 e 3.158 apresentam, respectivamente, como se comportam os coeficientes de arrasto médios em função do espaçamento para os modelos 1 e 3 e para diferentes números de Reynolds.

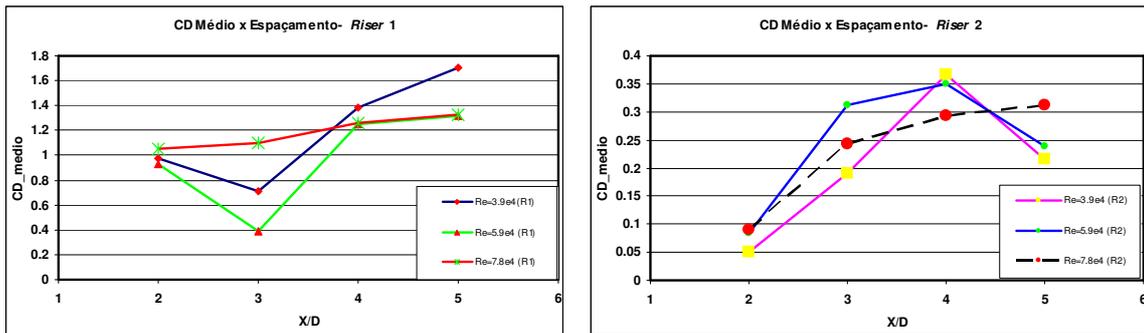


Figura 3.157- Coeficiente de Arrasto Médio em Função do Espaçamento para Modelo 1.

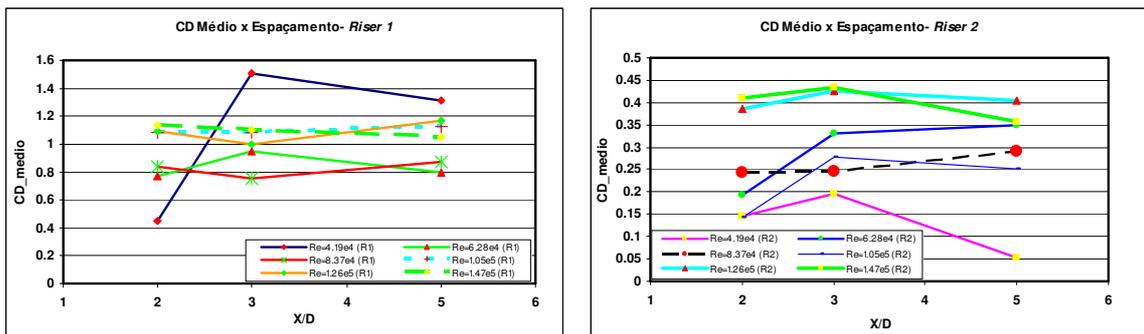


Figura 3.158- Coeficiente de Arrasto Médio em Função do Espaçamento para Modelo 3.

Analisando os resultados, pode-se observar que:

- O coeficiente de arrasto médio do *riser 1* (montante) será sensível ao espaçamento relativo somente para as menores velocidades, como se pode observar para o modelo 1 e a velocidade mais baixa do modelo 3. Para as velocidades mais elevadas, o comportamento pode ser considerado como linear e constante, isto é, não há sensibilidade ao espaçamento para os casos estudados.
- O coeficiente de arrasto médio do *riser 1* sempre será maior que o do *riser 2*, isto mostra a existência do efeito de sombra mencionado por Huse, na referência [12]. Pode-se observar que este efeito tende a ser mais expressivo para um espaçamento de 2D e para menores números de Reynolds.

CAPÍTULO 4

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO DE FLUIDO AO REDOR DE *RISERS*

4.1 Introdução

No Capítulo anterior, foram apresentados os resultados dos estudos experimentais, visando determinar qual será o efeito da interação hidrodinâmica para dois *risers* alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5D, quando submetidos a diferentes velocidades de escoamento na interferência dos mesmos.

Como os estudos experimentais são complexos e de alto custo, o que os torna inviáveis para o uso como uma ferramenta de projeto, foi feita ao longo deste trabalho, uma verificação do uso do método da dinâmica dos fluidos computacional, conhecido na literatura pela sigla em inglês como CFD (*Computational Fluid Dynamic*), para obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos que deverão ser usados nos programas de análise global para simulação da interferência entre os *risers*. Neste caso, o CFD torna-se uma ferramenta útil.

Ao longo deste Capítulo, serão descritas as metodologias usadas para a realização dos estudos numéricos, executados com o programa CFX, que é um programa para análise da dinâmica dos fluidos da ANSYS; uma breve descrição do programa está apresentada no Anexo E. Estes estudos consistiram na construção de um modelo em 2D, isto é, o domínio fluido possui uma pequena espessura quando comparada as dimensões no plano do escoamento, associado à consideração de um modelo de turbulência, para levar em conta a turbulência na região em torno do *riser* e na região à jusante deste, isto é, na esteira gerada pelos vórtices. Visando identificar se há necessidade de um modelo de turbulência, e quanto os resultados de uma simulação 2D divergem de uma simulação 3D, foram realizados os seguintes estudos paramétricos:

- Avaliação do regime de escoamento e da necessidade do uso de modelos de turbulência, isto é, foram feitas simulações considerando escoamento laminar e turbulento.
- Avaliação do uso de um modelo de transição entre os regimes laminar e turbulento na camada limite.
- Comparação dos resultados de uma simulação 3D para um riser isolado com os obtidos com para as simulações 2D.

Complementando os estudos, foi feita uma avaliação do comprimento da esteira, isto é, determinação da distância a partir do *riser* de montante, em que não há mais efeito de sombra.

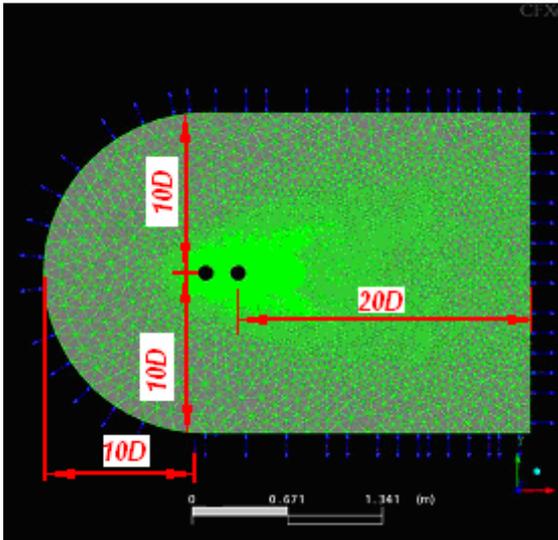
Por último, visando obter resultados numéricos mais próximos da realidade física, foram feitas análises considerando uma interação fluido-estrutura (FSI) expedita em 2D, isto é, os *risers* irão se mover de acordo com o campo de pressões do fluido com uma rigidez e massa associadas de forma a reproduzir a frequência natural do *riser*.

É importante salientar, que os valores elevados do número de Reynolds estudados ao longo deste trabalho, geram elevada intensidade de turbulência na região de descolamento da camada limite, o que em uma simulação 2D irá conduzir a resultados aproximados. Contudo, nos permitirá de forma qualitativa avaliar o comportamento dos coeficientes hidrodinâmicos quando há um *riser* totalmente imerso na esteira de outro *riser* localizado a montante. Os resultados obtidos no estudo paramétrico serão comparados aos resultados disponíveis na literatura e aos resultados experimentais obtidos do NMRI, no que se refere ao coeficiente de arrasto médio.

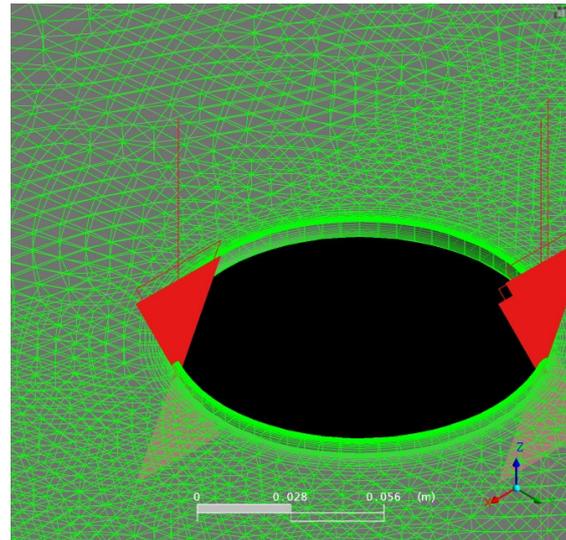
Inicialmente, foi modelado um único *riser* e, posteriormente, dois *risers* espaçados de 2, 3, 4 e 5D e submetidos às seguintes velocidades de escoamento: 0.5, 1.0, 1.5 e 2.0 m/s.

4.2 Descrição da Modelagem Numérica

Foi usada uma modelagem 2D, apesar de o domínio fluido, ver Figura 4.1, possuir uma espessura de $1/20$ do diâmetro do *riser*, o que resultou na geração de somente um elemento de volume finito na direção perpendicular ao escoamento. Conforme está mostrado na Figura 4.1, as dimensões do domínio fluido estão parametrizadas em relação ao diâmetro do *riser*, de forma que não haja efeito de borda, sendo adotada uma distância igual a 10D a montante do *riser* 1, 20D a jusante do *riser* 2 e 10D para direita e esquerda dos *risers*.



Vista de topo da Malha



Detalhe na região do *Riser* (Perspectiva)

Figura 4.1- Dimensões do Domínio Fluido e Detalhe da Malha de Volumes Finitos na Região do *Riser* para o caso de um Espaçamento Horizontal de 2D e Alinhados.

Conforme pode ser observado na Figura 4.1, a malha foi refinada em torno dos *risers*, onde há a camada limite e o descolamento da mesma, e na região posterior dos *risers*, onde ocorrem suas respectivas esteiras; fora desta região de interesse, foi gerada uma malha menos refinada com o objetivo de reduzir o esforço computacional. Como parâmetro de controle dos resultados em função das dimensões da malha, foi adotada a raiz da média quadrática (RMS) do número de Courant (NC), que é um adimensional dado pela expressão (4.1):

$$NC = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \quad (4.1)$$

onde:

U : Velocidade de escoamento do fluido (m/s).

Δt : Intervalo de tempo usado para integração do algoritmo de solução.

Δx : Dimensão do volume finito na direção do fluxo.

Como recomendado na referência [32], o valor do RMS do número de Courant deverá ser mantido em torno de 1, embora o algoritmo de solução do programa CFX use o método implícito que não requer número de Courant tão pequeno para manter a

estabilidade da análise. O intervalo de tempo (Δt) pode ser alterado ao longo da análise, de forma que o usuário pode ter controle sobre o RMS do número de Courant.

Para o modelo mostrado na Figura 4.1, a malha é constituída de 22479 nós e 19670 elementos, distribuídos em 17110 elementos tetraédricos e 2560 elementos hexaédricos. Os elementos hexaédricos estão distribuídos na região em torno dos *risers*. Quanto às condições de contorno adotadas na modelagem, tem-se:

- Parede (*Wall*, ver referência [32]) : esta condição foi adotada em torno dos *risers*, na qual não há deslizamento, isto é, tensão de cisalhamento infinita e velocidade nula na parede;
- Entrada (*Opening*, ver referência [32]) : esta condição foi adotada na face arredondada com raio igual a $10D$ e localizada à montante do riser, ver Figura 4.1; nesta face, foram prescritos campos de velocidades e pressões ($u = U$ m/s, $v = 0$ m/s, $w = 0$ m/s e $p = 0$ Pa);
- Saídas (*Opening*, ver referência [32]) : esta condição foi adotada nas faces laterais e posterior (jusante do *riser* 2); nestas faces, os campos de velocidades e pressões são iguais aos valores resultantes ao longo da simulação;
- Simetria (*Symmetry*, ver referência [32]) : esta condição foi adotada na face inferior e superior do domínio fluido; nestas faces a velocidade normal à face, isto é, componente w é nula e as velocidades no plano do escoamento, isto é, as componentes u e v são iguais aos valores resultantes ao longo da simulação. É importante salientar, que esta condição simula uma continuidade do modelo, reduzindo desta forma os erros advindos da existência de somente um elemento na direção perpendicular ao escoamento.

O *riser* inicialmente foi considerado como fixo, isto é, foi feito um furo no domínio fluido com diâmetro de 0.114 m, igual ao diâmetro do tubo de PVC (modelo 3) usado nos estudos experimentais e com condições de contorno de parede, como explicado anteriormente; para esta condição, os coeficientes hidrodinâmicos obtidos irão refletir somente o resultado dos campos de velocidades e pressões do fluido devido à perturbação provocada pela presença do *riser* no escoamento.

As características físicas adotadas para a água doce nas análises numéricas, estão descritas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1- Propriedades Físicas da Água Doce.

ρ	1000 [kg/m ³]
μ	1.0061 x 10 ⁻³ [Pa s]
ν	1.0061 x 10 ⁻⁶ [m ² /s]

4.3 Descrição dos Estudos Paramétricos Numéricos

Visando avaliar o uso da metodologia da dinâmica dos fluidos computacional para estabelecer uma tendência qualitativa dos coeficientes hidrodinâmicos gerados pela passagem do escoamento ao redor de 1 e 2 *risers* alinhados, foram feitos ao longo deste trabalho vários estudos paramétricos considerando diferentes espaçamentos (2D, 3D, 4D e 5D) e submetidos a diferentes velocidades de escoamento de 0.5, 1.0, 1.5 e 2.0 m/s, o que resulta em uma variação do número de Reynolds de 5.68×10^4 a 2.27×10^5 , considerando a viscosidade cinemática apresentada na Tabela 4.1.

Além da avaliação dos coeficientes hidrodinâmicos para os diferentes arranjos e diferentes números de Reynolds, conforme mencionado no parágrafo anterior, também foram feitos estudos paramétricos considerando um *riser* isolado, para avaliar a necessidade do uso de um modelo de turbulência, isto é, foi feito um estudo considerando o escoamento como laminar para as velocidades 0.5, 1.0, 1.5 e 2 m/s e comparados com os resultados considerando o uso de um modelo de turbulência. Inicialmente, foi utilizado o modelo denominado de SST (*Shear Stress Transport*), incorporando-se ao estudo uma avaliação da necessidade do uso de um modelo de transição entre os regimes laminares e o turbulento na camada limite, denominado de modelo gama-teta.

É importante salientar que o uso do modelo de turbulência SST, é um artifício numérico baseado em formulações semi-empíricas para resolver os problemas que envolvem escoamento turbulento, em que há a presença de vórtices de alta frequência e pequena escala, obtendo-se resultados os mais fidedignos possíveis e com um custo computacional aceitável.

Caso fosse viável computacionalmente, a solução numérica da equação de Navier-Stokes sem o uso destes modelos de turbulência, por si só já reproduziria o comportamento físico real, mesmo para escoamento com elevada intensidade de

turbulência, sendo esta metodologia denominada na literatura de SND (Simulação Numérica Direta), ver referência [33]. Nesta referência, são apresentados os cálculos para determinação das dimensões da malha para capturar todas as escalas dos vórtices desprendidos, isto é, o intervalo de frequências dos vórtices que por sua vez expressa as dimensões destes. A formulação a seguir, permite determinar o número de elementos da malha do domínio fluido:

$$N_{GL} = \left(\frac{L}{L_d} \right)^3 = \text{Re}_L^{9/4} \quad (4.2)$$

Onde:

L : Maior escala presente no domínio fluido; no caso do escoamento em torno do *riser*, é dado pelo seu diâmetro;

L_d : Menor escala de vórtice presente no escoamento; no caso, corresponde ao vórtice de maior frequência e menor dimensão.

Para os casos simulados, caso fosse usada a metodologia denominada SND, teríamos as quantidades de nós e dimensões de malha apresentadas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2- Números de Elementos de uma Malha em Função do Número de Reynolds e Dimensão do Menor Elemento da Malha.

Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	Quantidade de Nós ⁽¹⁾	L_d (mm) ⁽²⁾
0.5	5.68E+04	5E+10	3.1E-05
1	1.14E+05	2.4E+11	1.8E-05
1.5	1.70E+05	5.9E+11	1.4E-05
2	2.27E+05	1.1E+12	1.1E-05

Notas:

1) Caso o método de solução seja implícito e simulação seja 3D, esta quantidade de nós será multiplicada por 4 (u, v, w e p), para obtermos o número de equações.

2) Para a determinação do menor elemento da malha, foi considerada a dimensão do maior vórtice como o diâmetro da estrutura, no caso igual a 0.114 m.

Os números da Tabela 4.2 nos mostram a inviabilidade de uma simulação numérica direta (SND), apesar do avanço atual dos computadores. Conforme será apresentado no item 4.4.1.2, as dificuldades para simular um escoamento 3D usando a metodologia simplificada, isto é, empregando os modelos de turbulência mencionados anteriormente, são inúmeras.

O modelo de turbulência SST, de acordo com as referências [34], [35] e [36], representa bem o comportamento do escoamento ao redor de corpos rombudos (no inglês, são denominados de *Bluff Body*), como os *risers*, nos quais ocorre o fenômeno da formação e descolamento da camada limite. Uma breve descrição do modelo SST, e do modelo de transição do regime laminar para o turbulento para a camada limite, denominado de gama-teta, encontra-se no Anexo F deste trabalho.

4.4 Resultado dos Estudos Paramétricos usando a metodologia CFD para um *Riser* Isolado

Conforme mencionado anteriormente, os resultados numéricos obtidos com uma simulação 2D são aproximados já que um escoamento turbulento, mesmo que ao longe este seja planar, terá componentes no campo de velocidade na direção perpendicular ao plano do escoamento, conforme pode ser visto na formulação apresentada no Anexo F. Isto irá afetar as componentes do tensor de Reynolds em que há o termo turbulento na direção perpendicular ao escoamento, isto é, nos termos $u'w' = v'w' = w'w' = 0$.

Como forma de validarmos os resultados obtidos nestes estudos, os mesmos serão comparados com os resultados disponíveis na literatura e com os valores de coeficientes de arrasto médios obtidos nos estudos experimentais conduzidos junto ao NMRI. Inicialmente, serão apresentados os resultados para um riser isolado e, posteriormente, os resultados para 2 risers alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5D. Os estudos numéricos foram realizados para as seguintes velocidades de escoamento: 0.5, 1, 1.5 e 2 m/s, o que resultou nos números de Reynolds mencionados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3- Velocidades e Números de Reynolds Simulados.

Velocidade (m/s)	Número de Reynolds
0.5	5.68E+04
1	1.14E+05
1.5	1.70E+05
2	2.27E+05

4.4.1 *Riser* Isolado Usando Modelagem 2D

Com o programa CFX, é possível verificarmos a extensão da esteira dos vórtices, como está mostrado na Figura 4.2, na qual é mostrado um iso contorno da

vorticidade ao longo da esteira e um detalhe dos vórtices a jusante do *riser*, isto é, na região próxima ao ponto de descolamento. Outra informação importante que se pode obter das análises numéricas é a localização e, conseqüentemente, o ângulo em que há o descolamento da camada limite. Isto terá um forte reflexo no comportamento hidrodinâmico e, conseqüentemente, na interferência entre os *risers*, já que esta variação terá impacto no deslocamento longitudinal (*in line*) do *riser*. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam, respectivamente, uma representação por vetores do campo de velocidades em torno do *riser* mostrando detalhes da camada limite com os pontos de deslocamento e de estagnação e detalhes dos pontos de descolamento na região superior e inferior, onde se pode observar exatamente os pontos nos quais os gradientes de velocidades tornam-se adversos, provocando o descolamento da camada limite [37].

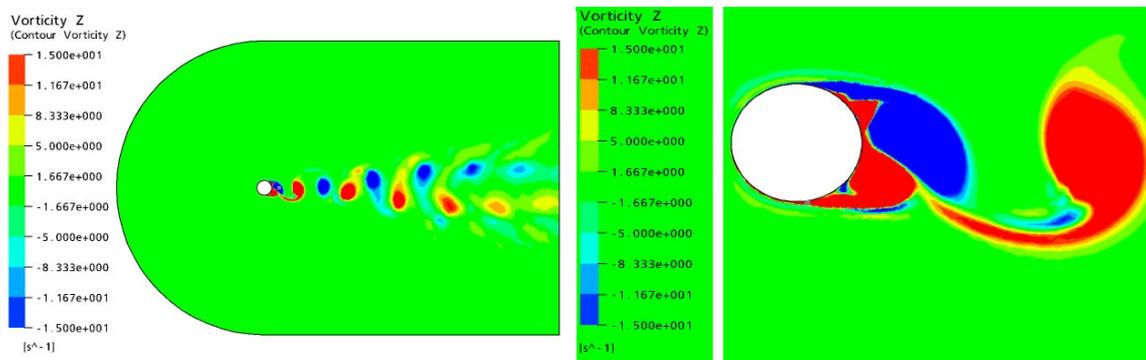


Figura 4.2- Mapa de Iso- contorno da Vorticidade para Escoamento em torno de um Riser com Velocidade de 1m/s.

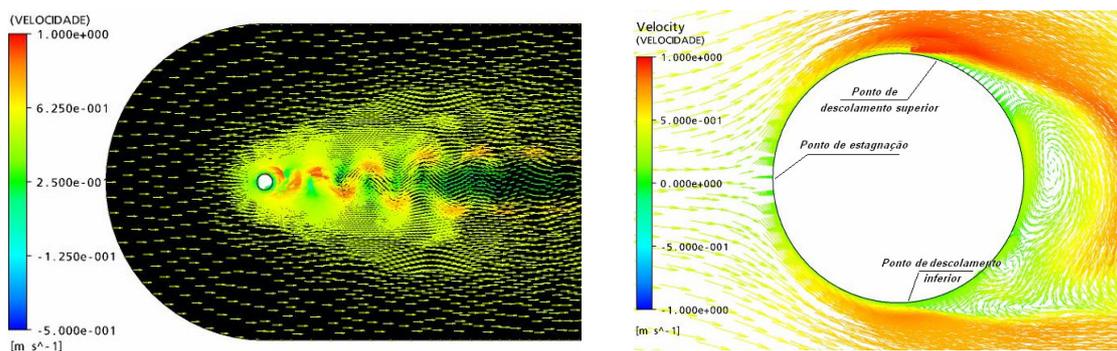


Figura 4.3- Campo de Velocidades no Domínio Fluido em torno do *Riser*- Velocidade de escoamento de 0.5 m/s.

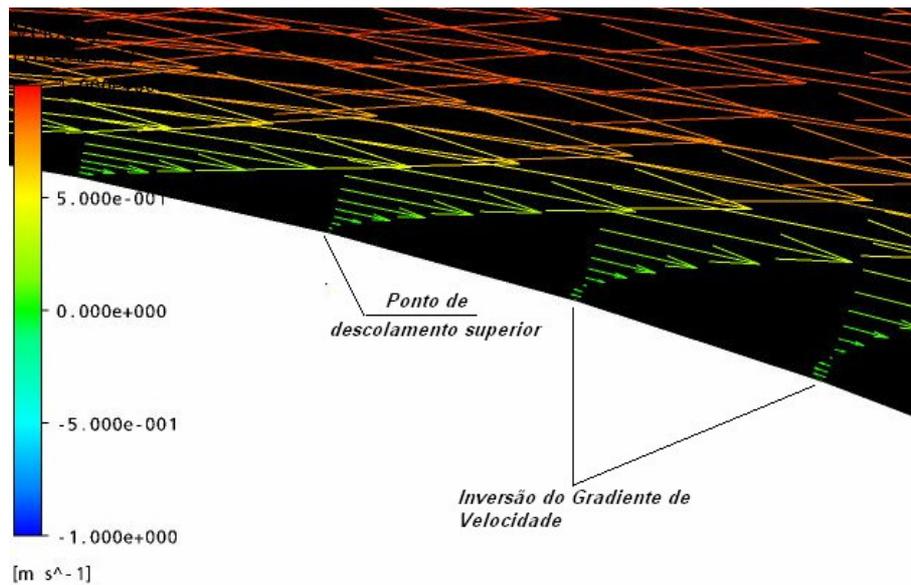


Figura 4.4 A- Detalhe do Ponto de Descolamento da Camada Limite na Parte Superior do Riser.

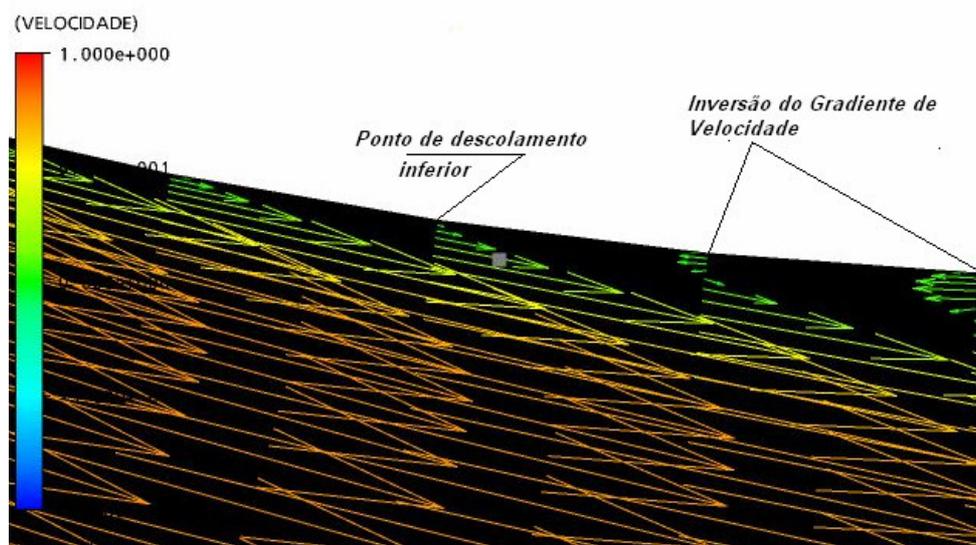


Figura 4.4 B- Detalhe do Ponto de Descolamento da Camada Limite na Parte Inferior do Riser.

A partir da Figura 4.3 e observando-se os detalhes apresentados na Figura 4.4 A/B, tem-se que não haverá simetria do ponto de deslocamento superior e inferior, e também não haverá sincronismo no instante em que há o descolamento.

Todas as variáveis, tais como pressão, velocidade, vorticidade etc, são previamente definidas pelo usuário e armazenadas nos arquivos transientes (*.trn) durante a simulação, permitindo obter todas as informações que se deseja no domínio fluido ao longo da simulação.

Tabela 4.4- Ângulo de Descolamento, medido conforme Figura 4.5.

Tempo (s)	α_S (graus)	α_I (graus)
12	95.6	109.7
15	104.1	90
20	101.6	95.6

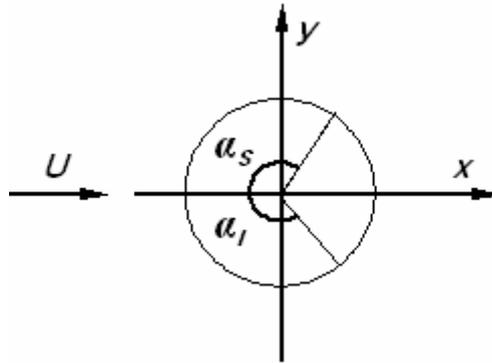


Figura 4.5- Referência para Medição dos Ângulos de Descolamento.

4.4.1.1 Estudos Paramétricos para Riser Isolado

Os coeficientes hidrodinâmicos foram obtidos nas simulações numéricas a partir das séries temporais das componentes das forças adimensionalizadas nas direções x (f_D) e y (f_L), obtidas através da integração do campo de pressões, usando-se as equações:

$$f_D = \frac{F_{-x}(\text{)@cilindro}}{\frac{1}{2}\rho.U^2.D.L} \quad (4.3)$$

$$f_L = \frac{F_{-y}(\text{)@cilindro}}{\frac{1}{2}\rho.U^2.D.L} \quad (4.4)$$

onde:

$F_{-x}(\text{)@cilindro}$: Comando usado no programa CFX, para a determinação da força na direção x, obtida através da integração do campo de pressão em torno do riser.

$F_{-y}(\text{)@cilindro}$: Comando usado no programa CFX, para a determinação da força na direção y, obtida através da integração do campo de pressão em torno do riser.

4.4.1.1.1 Definição do Regime de Escoamento

Não há na literatura para escoamento externo ao redor de cilindros, como os *risers*, uma definição clara a partir de qual número de Reynolds, o regime de escoamento será laminar ou turbulento na região que o circunda. A Tabela 3.1 apresentada no Capítulo 3, obtida na referência [23], apresenta uma definição do regime de escoamento da camada limite e na região da esteira próxima do ponto de descolamento, mostrando que para $Re < 2 \times 10^5$, estas regiões se comportam como laminar.

Visando avaliar se há necessidade do uso nas simulações numéricas de um modelo de turbulência, foram realizadas algumas análises considerando os escoamentos como laminares e como turbulento, usando-se o modelo de turbulência SST.

As Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 mostram as séries temporais das forças adimensionalizadas nas direções x e y, obtidas nas simulações considerando os dois regimes de escoamento mencionados no parágrafo anterior.

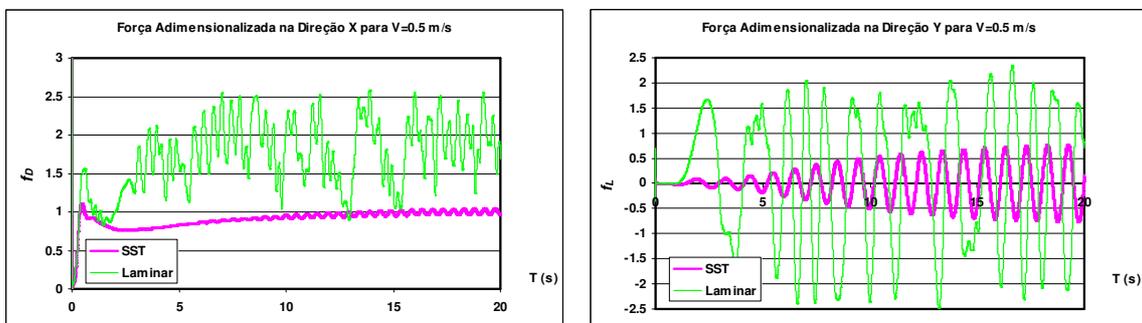


Figura 4.6- Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 0.5 m/s.

A partir das séries temporais da Figura 4.6 obtêm-se os valores dos coeficientes de arrasto (C_D), através dos valores médios das séries temporais das forças adimensionalizadas na direção x (f_D) nos trechos estabilizados, e os valores dos coeficientes de sustentação (C_L), através da determinação das raízes média quadráticas (RMS) das séries temporais das forças adimensionalizadas na direção y (f_L) nos trechos estabilizados. Os valores de C_D e C_L estão apresentados na Tabela 4.5:

Tabela 4.5- Comparação dos Valores de C_D e C_L , considerando Regime Laminar e Turbulento associado ao Modelo SST- Velocidade de 0.5m/s.

Coeficientes Hidrodinâmicos	Regime de Escoamento	
	Laminar	Turbulento-SST
C_D	1.747	0.994
C_L	1.355	0.521

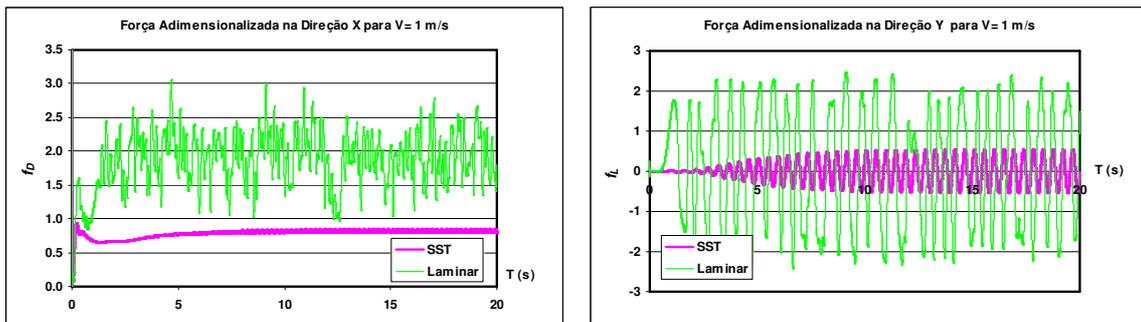


Figura 4.7- Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 1 m/s.

A partir das séries temporais da Figura 4.7, da mesma forma descrita anteriormente, obtêm-se os valores dos coeficientes de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L), apresentados na Tabela 4.6:

Tabela 4.6- Comparação dos Valores de C_D e C_L , considerando Regime Laminar e Turbulento associado ao Modelo SST - Velocidade de 1m/s.

Coeficientes Hidrodinâmicos	Regime de Escoamento	
	Laminar	Turbulento-SST
C_D	1.876	0.821
C_L	1.469	0.378

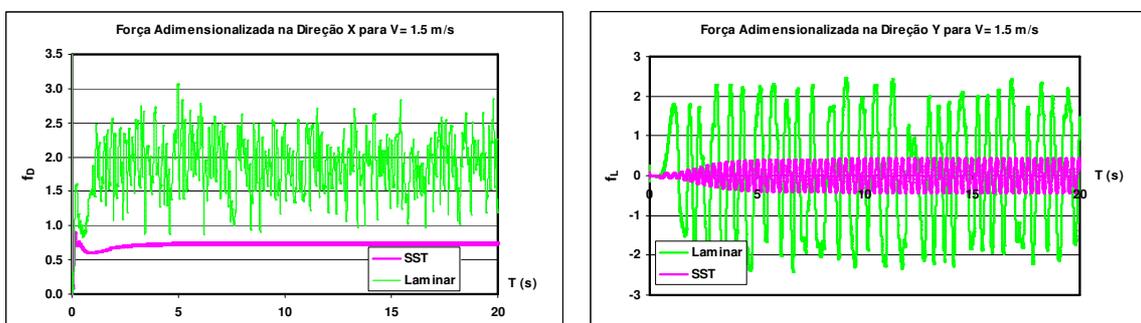


Figura 4.8- Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 1.5 m/s.

A partir das séries temporais da Figura 4.8, da mesma forma descrita anteriormente, obtém-se os valores dos coeficientes de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L), apresentados na Tabela 4.7:

Tabela 4.7- Comparação dos Valores de C_D e C_L , considerando Regime Laminar e Turbulento associado ao Modelo SST - Velocidade de 1.5m/s.

Coeficientes Hidrodinâmicos	Regime de Escoamento	
	Laminar	Turbulento-SST
C_D	1.876	0.740
C_L	1.469	0.299

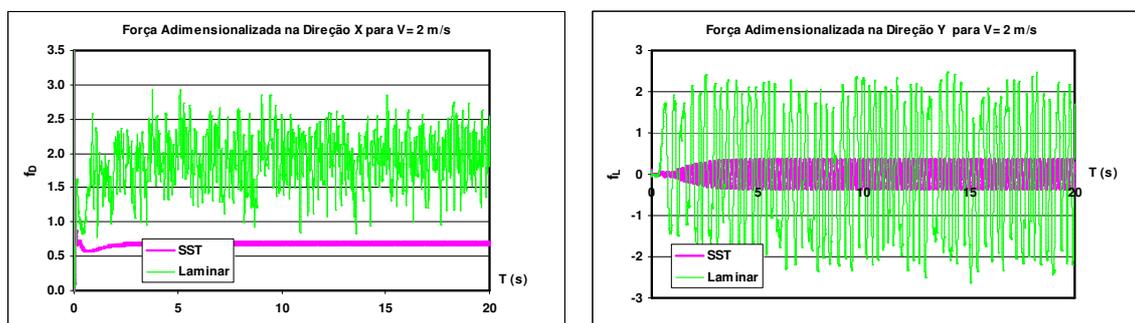


Figura 4.9- Séries Temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Escoamento Laminar e Turbulento com Modelo SST - Velocidade de 2 m/s.

A partir das séries temporais da Figura 4.9, da mesma forma descrita anteriormente, obtém-se os valores dos coeficientes de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L), apresentados na Tabela 4.8:

Tabela 4.8- Comparação dos Valores de C_D e C_L , considerando Regime Laminar e Turbulento associado ao Modelo SST - Velocidade de 2m/s.

Coeficientes Hidrodinâmicos	Regime de Escoamento	
	Laminar	Turbulento-SST
C_D	1.851	0.688
C_L	1.404	0.253

Analisando as séries temporais obtidas, pode-se verificar que não há estabilidade quando consideramos o regime de escoamento como laminar, mesmo para um número de Reynolds menor do que 2×10^5 . Isto nos leva a concluir da necessidade do uso de um modelo de turbulência, conclusão ratificada quando se observa que os valores dos coeficientes de arrasto médio e dos coeficientes de sustentação não se ajustam com os valores previstos na literatura para os mesmos se considerássemos o escoamento como laminar, conforme pode ser visto nas Figuras 4.10 e 4.11. A Figura 4.10, obtida a partir

da referência [38], mostra que os coeficientes de arrasto médios usando o modelo de turbulência SST se aproximam melhor dos resultados encontrados na literatura do que se considerassemos o escoamento como laminar. A Figura 4.11, obtida a partir da referência [39], mostra que os valores dos coeficientes de sustentação quando usamos o modelo de turbulência se ajustam bem aos resultados encontrados na literatura; já para um escoamento laminar os pontos estão fora da escala do gráfico da Figura 4.11.

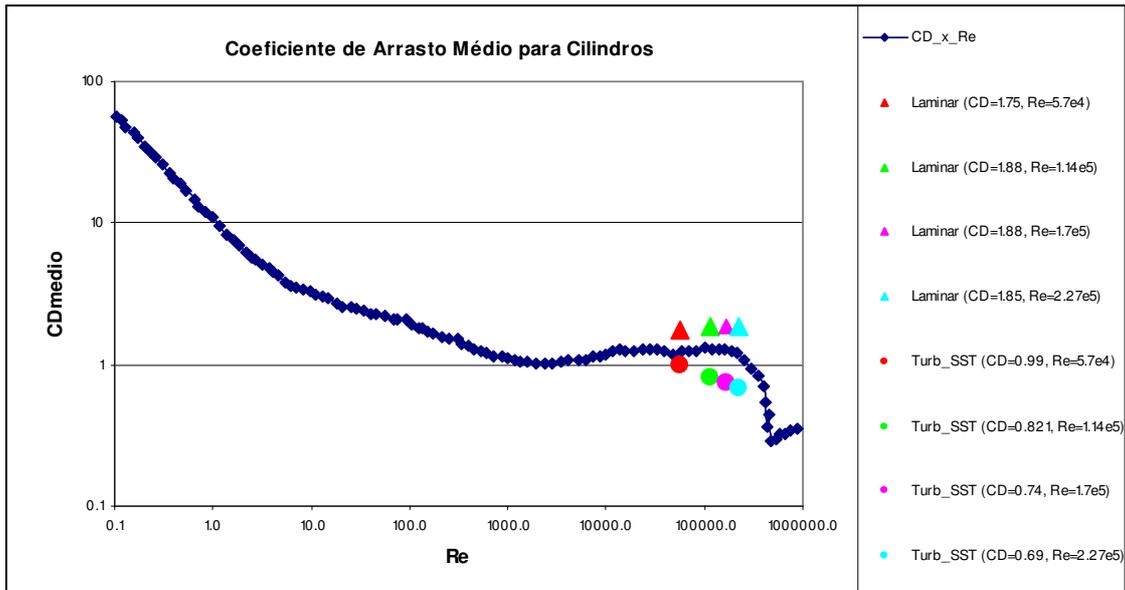


Figura 4.10- Comparação dos Coeficientes de Arrasto Médios para *Risers* com Escoamento Turbulento, usando modelo SST, e Laminar.

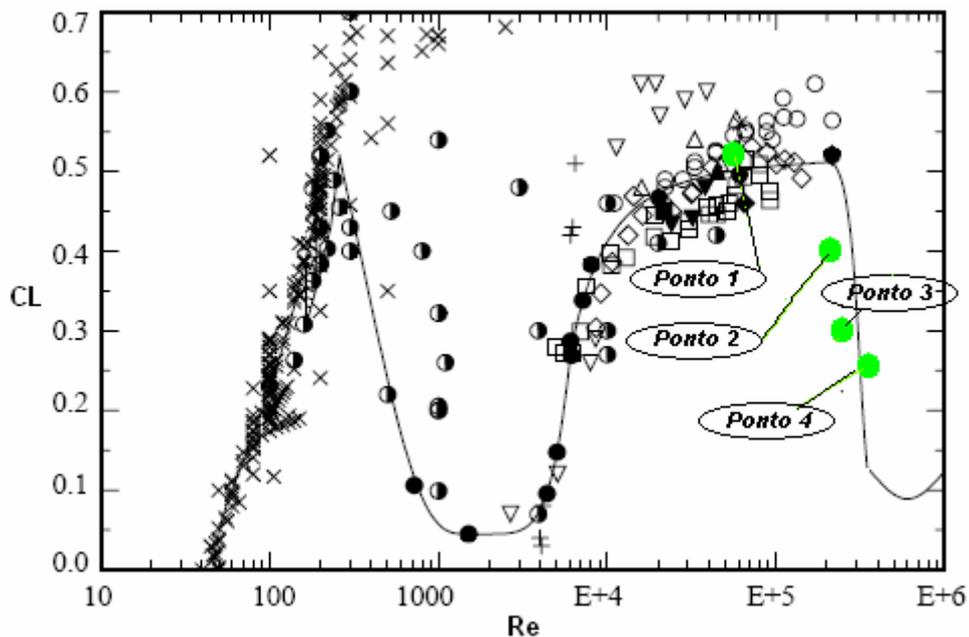


Figura 4.11- Comparação dos Coeficientes de Sustentação para *Risers* com Escoamento Turbulento, usando modelo SST, e Laminar.

Nota: Na Figura 4.11 os pontos 1, 2, 3 e 4 correspondem, respectivamente aos pares ordenados (número de Reynolds, CL) para velocidades de 0.5, 1, 1.5 e 2 m/s para o escoamento com modelo de turbulência SST.

4.4.1.1.2 Ajuste no Modelo de Turbulência

Conforme mostrado no item anterior, há necessidade do uso de um modelo de turbulência nas simulações usando a metodologia de CFD; dentre os modelos disponíveis no programa CFX versão 10, que foi usado para compararmos com o escoamento laminar, há o modelo denominado SST (*Shear Stress Transport*), cujos detalhes e suas respectivas formulações encontram-se no anexo E. Baseado nas referências [34], [35] e [36], que indicam este modelo quando há descolamento da camada limite, foi verificado neste estudo se havia necessidade do uso de um modelo para consideração da transição da camada limite de laminar para turbulento.

A Tabela 4.9 mostra os valores dos coeficientes de arrasto médios e os coeficientes de sustentação para as seguintes situações:

- Modelo de turbulência SST.
- Modelo de turbulência SST associado com um modelo de transição de escoamento laminar para turbulento na camada limite, denominado de Gama-teta ($\gamma\text{-}\theta$) [31].

Tabela 4.9- Coeficientes Hidrodinâmicos Considerando Modelo de Turbulência SST e Modelo de Turbulência Associado ao Modelo de Transição Gama-teta ($\gamma\text{-}\theta$).

Vel. (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\text{-}\theta$	SST	SST com $\gamma\text{-}\theta$
0.5	5.68E+04	0.988	1.629	0.508	1.354
1	1.14E+05	0.820	1.451	0.375	1.242
1.5	1.70E+05	0.739	1.301	0.297	1.157
2	2.27E+05	0.688	1.105	0.253	0.918

Usando-se as Figuras 4.10 e 4.11, apresentadas anteriormente, pode-se constatar que para a faixa de Reynolds simulada, o melhor ajuste será obtido com o modelo SST sem que haja necessidade de um modelo de transição do regime de escoamento da camada limite. Contudo, ao compararmos com os valores dos coeficientes de arrasto obtidos nos ensaios do NMRI, ver Figura 4.12, pode-se constatar que para baixos

valores do número de Reynolds há um bom ajuste somente com o modelo SST; já para valores elevados do número de Reynolds, há necessidade do uso do modelo SST associada com o modelo Gama-teta. Estes resultados estão de acordo com a Tabela 3.1, obtida na referência [23], que indica a transição da camada limite para número de Reynolds na ordem de 2×10^5 .

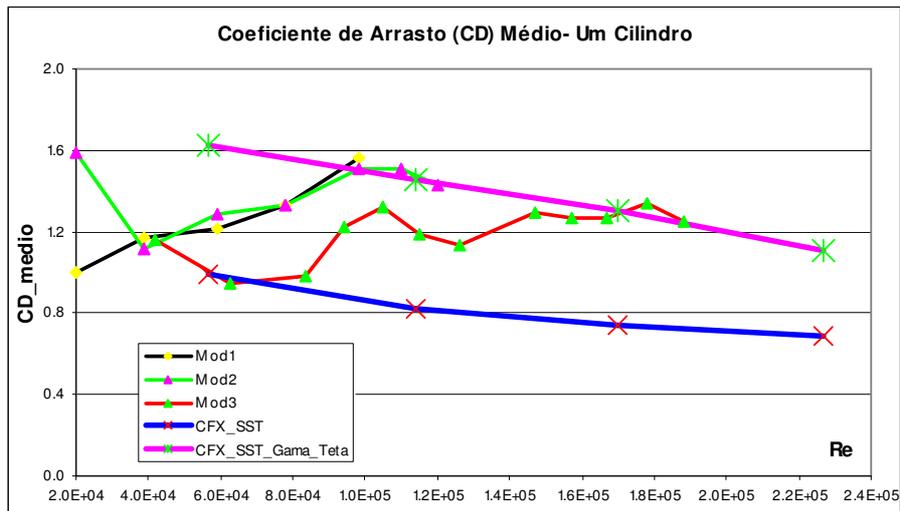


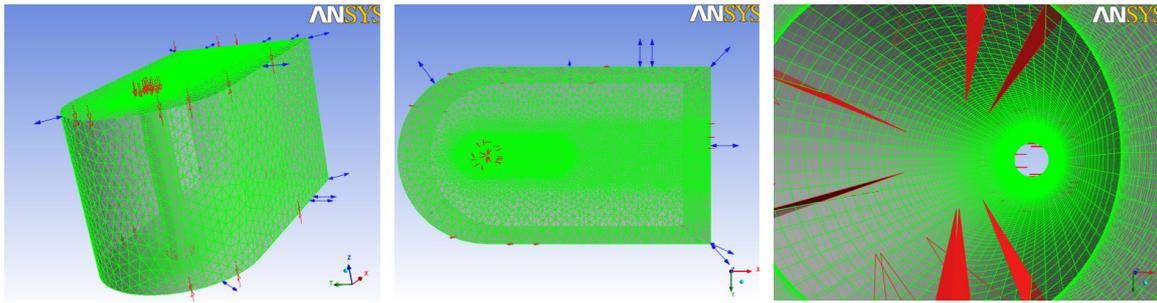
Figura 4.12- Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio (CD) Numérico com os Valores Obtidos Experimentalmente.

4.4.1.2 Comparação das Simulações 2D x 3D

Conforme mencionado anteriormente, para os valores de número de Reynolds estudados, devido ao escoamento se tornar turbulento na região próxima dos pontos de descolamento e na esteira formada a jusante do *riser*, há efeitos nos campos de velocidades e pressões do escoamento devido à tridimensionalidade da turbulência.

Visando quantificar o desvio dos resultados obtidos com as simulações 2D, foram feitas 3 simulações 3D, considerando velocidades de escoamento de 0.5, 1 e 1.5 m/s; estes resultados foram comparados com os resultados da simulação 2 D apresentada anteriormente.

Uma vista geral do modelo adotado na simulação 3D, está apresentada na Figura 4.13; pode-se observar que o comprimento do domínio foi tomado de modo que os efeitos tridimensionais da turbulência estejam bem representados; no caso foi adotado um valor de 20D (vinte vezes o diâmetro).



Vista Geral do Domínio. Vista de Topo do Domínio Detalhe da Malha na Região do Riser.

Figura 4.13 – Detalhe da Malha Usada na Simulação 3D.

A Tabela 4.10 apresenta a estatística da malha usada:

Tabela 4.14- Estatística da Malha.

Número de Nós	979210
Número de Elementos	4.546.763
Tetraedros	4.302.603
Pirâmides	6104
Hexaedros	238056

Conforme é amplamente divulgado na literatura, uma simulação 3D requer grande esforço computacional para a execução destas análises; foi usado um agrupamento de computadores, denominado em inglês de *cluster*, constituído de 3 nós e cada nó, constituído de 4 unidades centrais de processamento (CPU), sendo a memória RAM (*Random Access Memory*) de cada nó igual a 16GB (Gigabytes).

O tempo total de simulação foi em torno de 96 horas (aproximadamente 4 dias), salientando que a análise é para um cilindro isolado e estacionário. Enquanto para o modelo 2D, este tempo ficou em torno de 12 a 16 horas.

Além de um aumento expressivo do tempo de processamento, há os efeitos secundários, tais como, tamanho dos arquivos de armazenamento que enchem os discos rígidos rapidamente e são de difícil manuseio para os programas de pós-processamento.

O pós-processamento da resposta mostra a existência de vorticidade na direção perpendicular ao escoamento, conforme está mostrado na Figura 4.14, sendo esta vorticidade gerada pela turbulência, isto é, a flutuação no campo de velocidades w' .

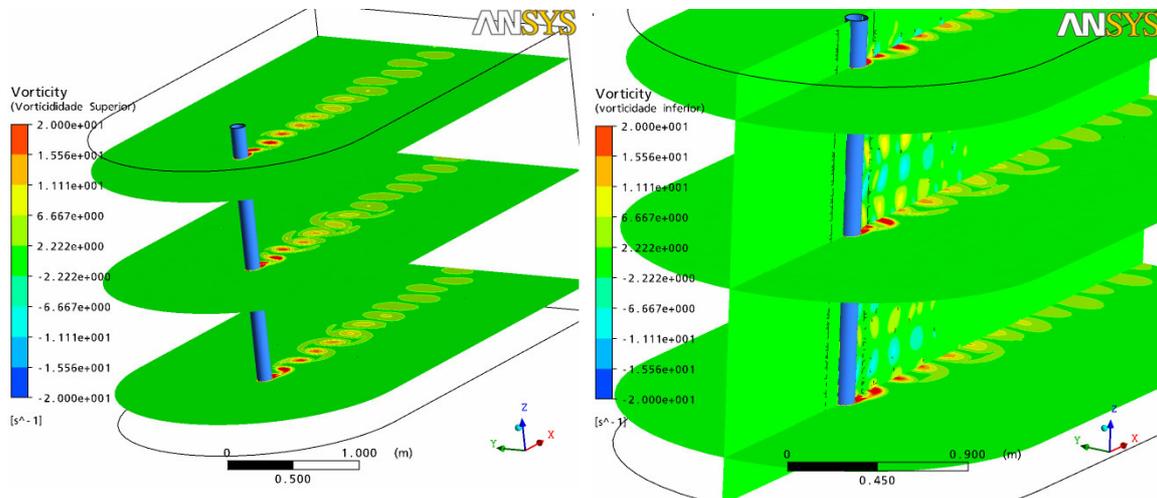


Figura 4.14- Vórtices formados em 3 Planos Horizontais e o Acoplamento com o Plano Vertical.

Esta turbulência no plano vertical é uma das razões para as pequenas diferenças observadas entre os resultados das análises 2D e 3D, apresentados na Tabela 4.15:

Tabela 4.15 – Valores dos Coeficientes de Arrasto Médios e do Coeficiente de Sustentação para Análises 2D e 3D.

Vel. (m/s)	Re	CD		CL	
		2D	3D	2D	3D
0.5	5.68E+04	0.988	0.886	0.508	0.627
1	1.14E+05	0.820	0.638	0.375	0.359
1.5	1.70E+05	0.739	0.521	0.297	0.254

4.4.1.3 Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico do *Riser* Isolado.

Além dos coeficientes hidrodinâmicos apresentados anteriormente, podem-se obter outros parâmetros hidrodinâmicos que irão caracterizar o comportamento hidrodinâmico do *riser*.

Dentre estes parâmetros, tem-se: número de Strouhal numérico (S_{NUM}) e a flutuação do coeficiente de arrasto (CD_{DIN}).

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas nas direções x e y, pode-se obter a resposta espectral e determinar os parâmetros mencionados acima.

As Figuras 4.15 e 4.16, mostram, respectivamente, a série temporal e a resposta espectral na direção transversal e longitudinal para uma velocidade de 1 m/s.

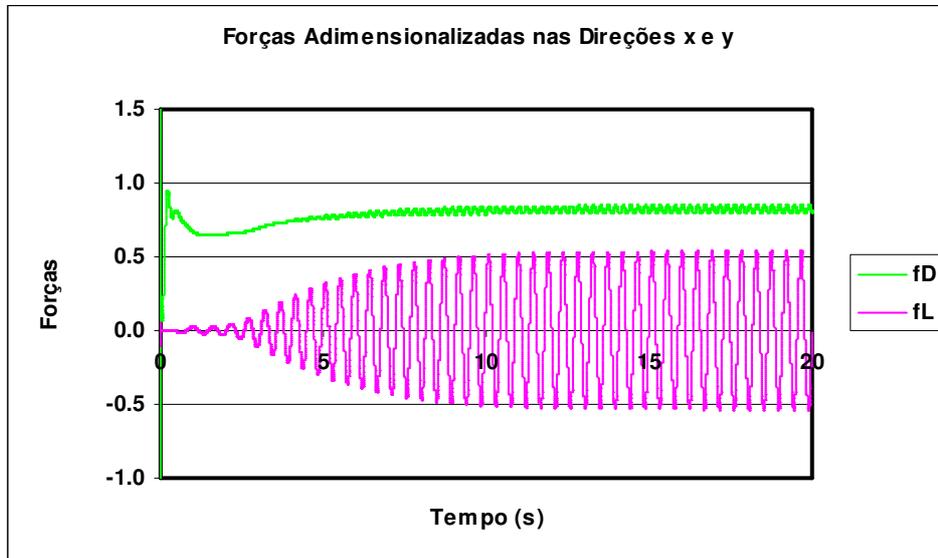


Figura 4.15- Série temporal das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para Velocidade de Escoamento de 1 m/s.

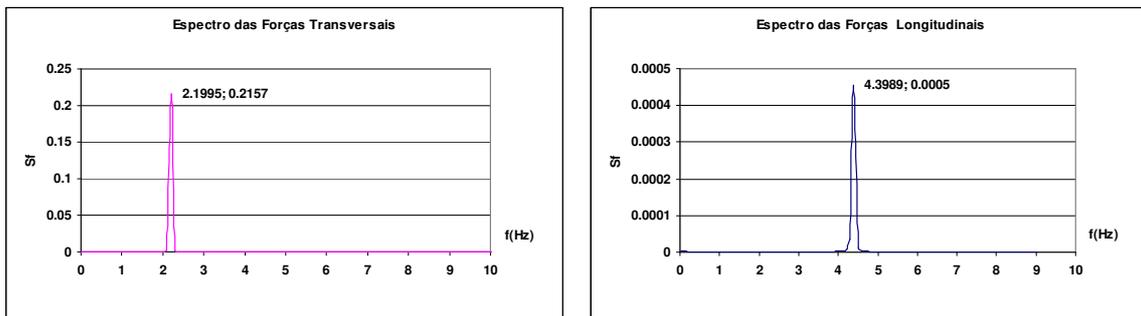


Figura 4.16- Espectro das Forças Adimensionalizadas Transversais (Direção y) e Longitudinais (Direção x) para Velocidade de 1m/s.

A partir da Figura 4.16, tem-se que:

$$f_s = 2.2Hz$$

$$S_{NUM} = \frac{f_s \cdot D}{U} = \frac{2.2 \cdot 0.114}{1} = 0.25 \quad (4.5)$$

Este valor de Strouhal, apesar de elevado, está de acordo com o gráfico apresentado na Figura 3.7, para tubos lisos. É importante salientar que o valor obtido

para o número de Strouhal exprime a frequência em que há o desprendimento dos vórtices para um *riser* fixo sem oscilação, isto é, não ocorre interação fluido-estrutura. Além disso, há o efeito da análise 2D, que tende a aumentar o valor do número de Strouhal, conforme pode ser visto na referência [39] para baixos valores do número de Reynolds. Contudo, o gráfico 3.30 da referência mencionada, mostra uma tendência de estabilização dos valores do número de Strouhal para maiores números de Reynolds.

Também, devemos atentar que a frequência da força longitudinal, é exatamente o dobro da transversal. Contudo, a energia de excitação está concentrada na direção transversal; isto explica a razão de os *risers* apresentarem maiores amplitudes de vibração na direção transversal do que na direção longitudinal quando a frequência de excitação aproxima-se da frequência natural da estrutura.

A partir da série temporal da força adimensionalizada na direção x, pode se observar que ocorre uma pequena variação do coeficiente de arrasto, que representa sua parcela dinâmica. No caso em estudo, é igual a:

$$CD_{DIN} = 0.018$$

4.4.1.4 Análise Crítica dos Resultados para Riser Isolado

A partir dos resultados obtidos nos estudos paramétricos e na comparação de uma simulação 2D com 3D, tem-se:

- Para os números de Reynolds envolvidos no escoamento em torno dos *risers*, o regime de escoamento é turbulento, tornando necessário o uso de um modelo para representar este regime;
- O modelo SST representa bem o comportamento da camada limite e sua transição de laminar para turbulento, sem que haja necessidade da consideração de um modelo de transição da camada limite para os menores valores do número de Reynolds, já para os maiores valores há necessidade do uso do modelo de transição Gama-teta;

- O tempo total de processamento de uma simulação 2D é da ordem de 1/6 da simulação 3D.

Considerando os bons resultados obtidos para um riser isolado, pode-se usar a simulação 2D, associado ao modelo de turbulência SST, para obter os valores dos coeficientes hidrodinâmicos quando há 2 *risers* alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5D, como foi estudado experimentalmente.

4.4.2 Dois Risers Alinhados e Estacionários

As simulações numéricas considerando 2 *risers* alinhados visam obter um melhor entendimento do comportamento dos coeficientes hidrodinâmicos devido ao efeito de esteira, o que é possível obter mesmo considerando o *riser* estacionário.

Para as simulações, foram adotadas as recomendações obtidas a partir dos estudos paramétricos para um riser isolado.

Contudo, como o *riser* de jusante está totalmente mergulhado na esteira turbulenta gerada pelo *riser* de montante, não foi abandonado o uso do modelo de transição da camada limite (modelo gama teta).

4.4.2.1 Espaçamento de 2D

As Tabelas 4.16 a 4.17 apresentam os resultados dos coeficientes hidrodinâmicos para os 2 *risers*, considerando o modelo de turbulência (SST) sem e com transição da camada limite (SST com Gama teta).

Tabela 4.16- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser* 1 (Montante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	0.804	0.737	0.192	0.127
1	1.14E+05	0.940	1.043	0.936	1.097
1.5	1.70E+05	0.850	0.916	0.869	1.017
2	2.27E+05	0.783	0.517	0.815	0.575

Tabela 4.17- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser 2* (Jusante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	-0.226	-0.209	0.257	0.172
1	1.14E+05	0.718	0.728	1.513	1.601
1.5	1.70E+05	0.666	0.722	1.476	1.501
2	2.27E+05	0.616	0.411	1.417	0.854

4.4.2.1.1 Comparação com os Resultados Experimentais

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam uma comparação entre os coeficientes de arrasto médios obtidos nas simulações numéricas para 2 *risers* alinhados e espaçados de 2D, usando o programa CFX, com os obtidos nos estudos experimentais descritos no Capítulo 3.

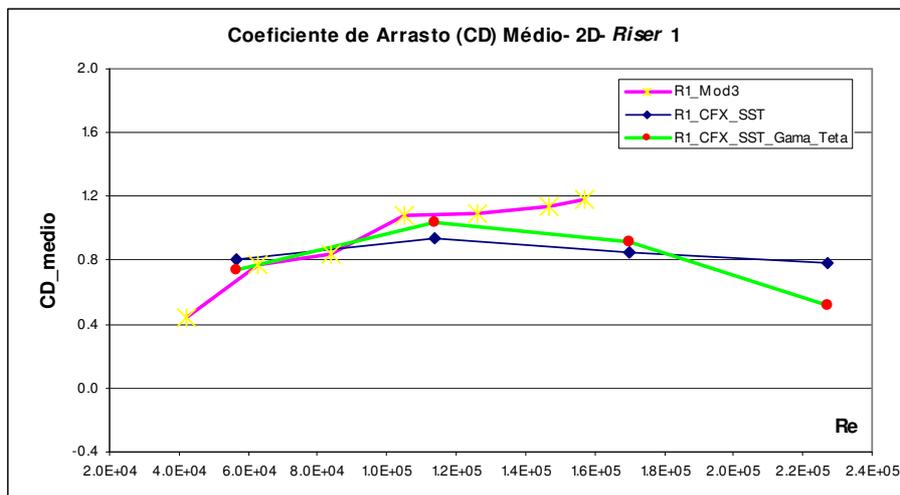


Figura 4.17- Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio Numérico x Experimental – *Riser 1*.

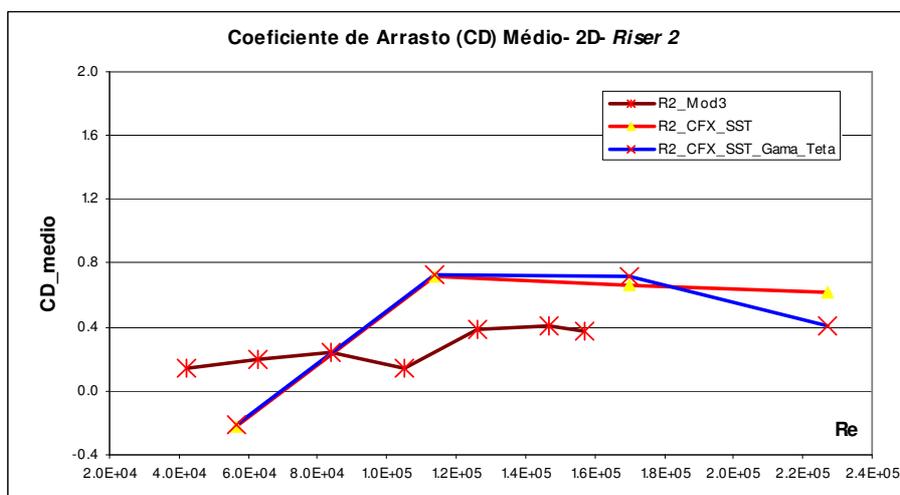


Figura 4.18- Comparação do Coeficiente de Arrasto Médio Numérico x Experimental – *Riser 2*.

Analisando os resultados para este espaçamento, temos que para o *riser* de montante os resultados das simulações numéricas usando o programa CFX, reproduziram bem o comportamento hidrodinâmico. Já para o *riser* de jusante há uma diferença em torno de 60% nos valores obtidos, considerando os valores dos números de Reynolds simulados e pela complexidade da esteira devido à proximidade dos *risers*, pode-se considerar esta diferença obtida como aceitável. Salientando-se, ainda, há um nível de desconhecimento muito grande do comportamento hidrodinâmico para este tipo de arranjo do *risers*. Os resultados numéricos ratificam a existência do efeito de sombra, conforme já havia se concluído no Capítulo 3.

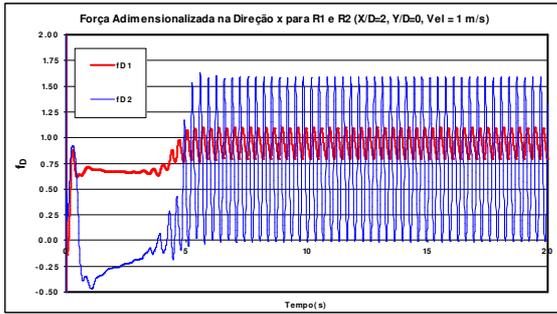
4.4.2.1.2 Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 2D.

Além dos coeficientes hidrodinâmicos apresentados anteriormente, podem-se obter outros parâmetros que irão caracterizar o comportamento hidrodinâmico dos 2 *risers*, aqui constituído pelo efeito do desprendimento dos vórtices associado à esteira formada a jusante do *riser* de montante.

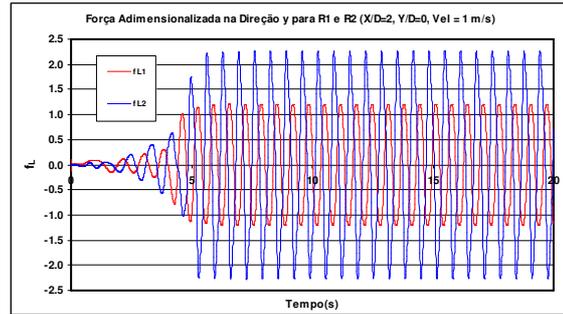
Dentre estes parâmetros, tem-se: número de Strouhal numérico (S_{num}) e a flutuação do coeficiente de arrasto (CD_{DIN}) para os *risers* 1 e 2.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas nas direções x e y, pode-se obter a resposta espectral e determinar os parâmetros mencionados acima.

As Figuras 4.19A/B e 4.20A/B mostram, respectivamente, as séries temporais e as respostas espectrais das forças adimensionalizadas nas direções transversal (y) e longitudinal (x) para os *risers* 1 e 2, e uma velocidade de 1 m/s.

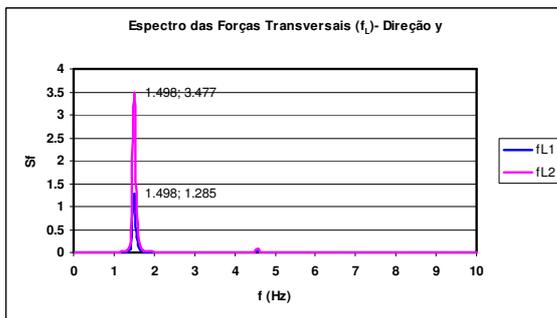


A- Forças Adimensionalizadas na Direção x para os *Risers* 1 e 2.

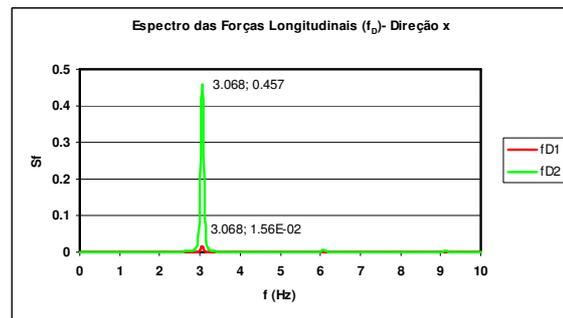


B- Forças Adimensionalizadas na Direção y para os *Risers* 1 e 2.

Figura 4.19- Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.



A- Espectros das Forças Transversais (y) dos *Risers* 1 e 2.



B- Espectros das Forças Longitudinais (x) dos *Risers* 1 e 2.

Figura 4.20- Espectros das Forças Transversais (y) e Longitudinais (x) para os *Risers* 1 e 2- Espaçados de 2D e com Velocidade de 1m/s.

A partir da Figura 4.20, tem-se que:

$$f_{S1} = f_{S2} = 1.5Hz$$

$$S_{NUM1} = S_{NUM2} = \frac{f_s \cdot D}{U} = \frac{1.5 \cdot 0.114}{1} = 0.17 \quad (4.6)$$

A partir da Figura 4.20, pode-se concluir que:

- o efeito da interação hidrodinâmica gerado pela esteira, altera a frequência de emissão dos vórtices e, conseqüentemente, o número de Strouhal;
- o *riser* 2 (jusante) apresenta uma amplificação da força transversal, confirmando o que foi obtido nos estudos experimentais;

- confirma que a frequência das forças longitudinais é o dobro da transversal.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas na direção x, pode-se observar que ocorrem variações dos coeficientes de arrasto para ambos os *risers*, representando as parcelas dinâmicas. No caso em estudo, tem-se:

$$CD1_{DIN} = 0.102$$

$$CD2_{DIN} = 0.559$$

4.4.2.1.3 Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 2D

Os resultados obtidos mostram que há alterações expressivas dos coeficientes hidrodinâmicos devido ao efeito de esteira.

Os resultados numéricos confirmaram as tendências observadas nos estudos experimentais.

4.4.2.2 Espaçamento de 3D

As Tabelas 4.18 e 4.19 apresentam os resultados dos coeficientes hidrodinâmicos para os 2 risers, considerando o modelo de turbulência (SST) com e sem transição da camada limite (SST com Gama teta).

Tabela 4.18- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser 1* (Montante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	1.083	1.184	0.962	1.077
1	1.14E+05	0.894	0.968	0.789	0.917
1.5	1.70E+05	0.809	0.805	0.706	0.754
2	2.27E+05	0.744	0.452	0.638	0.424

Tabela 4.19- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser 2* (Jusante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	0.425	0.187	1.911	1.817
1	1.14E+05	0.377	0.367	1.705	1.913
1.5	1.70E+05	0.357	0.466	1.603	1.788
2	2.27E+05	0.351	0.262	1.523	1.004

4.4.2.2.1 Comparação com os Resultados Experimentais

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam uma comparação entre os coeficientes de arrasto médios obtidos nas simulações numéricas para 2 risers alinhados e espaçados de 3D, usando o programa CFX, com os obtidos nos estudos experimentais descritos no Capítulo 3.

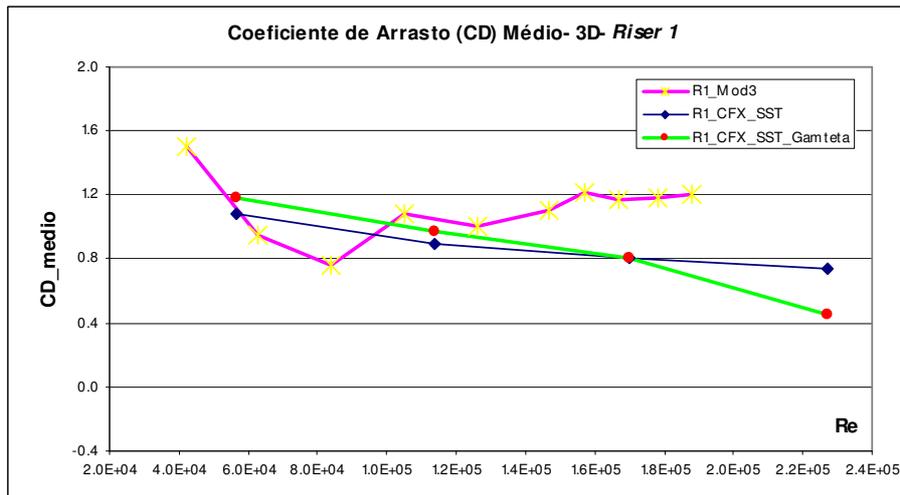


Figura 4.21- Comparação do CD Numérico x Experimental- Riser 1.

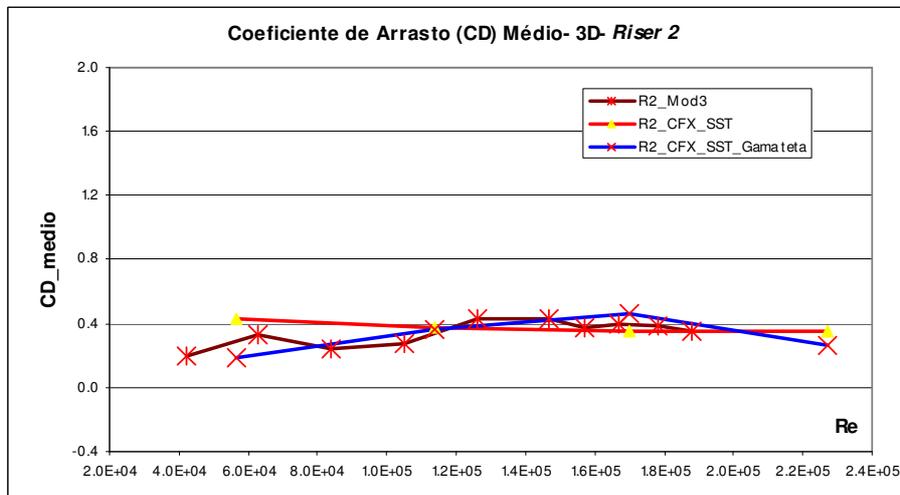


Figura 4.22- Comparação do CD Numérico x Experimental- Riser 2.

Assim como foi obtido para um espaçamento de 2D, os resultados das simulações numéricas usando o programa CFX, reproduzem bem o comportamento hidrodinâmico quando há 2 risers alinhados e espaçados de 3D. Para o riser de jusante, a aderência de resultados foi perfeita, ratificando todas as conclusões anteriores da existência do efeito de sombra.

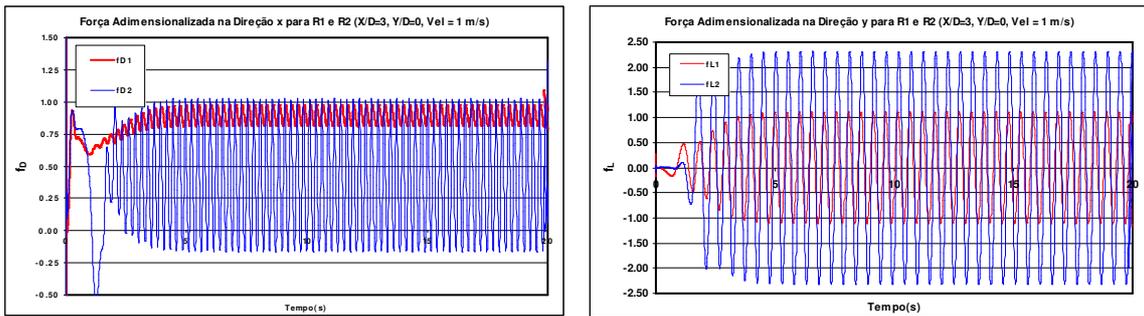
4.4.2.2 Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 3D.

Além dos coeficientes hidrodinâmicos apresentados anteriormente, podem-se obter outros parâmetros que irão caracterizar o comportamento hidrodinâmico dos 2 *risers*, aqui constituído pelo efeito do desprendimento dos vórtices associado à esteira formada a jusante do riser de montante.

Dentre estes parâmetros, tem-se: numero de Strouhal numérico (S_{num}) e a flutuação do coeficiente de arrasto (CD_{DIN}) para os *risers* 1 e 2.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas nas direções x e y, pode-se obter a resposta espectral e determinar os parâmetros mencionados acima.

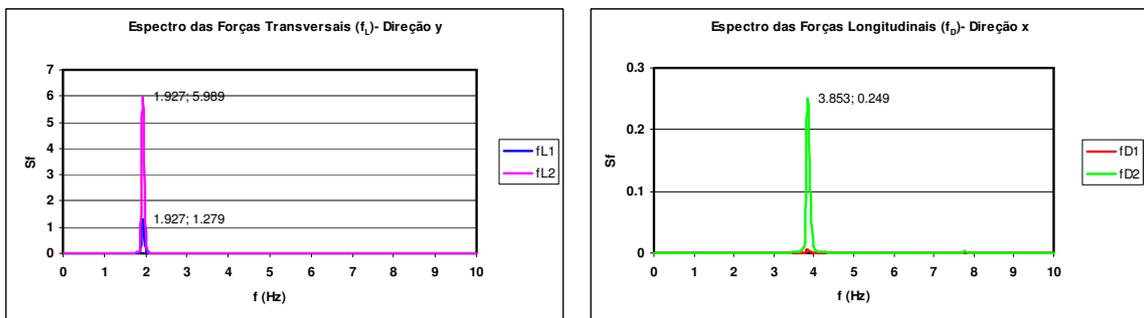
As Figuras 4.23A/B e 4.24A/B, mostram, respectivamente, as séries temporais e as respostas espectrais nas direções transversal e longitudinal para os *risers* 1 e 2, e uma velocidade de 1 m/s.



A- Forças Adimensionalizadas na Direção x para os *Risers* 1 e 2.

B- Forças Adimensionalizadas na Direção y para os *Risers* 1 e 2.

Figura 4.23- Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.



A- Espectros das Forças Transversais (y) dos *Risers* 1 e 2.

B- Espectros das Forças Longitudinais (x) dos *Risers* 1 e 2.

Figura 4.24- Espectro das Forças Transversais (y) e Longitudinais (x) para os *Risers* 1 e 2- Espaçados de 3D e com Velocidade de 1m/s.

A partir da Figura 4.21, tem-se que:

$$f_{s1} = f_{s2} = 1.93Hz$$

$$S_{NUM1} = S_{NUM2} = \frac{f_s \cdot D}{U} = \frac{1.93 * 0.114}{1} = 0.22 \quad ..(4.7)$$

A partir da Figura 4.24, pode-se concluir que:

- o efeito da interação hidrodinâmica gerada pela esteira, altera a frequência de emissão dos vórtices e, conseqüentemente, o número de Strouhal;
- o *riser* 2 (jusante) apresenta uma amplificação da força transversal, confirmando o que foi obtido nos estudos experimentais;
- confirma que a frequência das forças longitudinais é o dobro da transversal.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas na direção x, pode-se observar que ocorrem variações dos coeficientes de arrasto para ambos os *risers*, representando as parcelas dinâmicas. No caso em estudo, tem-se:

$$CD1_{DIN} = 0.057$$

$$CD2_{DIN} = 0.418$$

4.4.2.2.3 Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 3D

Os resultados obtidos mostram que há alterações expressivas dos coeficientes hidrodinâmicos devido ao efeito de esteira.

Os resultados numéricos confirmaram as tendências observadas nos estudos experimentais.

4.4.2.3 Espaçamento de 4D

As Tabelas 4.26 a 4.27 apresentam os resultados dos coeficientes hidrodinâmicos para os 2 risers, considerando o modelo de turbulência (SST) com e sem transição da camada limite (SST com Gama teta).

Tabela 4.26- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser 1* (Montante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	0.988	1.085	0.643	0.813
1	1.14E+05	0.830	0.784	0.530	0.403
1.5	1.70E+05	0.747	0.665	0.447	0.242
2	2.27E+05	0.687	0.374	0.382	0.136

Tabela 4.27- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser 2* (Jusante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	0.304	0.274	1.275	1.693
1	1.14E+05	0.279	0.419	1.092	1.484
1.5	1.70E+05	0.280	0.409	1.013	1.220
2	2.27E+05	0.281	0.228	0.949	0.687

4.4.2.3.1 Comparação com Resultados Experimentais

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam uma comparação entre os coeficientes de arrasto médios obtidos nas simulações numéricas para 2 risers alinhados e espaçados de 4D, usando o programa CFX, com os obtidos nos estudos experimentais descritos no Capítulo 3, lembrando que para este espaçamento há somente os resultados do modelo 1.

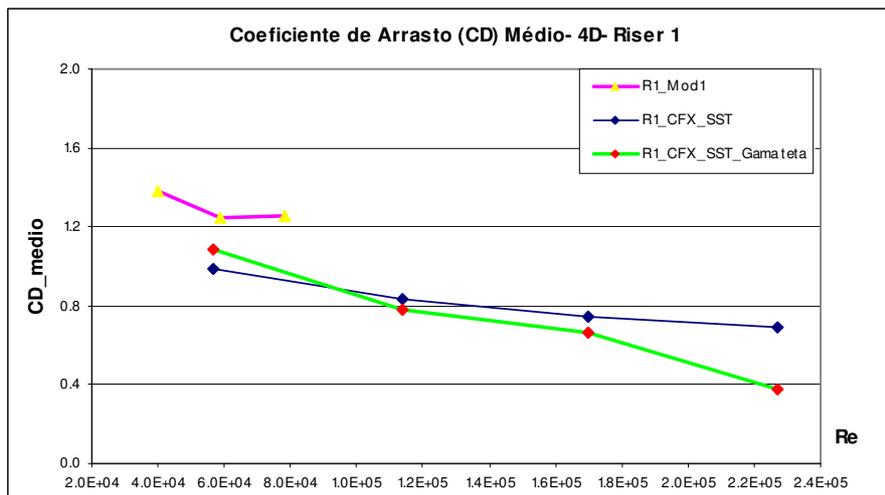


Figura 4.25- Comparação do CD Numérico x Experimental- *Riser 1*.

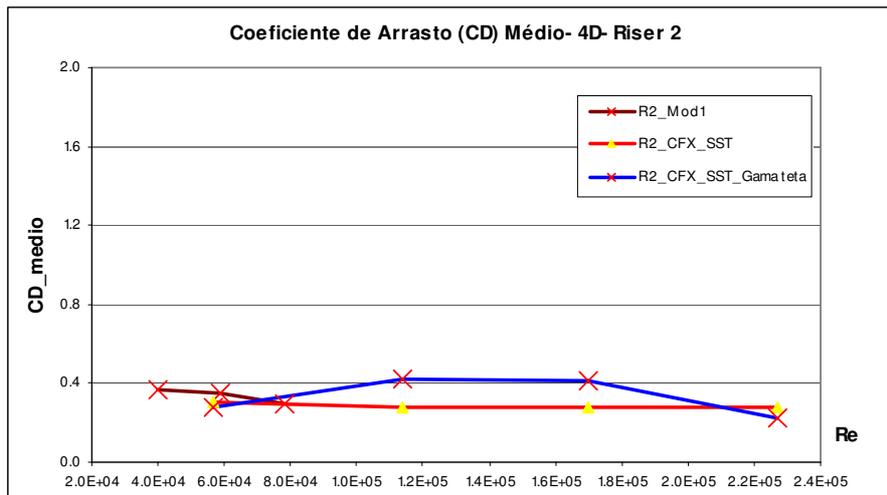


Figura 4.26- Comparação do CD Numérico x Experimental- *Riser 2*.

Os resultados experimentais para este espaçamento estão disponíveis somente para baixos valores do número de Reynolds. Contudo, pode-se observar que há uma boa aderência dos resultados numéricos com os experimentais. Mais uma vez, os resultados numéricos deram bons resultados para o riser de jusante.

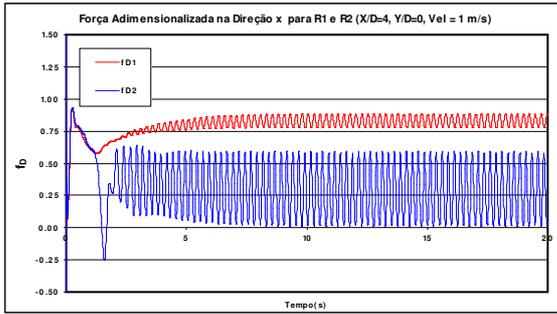
4.4.2.3.2 Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 4D.

Além dos coeficientes hidrodinâmicos apresentados anteriormente, podem-se obter outros parâmetros que irão caracterizar o comportamento hidrodinâmico dos 2 *risers*, aqui constituído pelo efeito do desprendimento dos vórtices associado à esteira formada a jusante do riser de montante.

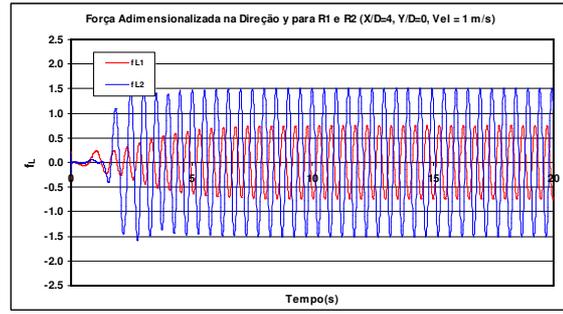
Dentre estes parâmetros, tem-se: número de Strouhal numérico (S_{num}) e a flutuação do coeficiente de arrasto (CD_{DIN}) para os *risers* 1 e 2.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas nas direções x e y, pode-se obter a resposta espectral e determinar os parâmetros mencionados acima.

As Figuras 4.27A/B e 4.28A/B mostram, respectivamente, as séries temporais e as respostas espectrais nas direções transversal e longitudinal para os *risers* 1 e 2, e uma velocidade de 1 m/s.

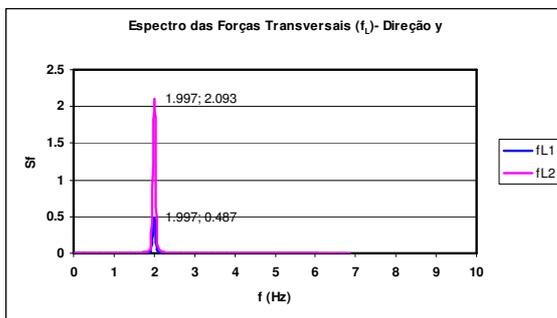


A- Forças Adimensionalizadas na Direção x para os Risers 1 e 2.

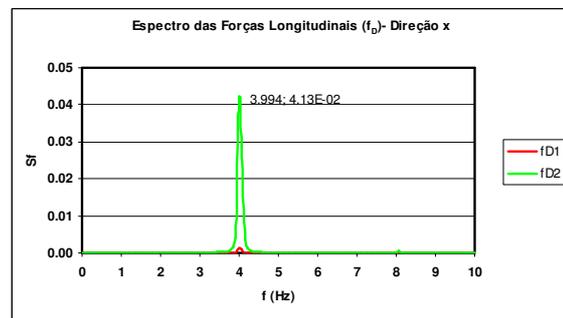


B- Forças Adimensionalizadas na Direção y para os Risers 1 e 2.

Figura 4.27- Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.



A- Espectros das Forças Transversais dos Risers 1 e 2.



B- Espectros das Forças Longitudinais dos Risers 1 e 2.

Figura 4.28- Espectro das Forças Transversais (y) e Longitudinais (x) para os Risers 1 e 2- Espaçados de 4D e com Velocidade de 1m/s.

A partir da Figura 4.21, tem-se que:

$$f_{S1} = f_{S2} = 2Hz$$

$$S_{NUM1} = S_{NUM2} = \frac{f_s \cdot D}{U} = \frac{2 \cdot 0.114}{1} = 0.23 \quad ..(4.8)$$

A partir da Figura 4.28, pode-se concluir que:

- o efeito da interação hidrodinâmica gerado pela esteira, altera a frequência de emissão dos vórtices e, conseqüentemente, o número de Strouhal;
- o riser 2 (jusante) apresenta uma amplificação da força transversal, confirmando o que foi obtido nos estudos experimentais;

- confirma que a frequência das forças longitudinais é o dobro da transversal.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas na direção x, pode-se observar que ocorrem variações dos coeficientes de arrasto para ambos os *risers*, representando as parcelas dinâmicas. No caso em estudo, tem-se:

$$CD1_{DIN} = 0.038$$

$$CD2_{DIN} = 0.205$$

4.4.2.3 Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 4D

Os resultados obtidos mostram que há alterações expressivas dos coeficientes hidrodinâmicos devido ao efeito de esteira.

Os resultados numéricos confirmaram as tendências observadas nos estudos experimentais.

Os resultados numéricos, mostram que há uma dissipação da energia das forças longitudinais que atuam sobre o *riser 2* (jusante), a medida que aumenta o espaçamento.

4.4.2.4 Espaçamento de 5D

As Tabelas 4.28 a 4.29 apresentam os resultados dos coeficientes hidrodinâmicos para os 2 risers, considerando o modelo de turbulência (*SST*) com e sem transição da camada limite (*SST* com Gama teta).

Tabela 4.28- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser 1* (Montante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	0.964	0.277	0.556	0.196
1	1.14E+05	0.825	1.343	0.493	0.544
1.5	1.70E+05	0.754	0.730	0.446	0.272
2	2.27E+05	0.697	0.411	0.393	0.153

Tabela 4.29- Coeficientes Hidrodinâmicos para o *Riser 2* (Jusante).

Vel (m/s)	Re	CD		CL	
		SST	SST com $\gamma\theta$	SST	SST com $\gamma\theta$
0.5	5.68E+04	0.340	0.070	1.017	0.409
1	1.14E+05	0.300	0.553	0.924	1.641
1.5	1.70E+05	0.285	0.362	0.866	1.125
2	2.27E+05	0.279	0.203	0.810	0.634

4.4.2.4.1 Comparação com Resultados Experimentais

As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam uma comparação entre os coeficientes de arrasto médios obtidos nas simulações numéricas para 2 risers alinhados e espaçados de 5D, usando o programa CFX, com os obtidos nos estudos experimentais e descritos no Capítulo 3.

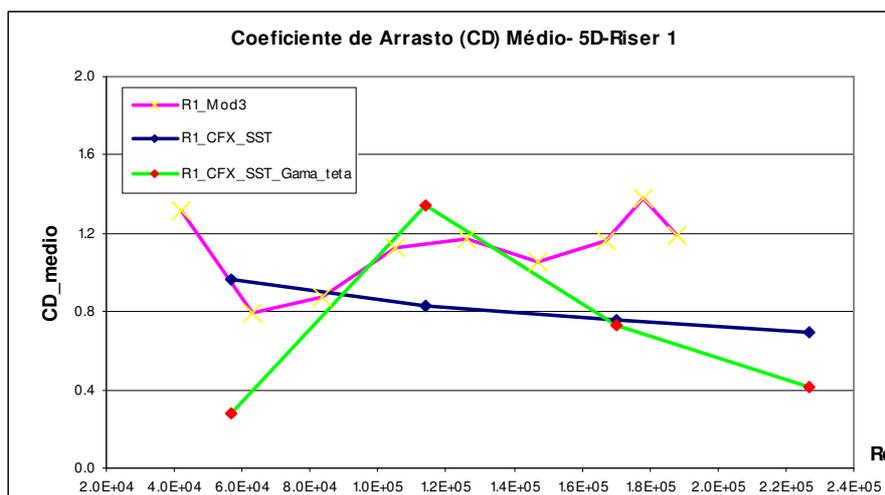


Figura 4.29- Comparação do CD Numérico x Experimental- *Riser 1*.

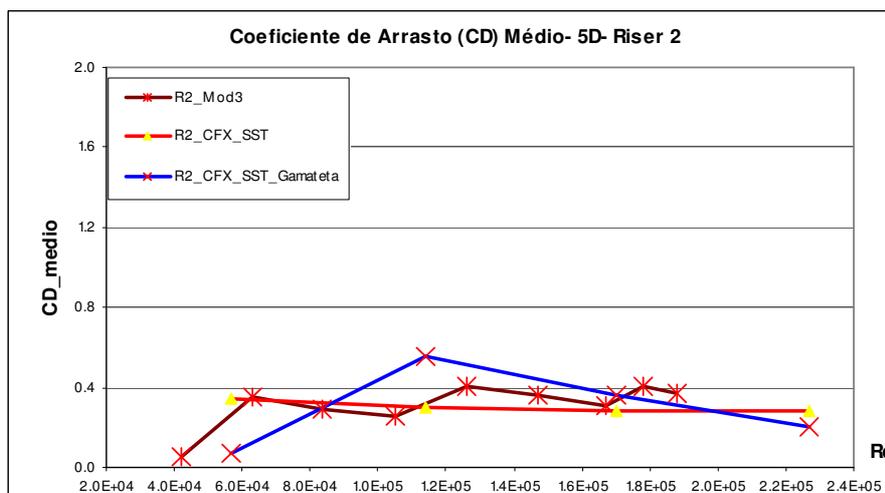


Figura 4.30- Comparação do CD Numérico x Experimental- *Riser 2*.

Mais uma vez, os resultados numéricos deram bons resultados para o riser de jusante.

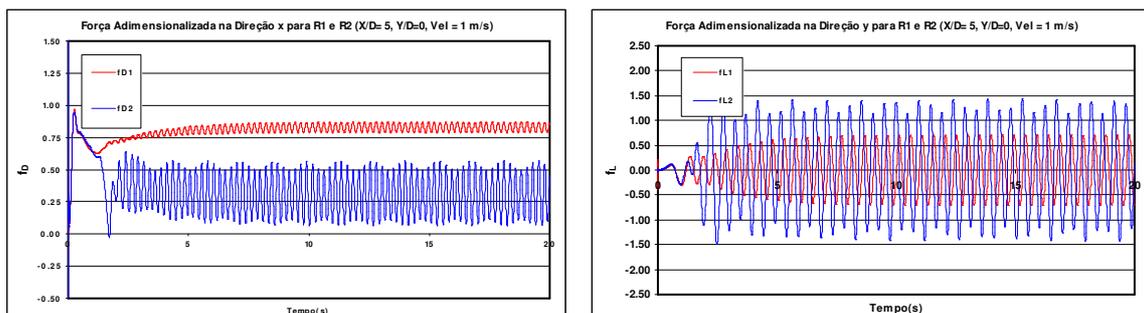
4.4.2.4.2 Caracterização do Comportamento Hidrodinâmico para 2 Risers Espaçados de 5D.

Além dos coeficientes hidrodinâmicos apresentados anteriormente, podem-se obter outros parâmetros que irão caracterizar o comportamento hidrodinâmico dos 2 *risers*, aqui constituído pelo efeito do desprendimento dos vórtices associado à esteira formada a jusante do riser de montante.

Dentre estes parâmetros, tem-se: numero de Strouhal numérico (S_{num}) e a flutuação do coeficiente de arrasto (CD_{DIN}) para os *risers* 1 e 2.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas nas direções x e y, pode-se obter a resposta espectral e determinar os parâmetros mencionados acima.

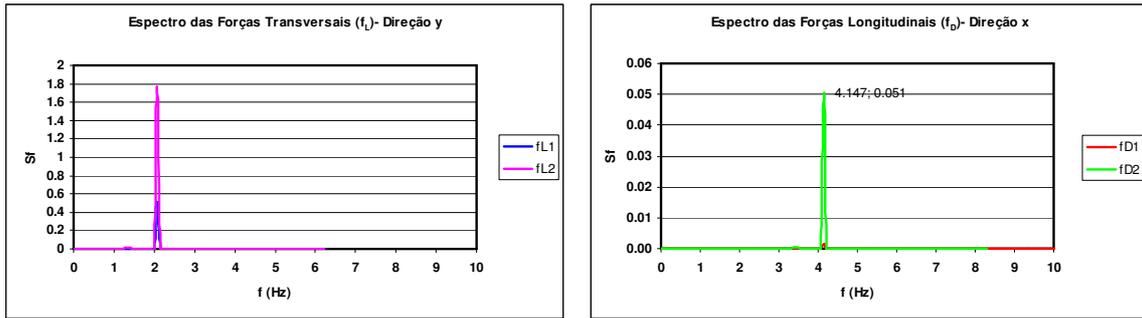
As Figuras 4.31A/B e 4.32A/B mostram, respectivamente, as séries temporais e as respostas espectrais nas direções transversal e longitudinal para os *risers* 1 e 2, e uma velocidade de 1 m/s.



A- Forças Adimensionalizadas na Direção x para os *Risers* 1 e 2.

B- Forças Adimensionalizadas na Direção y para os *Risers* 1 e 2.

Figura 4.31- Séries temporais das Forças Adimensionalizadas nas Direções x e y para uma Velocidade de Escoamento de 1 m/s.



A- Espectros das Forças Transversais (y) dos *Risers* 1 e 2. B- Espectros das Forças Longitudinais (x) dos *Risers* 1 e 2.

Figura 4.32- Espectros das Forças Transversais (y) e Longitudinais (x) para os *Risers* 1 e 2- Espaçados de 5D e com Velocidade de 1m/s.

A partir da Figura 4.34, tem-se que:

$$f_{S1} = f_{S2} = 2.073Hz$$

$$S_{NUM1} = S_{NUM2} = \frac{f_s \cdot D}{U} = \frac{2.073 \cdot 0.114}{1} = 0.236 \quad (4.9)$$

A partir da Figura 4.33, pode-se concluir que:

- o efeito da interação hidrodinâmica gerado pela esteira, altera a frequência de emissão dos vórtices e, conseqüentemente, o número de Strouhal;
- o *riser* 2 (jusante) apresenta uma amplificação da força transversal, confirmando o que foi obtido nos estudos experimentais;
- confirma que a frequência das forças longitudinais é o dobro da transversal.

A partir das séries temporais das forças adimensionalizadas na direção x, pode-se observar que ocorrem variações dos coeficientes de arrasto para ambos os *risers*, representando as parcelas dinâmicas. No caso em estudo, tem-se:

$$CD1_{DIN} = 0.027$$

$$CD2_{DIN} = 0.159$$

4.4.2.4.3 Análise Crítica dos Resultados para 2 Risers Espaçados de 5D

Os resultados obtidos mostram que há alterações expressivas dos coeficientes hidrodinâmicos devido ao efeito de esteira.

Os resultados numéricos confirmaram as tendências observadas nos estudos experimentais.

Os resultados numéricos, mostram que há uma dissipação da energia das forças longitudinais que atuam sobre o *riser 2* (jusante), a medida que aumenta o espaçamento.

4.4.3 Comprimento do Efeito de Sombra

Visando determinar o comprimento do efeito de sombra, isto é, a extensão da esteira gerada pelo *riser* de montante, foram feitos estudos paramétricos considerando um espaçamento relativo entre os *risers* de 10, 15, 20 e 25D, além dos adotados anteriormente. Isto nos permite obter a Figura 4.33, que representa a variação dos coeficientes de arrasto médios do *riser 2* (jusante) em função do espaçamento através de um ajuste linear.

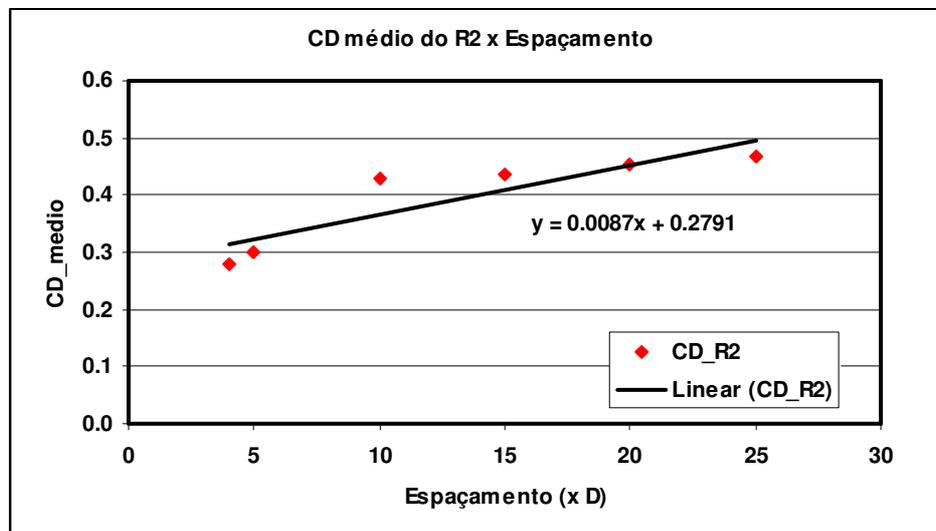


Figura 4.33- Determinação do CD para o Riser de Jusante x Espaçamento.

Considerando um ajuste linear, têm-se os valores apresentados na Tabela 4.30 de CD em função do espaçamento relativo em os *risers*:

Tabela 4.30- CD para o *Riser* de Jusante em Função do Espaçamento.

Espaçamento (x D)	CD_R2
10	0.37
15	0.41
20	0.45
25	0.50
30	0.54
35	0.58
40	0.63
45	0.67
50	0.71
55	0.76
60	0.80

Portanto, em função dos resultados numéricos, pode-se estimar que somente a uma distância em torno de 60 vezes o diâmetro do *riser*, o efeito de esteira irá se dissipar. É importante salientar, que caso este número fosse adotado inviabilizaria a maioria dos empreendimentos. Ratificando, o que foi mencionado no Capítulo 1, da importância do estudo da interferência.

4.5 Interação Fluido-Estrutura

Como frisado anteriormente, os valores obtidos para os coeficientes hidrodinâmicos nas simulações numéricas com o *riser* estacionário, traduzem somente os resultados dos campos de pressões e velocidades do domínio fluido obtidos através da solução da equação de Navier-Stokes, sem que hajam perturbações nestes campos geradas pela movimentação do *riser*, isto é, não há uma interação fluido-estrutura (FSI).

Visando verificar a viabilidade de simulações 2D, considerando uma interação fluido-estrutura (FSI) expedita, de modo que não haja impactos expressivos no tempo de simulação e, conseqüentemente, possa ser usada como uma ferramenta para simulações numéricas usando a metodologia de CFD em projetos. Foram feitas algumas simulações, usando a metodologia descrita a seguir.

4.5.1 Descrição da Metodologia para Simulação de uma Interação Fluido-Estrutura (FSI) Expedita

4.5.1.1 Introdução

Conforme mencionado anteriormente, o *riser* é modelado através de um furo no domínio fluido, com condição de contorno de parede (não deslizamento e velocidade normal à superfície nula), de modo a simular uma movimentação do *riser* a malha em torno deste, deverá se mover de acordo com as forças geradas pelo campo de pressão do fluido, associando-se a este *riser* uma massa e uma rigidez determinadas a seguir.

4.5.1.2 Formulação e Técnica de Movimentação da Malha

Esta movimentação será determinada através de uma rotina usando as expressões 4.9 a 4.13 [42], que são baseadas na 2ª Lei de Newton, em que a variação do momento linear com o tempo é igual a resultante de forças que atuam sobre o *riser*, colocando-se na forma diferencial tem-se:

$$M_{RISER} * \frac{d}{dt}(V_{RISER}) = F_{FLUIDO} - F_{MOLA} \quad (4.10)$$

$$\frac{d}{dt}(V_{RISER}) = \frac{V_{RISER}^{t+\Delta t} - V_{RISER}^t}{\Delta t} \quad (4.11)$$

$$V_{RISER}^{t+\Delta t} = \frac{D_{RISER}^{t+\Delta t} - D_{RISER}^t}{\Delta t} \quad (4.12)$$

$$F_{MOLA} = K_{MOLA} * D_{RISER}^{t+\Delta t} \quad (4.13)$$

$$D_{RISER}^{t+\Delta t} = \frac{F_{FLUIDO} + \left(\frac{M_{RISER} * V_{RISER}^t}{\Delta t} + \frac{M_{RISER} * D_{RISER}^t}{\Delta t^2} \right)}{\left(K_{MOLA} + \frac{M_{RISER}}{\Delta t^2} \right)} \quad (4.14)$$

Nas expressões 4.9 a 4.13, tem-se:

M_{RISER} : Massa do *riser*, cuja determinação está descrita seguir;

F_{FLUIDO} : Força exercida pelo fluido sobre o *riser*, obtidas através das expressões $F_x()@cilindro$ e $F_y()@cilindro$, conforme mostrado nas expressões 4.2 e 4.3;

F_{MOLA} : Força de restauração exercida sobre o *riser*, cuja determinação está descrita a seguir;

$D_{RISER}^t, D_{RISER}^{t+\Delta t}$: Deslocamento do *riser*, obtida através do comando `areaAve(Total Mesh Displacement Direção)@Dominio`;

Δt : Intervalo de integração usado durante a simulação.

Para a determinação da rigidez e da massa associada ao *riser*, foram inicialmente adotados os valores obtidos a partir das propriedades físicas e mecânicas dos modelos ensaiados, no caso o modelo 3 de PVC. Como a força resultante exercida sobre o *riser* pelo campo de pressão do fluido nas simulações é bastante inferior ao ensaiado, visto ser a simulação 2D, isto é, há somente um elemento de volume finito na direção perpendicular ao escoamento (direção Z), os deslocamentos obtidos foram desprezíveis. Foi então adotado um valor máximo para CL igual a 2 e deslocamento transversal igual a 1D (uma vez o diâmetro do modelo), o que permitiu a determinação da rigidez na direção transversal, sendo a massa equivalente obtida em função da frequência natural do modelo, no caso do modelo 3, é igual a 2.31 Hz. A Tabela 4.31 mostra os valores adotados nas simulações.

Tabela 4.31- Valores de Rigidez Transversal e Massa para Simulação Considerando Interação Fluido- Estrutura.

V (m/s)	Fy (N)	Ky (N/m)	M (kg)
0.5	0.16	1.43	0.27
1	0.65	5.72	1.07
1.5	1.47	12.86	2.41
2	2.61	22.86	4.28

Como o *riser* é modelado através de um furo no domínio fluido com as condições de contorno de parede, conforme descrito anteriormente, o deslocamento dado pela expressão 4.13, será aplicado como condição de contorno deste furo no domínio fluido, gerando uma deformação da malha do domínio fluido.

Há no programa CFX, algoritmos customizados para promover a movimentação da malha, ver detalhes na referência [42]. Dentre as técnicas empregadas, tem-se:

- A rigidez da malha é inversamente proporcional à distância da parede mais próxima, elevada a um expoente entre 1 e 2.

- A rigidez da malha é inversamente proporcional ao volume do volume finito, elevado a um expoente entre 1 e 2.

Todas essas técnicas, não evitaram que problemas de convergência numérica ocorressem, quando são gerados elementos com volumes negativos.

4.5.2 Resultados considerando FSI expedita na Direção Transversal para um *Riser* Isolado.

Inicialmente, foi simulado o escoamento ao redor de um *riser* livre para se mover na direção transversal à direção do escoamento, com a rigidez e massa associadas através do procedimento descrito no item 4.5.1.2 anteriormente. Contudo, não houve deslocamento do mesmo, visto que não havia perturbação para gerar uma instabilidade do mesmo. Foi, então, simulada a existência de uma fonte de perturbação no fluxo, o que gerou vibrações do *riser* e, conseqüentemente, uma interação fluido-estrutura, cujos resultados estão apresentados a seguir:

Foi simulada uma velocidade de 0.5 m/s, considerando modelo de turbulência SST sem considerar o modelo gama teta, já que para esta velocidade os ajustes no modelo de turbulência mostraram que somente o uso do modelo SST era suficiente.

A Figura 4.34 mostra a variação da força adimensionalizada na direção x com o tempo, para uma velocidade de escoamento de 0.5 m/s.

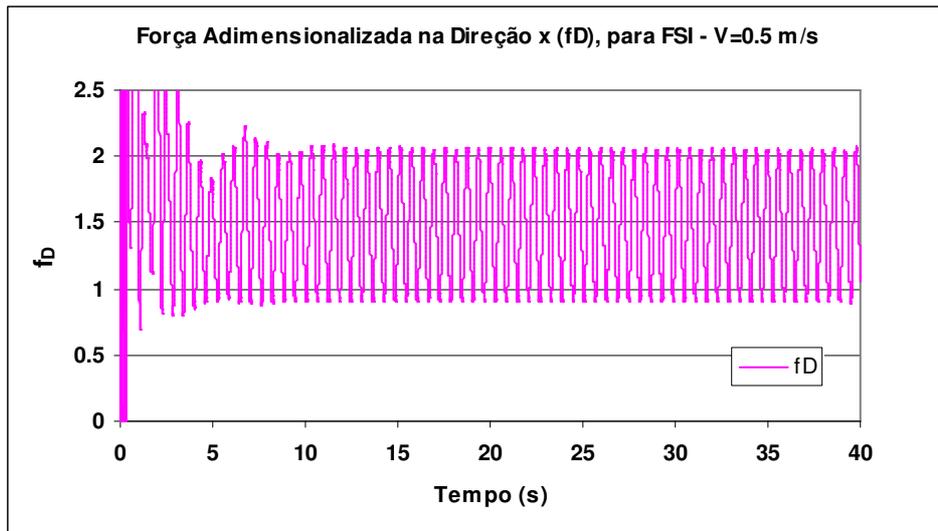


Figura 4.34- Força Adimensionalizada na Direção x (f_D) para *Riser* Isolado, considerando uma Interação Fluido- Estrutura Expedita.

A Figura 4.35 mostra a variação da força adimensionalizada na direção y e do deslocamento transversal com o tempo, para uma velocidade de escoamento de 0.5 m/s.

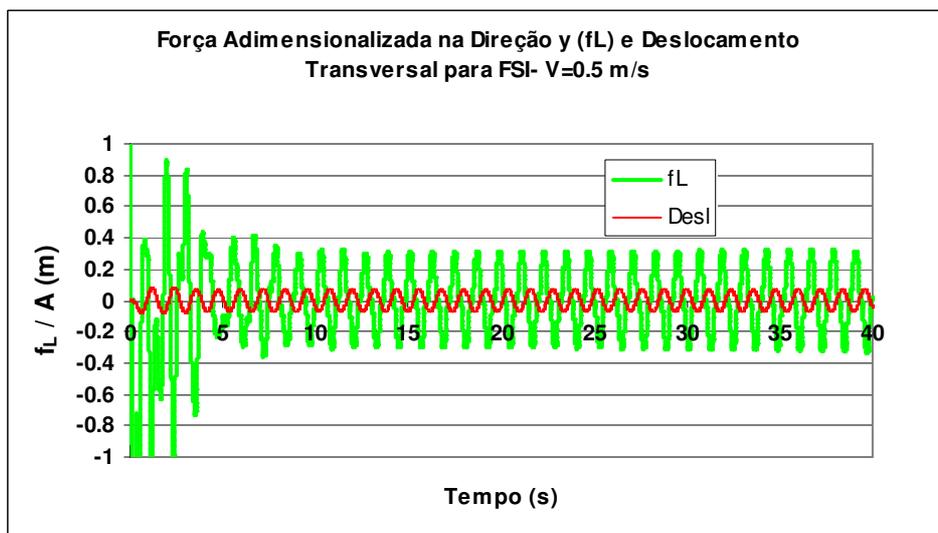


Figura 4.35- Força Adimensionalizada na Direção y (f_L) e Deslocamento Transversal para *Riser* Isolado, considerando uma Interação Fluido- Estrutura Expedita.

A partir dos resultados mostrados nas Figuras 4.35 e 4.36, tem-se:

$$CD = 1.49$$

$$CD_{DIN} = 0.415$$

$$CL = 0.197, CL_{MAX} = 0.324$$

Obtenção o RMS do deslocamento transversal, temos:

$A_{RMS} = 0.051$ m, considerando $D = 0.114$ m, tem-se $A_{RMS}/D = 0.45$ m, resultando em:

$$\left(\frac{A}{D}\right)_{SIG} = \sqrt{2} * \left(\frac{A_{RMS}}{D}\right) = \sqrt{2} * 0.45 = 0.64 \text{ m}$$

Usando a equação 4.15, obtida a partir da referência [41], tem-se:

$$C_{D,amp}(i) = 1.0 + 1.043 \left(2 \frac{A_{RMS}(i)}{D}\right)^{0.65} \quad (4.15)$$

Usando $A_{RMS}/D = 0.45$ m, obtem-se $C_{D,amp}(i) = 1.97$, considerando a recomendação na referência [41], para amplificarmos o coeficiente de arrasto obtido em função do número de Reynolds, tem-se:

$$CD(Re) = 1.2 \text{ (Obtido na literatura, ver Figura 4.10)}$$

$$CD \text{ amp} = 1.97 \times 1.2 = 2.36$$

A partir da Figura 4.35, tem-se um valor máximo para o coeficiente de arrasto de:

$CD_{MAX} = 2.1$, isto é, uma diferença em torno de 12% do que foi obtido com a formulação empírica acima, usada pelo programa SHEAR6.

Usando a equação 4.16, obtida a partir da referência [6], tem-se:

$$CL = 0.35 + 0.6 \left(\frac{A}{D}\right)_{MAX} - 0.93 \left(\frac{A}{D}\right)_{MAX}^2 \quad (4.16)$$

Usando $A/D = 0.64$ m, obtem-se $CL_{MAX} = 0.35$.

A diferença é em torno de 8%.

Em função dos resultados obtidos, vemos que uma simulação FSI expedita reproduziu com bastante fidelidade o comportamento real do *riser*, podendo ser usada para simulações numéricas futuras.

Quando se tentou simular a existência de movimentos longitudinais e transversais, particularmente para 2 *risers*, ocorreram vários problemas de convergência numérica, o que leva a recomendar o desenvolvimento de algoritmos para movimentação de malha, capazes de simular a interação fluido-estrutura, quando há grandes deslocamentos.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DO EFEITO DE SOMBRA

5.1 Introdução

Conforme apresentado no Capítulo 3, o desprendimento de vórtices, terá grande influência no estudo da interferência, já que o escoamento do fluido ao redor dos risers é caracterizado por um número de Reynolds na faixa entre 10^4 e 10^6 , o que irá gerar uma esteira turbulenta, conforme mostrado na Figura 1.8. Além disso, as frequências do desprendimento dos vórtices, também chamadas de frequências de Strouhal, têm uma faixa de coincidência com o intervalo de frequências naturais dos risers, o que terá reflexo na interação fluido-estrutura, assim no campo de pressão e velocidades gerado pelo escoamento entre os dois risers.

Como o escoamento para o *riser* de jusante, dependendo da distância relativa entre eles, será totalmente turbulento o que irá gerar uma velocidade de escoamento para este *riser* inferior à velocidade do escoamento na região afastada dos *risers*. Isto pode ser facilmente entendido, já que um vórtice desprendido pelo *riser* localizado a montante irá gerar uma desaceleração em um ponto P qualquer na esteira dos vórtices, desde que não esteja coincidente com o seu centro. A Figura 5.1 e a expressão 5.1, obtida na referência [6], mostram que os vórtices irão sempre gerar neste ponto P, componentes horizontais das velocidades com sentido contrário ao sentido do escoamento na região afastada dos *risers*.

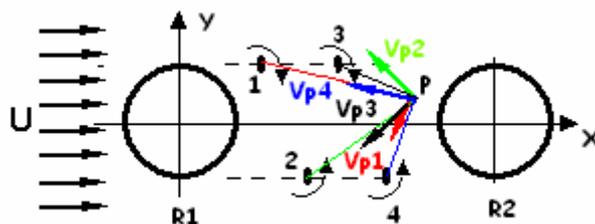


Figura 5.1- Componente da Velocidade Gerada por um Vórtice em um ponto P qualquer na Esteira dos Vórtices.

onde:

Vp1- Velocidade gerada no ponto P pelo vórtice 1.

Vp2- Velocidade gerada no ponto P pelo vórtice 2.

Vp3- Velocidade gerada no ponto P pelo vórtice 3.

Vp4- Velocidade gerada no ponto P pelo vórtice 4.

$$V = \sum_{j=1}^n \frac{\Gamma_j}{2\pi d_j} \quad (5.1)$$

onde:

d_j : Distância entre o centro de um vórtice e um ponto qualquer do domínio fluido. O índice j indica o número do vórtice considerado.

Γ_j : Circulação de um vórtice. O índice j indica o número do vórtice considerado.

Visando quantificar esta perda de velocidade para o riser de jusante, o pesquisador norueguês Erling Huse, ainda nos anos 80, propôs uma metodologia denominada de efeito de sombra, ver referências [5], [12], [15], [16]. Esta metodologia se baseia em uma solução da equação de Navier Stokes considerando escoamento laminar, como pode ser visto na referência [17].

Neste Capítulo, é feita uma comparação da formulação proposta por Erling Huse com os resultados numéricos obtidos usando-se o programa CFX e a metodologia descrita no Capítulo 4, assim como com os resultados experimentais.

5.2 Metodologia Proposta por Huse para Determinação da Velocidade de Escoamento na Esteira de um Riser- Efeito de Sombra.

Esta metodologia é largamente empregada para avaliar a interferência pelos projetistas de *risers*, sendo inclusive adotada na proposta de norma da DNV, ver referência [8].

Os trabalhos publicados pelo engenheiro Erling Huse, foram os resultados de vários anos de pesquisa, obtidos ao longo de vários projetos coordenados por ele junto ao Marintek (Norwegian Marine Technology Research Institute).

Como mencionado anteriormente, a formulação proposta por Huse foi baseada em escoamento laminar, permanente e invíscido, sendo aperfeiçoada por ele através de

vários projetos, inclusive testes experimentais, como o mencionado na referência [12], chegando a formulação semi-empírica a seguir:

$$u(x, y) = U_0 e^{\left[-0.693 \left(\frac{y}{b}\right)^2\right]} \quad (5.2)$$

$$b = 0.25(C_{D1} D_1 x_s)^{1/2} \quad (5.3)$$

$$U_0 = U \left(\frac{C_{D1} D_1}{x_s} \right)^{1/2} \quad (5.4)$$

$$x_s = x_v + x \quad (5.5)$$

$$x_v = \frac{4D_1}{C_{D1}} \quad (5.6)$$

onde:

b : meia largura da esteira de vórtices gerada pelo *riser* de montante (R1), conforme está mostrado na Figura 5.2 b;

C_{D1} : coeficiente de arrasto do *riser* de montante (R1).

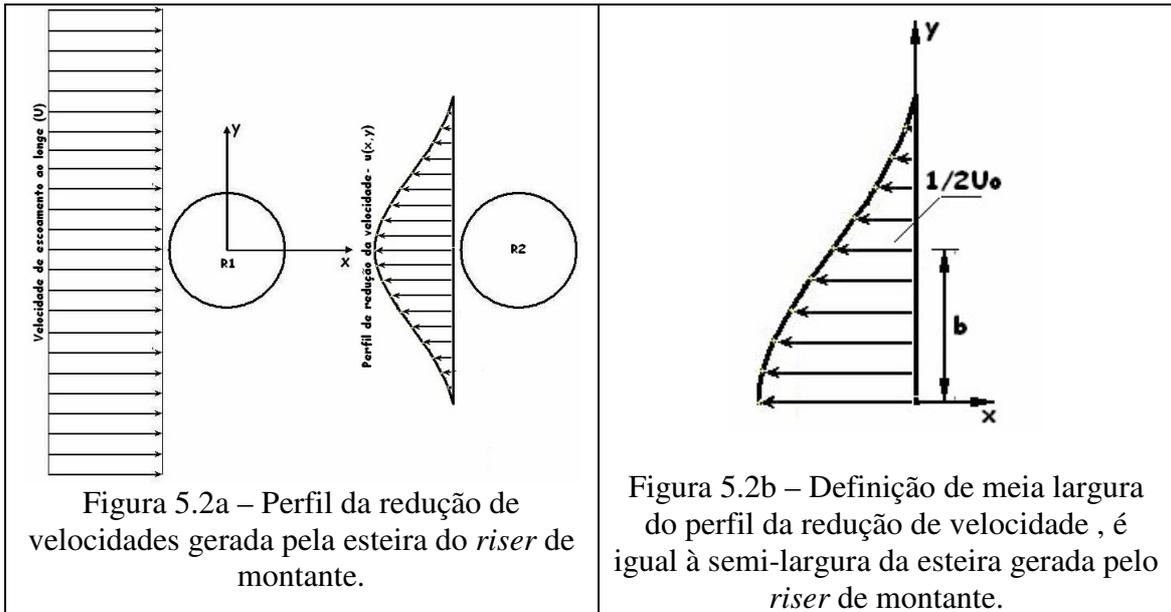
U_0 : redução máxima da velocidade na esteira, isto é, na direção do escoamento.

U : velocidade do escoamento ao longe.

$u(x,y)$: perfil da redução de velocidade devido à esteira gerada pelo *riser* de montante.

X_S : distância ao longo do eixo x entre uma fonte virtual, localizada à montante do *riser* de montante (R1), e o eixo y do *riser* de jusante (R2).

X_V : distância de uma fonte virtual até a original do sistema de coordenadas de R1, ver Figura 5.3.



A expressão 5.5 foi introduzida posteriormente na formulação original para correção dos resultados quando os *risers* estão próximos; conforme está mostrado na Figura 5.3, foi introduzido por Huse o conceito de uma fonte virtual localizada a montante.

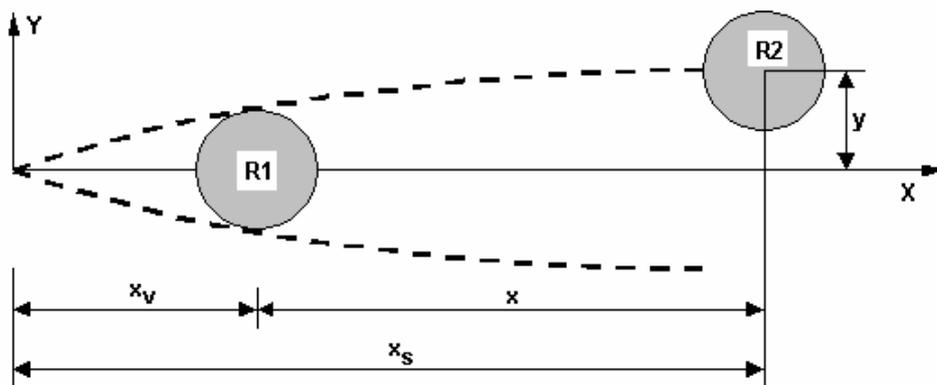


Figura 5.3- Definição do Posicionamento de uma Fonte Virtual.

A Figura 5.4 mostra as diferenças entre a formulação original e a corrigida pela adição da fonte virtual quando os *risers* estão afastados de $2D$. Para a obtenção deste gráfico foi considerada uma velocidade de escoamento ao longe de 1m/s e um diâmetro de 0.114m .

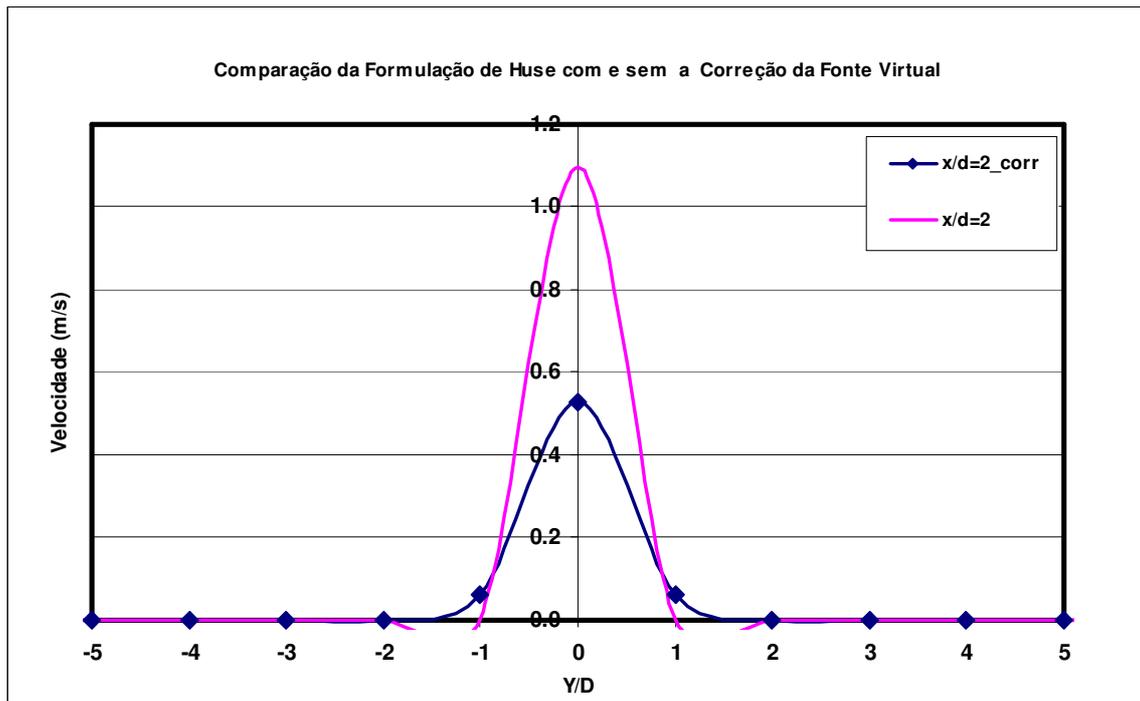


Figura 5.4- Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para uma Distância Relativa de 2D, como mostrado na Figura 5.3

A partir da Figura 5.4, pode-se concluir que a não consideração da fonte virtual, como proposto por Huse, conduziria a resultados errôneos, já que o valor obtido para a redução de velocidade seria maior que a velocidade de escoamento ao longe.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 mostram, respectivamente, a redução da velocidade de escoamento na esteira para distâncias de 4, 6, 8, 10, 12 e 14D.

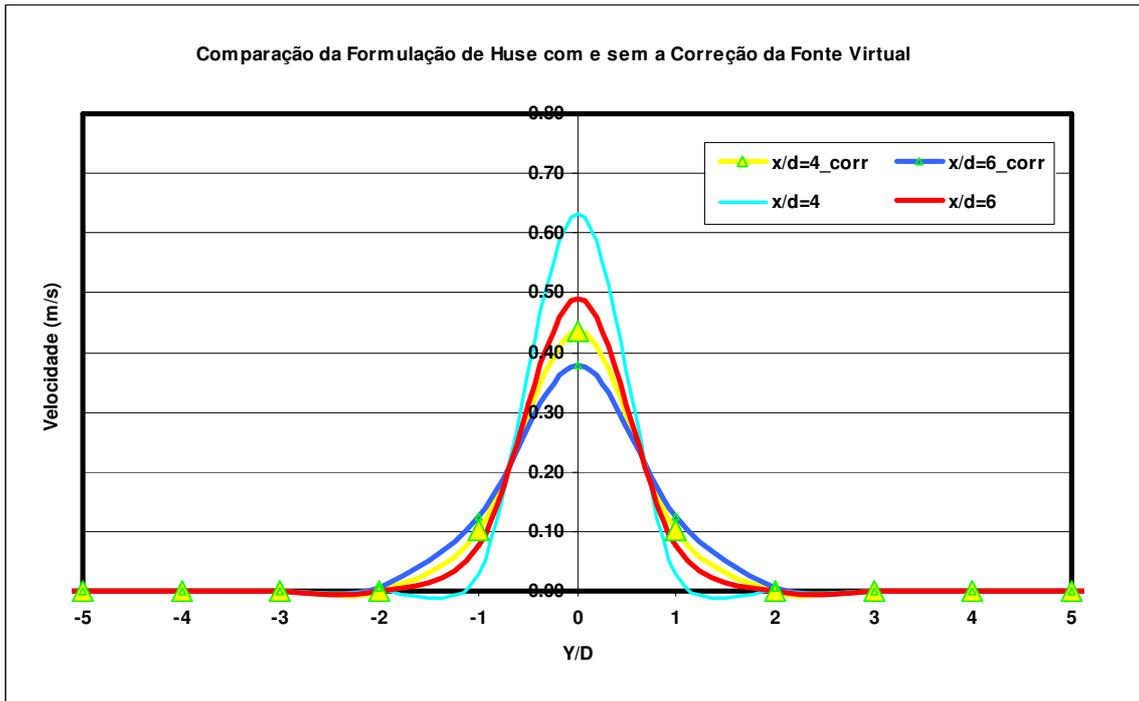


Figura 5.5 - Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para Distâncias Relativas de 4 e 6D.

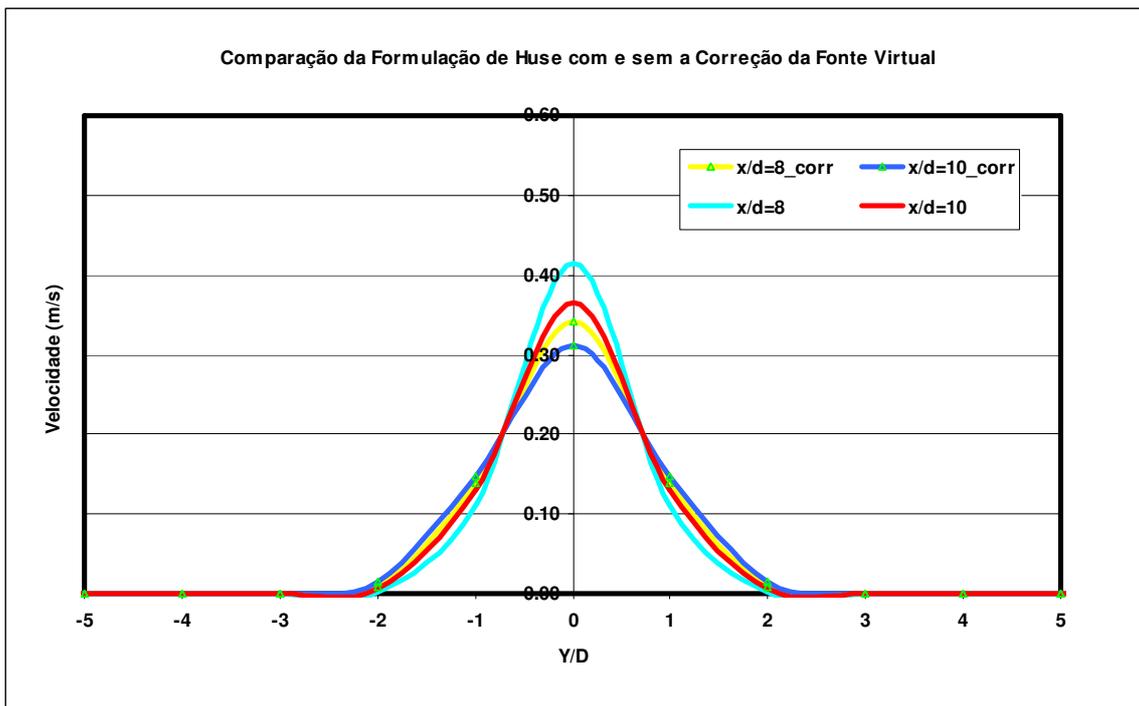


Figura 5.6 - Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para Distâncias Relativas de 8 e 10D.

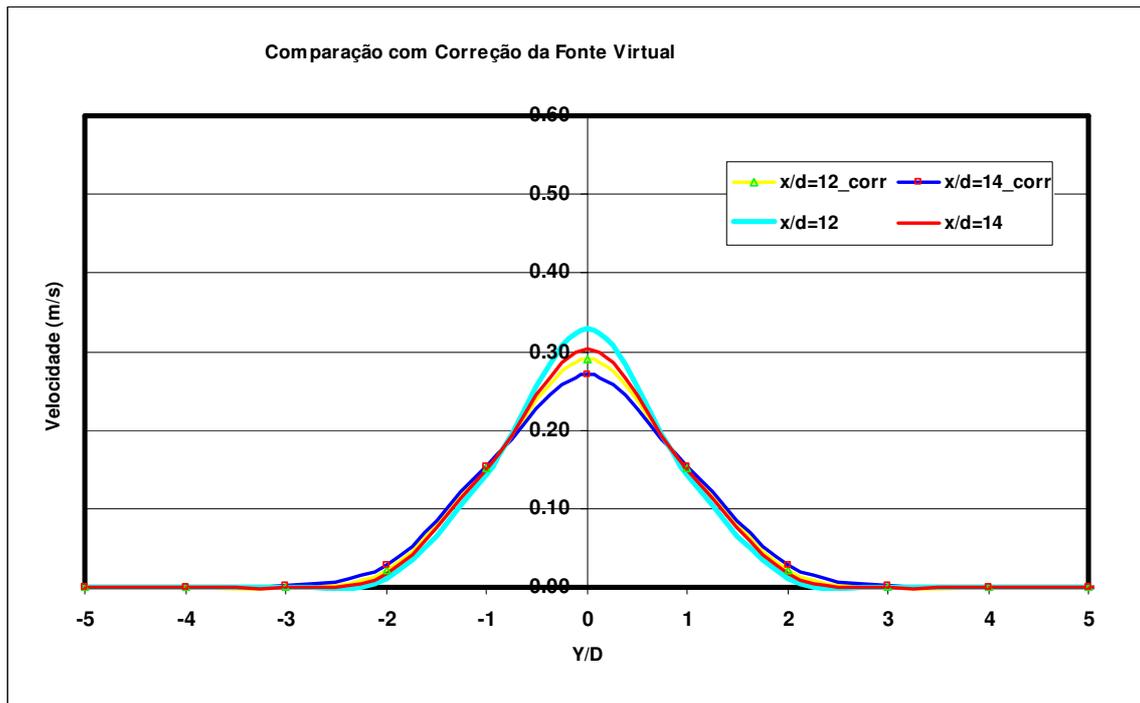


Figura 5.7 - Comparação da Formulação de Huse com e sem a Correção da Fonte Virtual para Distâncias Relativas de 12 e 14D.

As Figuras acima mostram que a correção proposta por Huse torna-se necessária para distâncias até aproximadamente 14D de eixo a eixo.

No item a seguir, é realizada uma comparação da formulação proposta por Huse com os resultados obtidos nas análises numéricas usando o programa CFX.

5.2.1 Comparação da Formulação Proposta por Huse com os Resultados Numéricos

A redução da velocidade na esteira proposta por Huse foi validada experimentalmente, porém na pesquisa bibliográfica do autor não foi encontrada validação numérica, o que foi feito neste trabalho.

Foi comparado o caso em que a velocidade de escoamento é igual a 1 m/s, o que resulta em um escoamento totalmente turbulento na esteira; como referência para a obtenção dos perfis de velocidades, foi adotado um plano localizado 0.7D do centro do riser de jusante, para evitar a influência do ponto de estagnação, conforme está mostrado na Figura 5.8.

Para determinação da velocidade de escoamento na esteira a seguir, usando-se a formulação de Huse, foi adotado um coeficiente de arrasto para o riser de montante igual a 1.2.

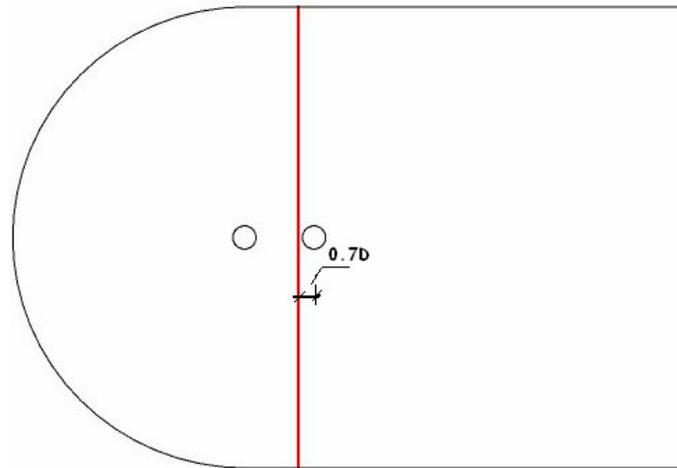


Figura 5.8- Localização do Plano para Determinação do Perfil de Redução da Velocidade.

As Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 mostram, respectivamente, a comparação da velocidade na esteira do riser de montante, para as distâncias relativas iguais a 2D, 3D, 4D e 5D.

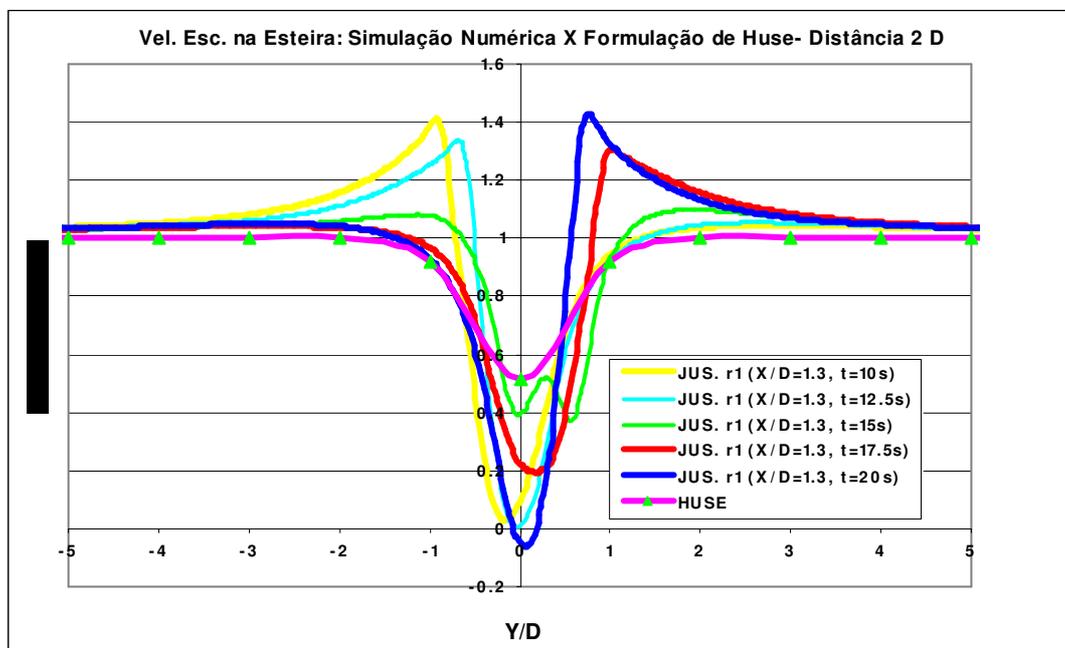


Figura 5.9 – Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 2D.

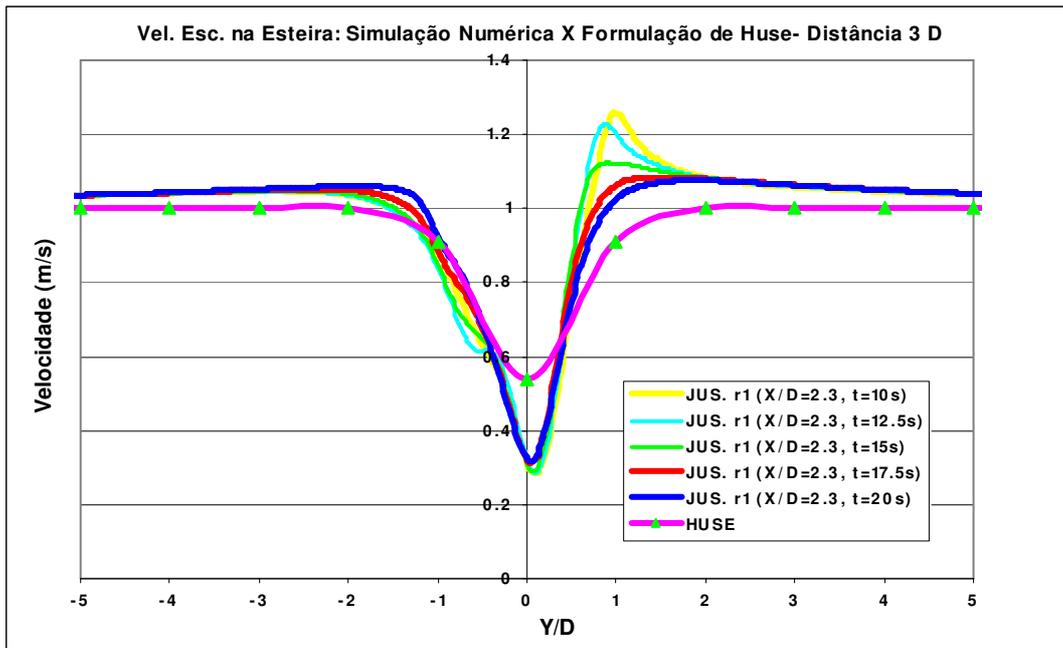


Figura 5.10 – Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 3D.

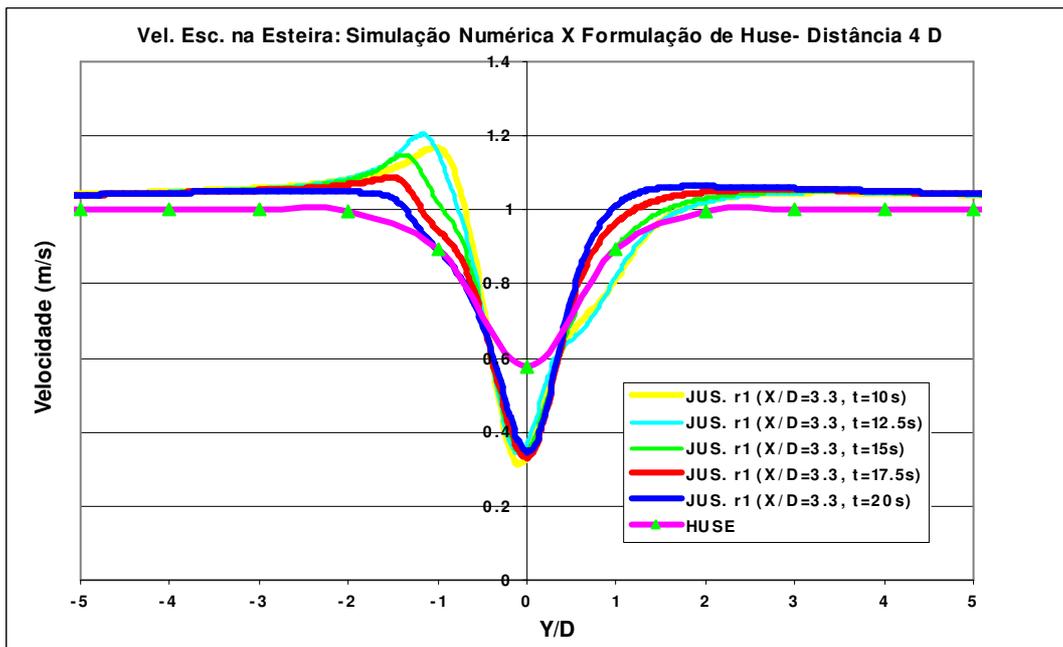


Figura 5.11 – Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 4D.

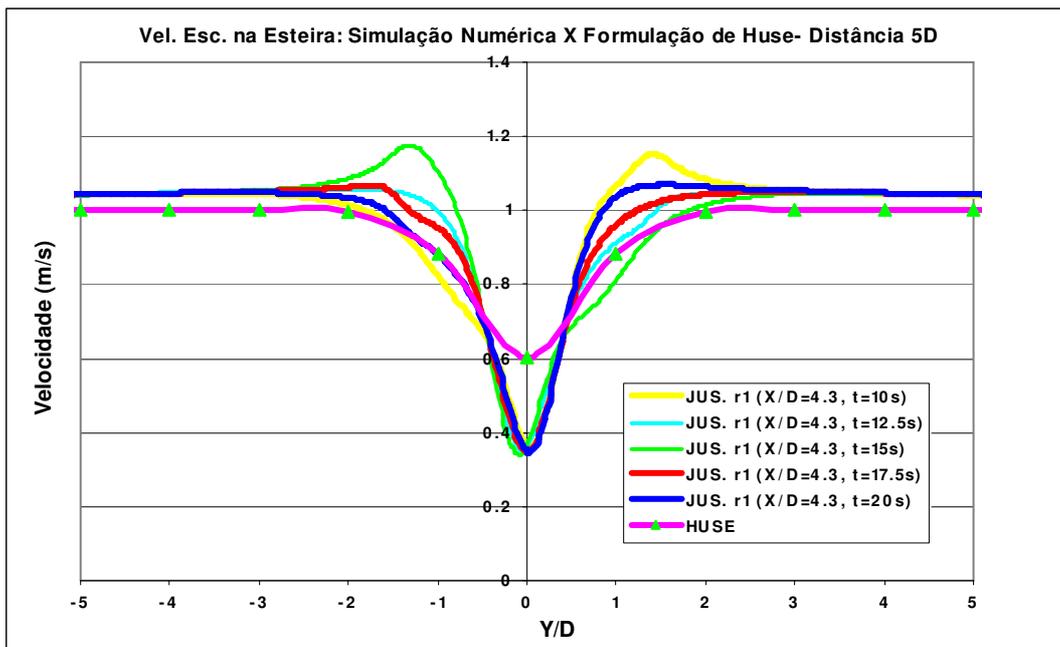


Figura 5.12 – Comparação da Velocidade de Esteira Obtida nas Simulações Numéricas e pela Formulação de Huse, para uma Distância 5D.

A partir das Figuras 5.9 a 5.12 importantes conclusões podem ser obtidas:

O campo de velocidades na esteira apresenta grande turbulência, quanto menor for a distância relativa entre os *risers*;

A formulação proposta por Huse conduz a bons resultados, podendo ser usada para estimar a velocidade de escoamento na esteira gerada pelo riser de montante;

Para distância relativa superior a 3D, há uma redução no erro da velocidade de escoamento para o riser de jusante usando-se a formulação de Huse;

O efeito de sombra é bastante pronunciado quando os risers estão alinhados; para um desalinhamento superior a 2.5D, a velocidade de escoamento na esteira é a mesma da velocidade ao longe;

Outra importante verificação que se pode fazer é como será o perfil de velocidades a jusante do riser 1. A equação 5.3, que representa a meia largura da esteira de vórtices, é função do coeficiente de arrasto do riser de montante, sendo um dos parâmetros da equação 5.2, que nos dá o perfil do decréscimo de velocidade.

A Figura 5.13 apresenta esta comparação, em que o coeficiente de arrasto do riser de montante (CD_1) é variado de 1.2 a 2, com passo igual 0.2, e para uma distância relativa entre os risers igual a 2D.

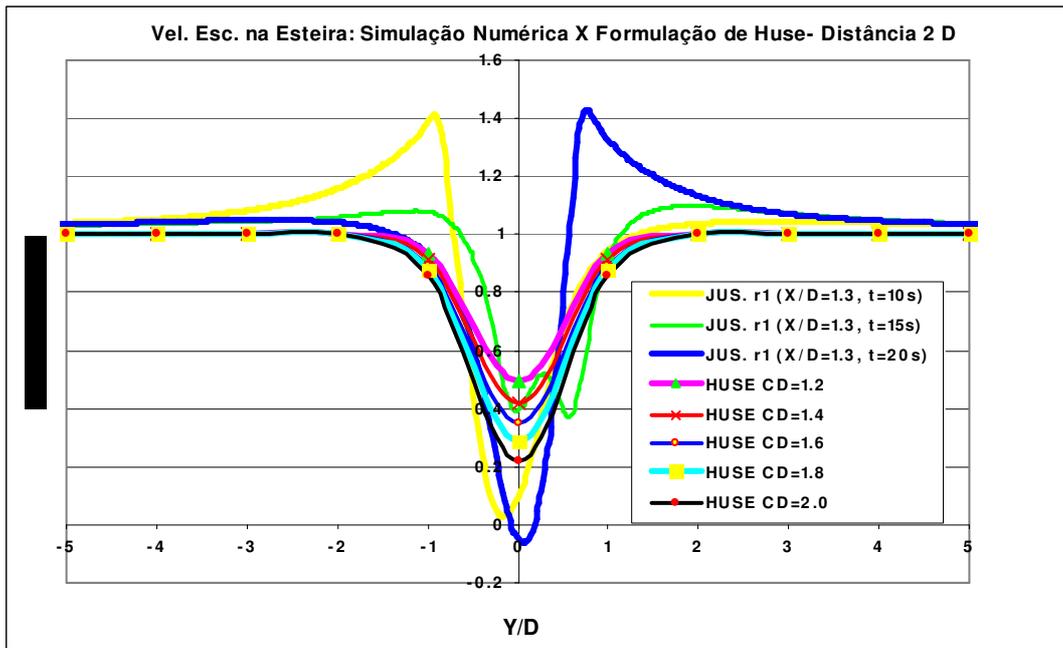


Figura 5.13- Variação Paramétrica do Coeficiente de Arrasto para o *Riser* de Montante na Formulação proposta por HUSE.

A partir da Figura 5.13, pode-se recomendar que o CD que deverá ser usado na formulação de HUSE é o valor máximo, isto é, amplificado pelas vibrações induzidas pelo desprendimento dos vórtices. É importante salientar, que na referência [12], Huse alertou que para *risers* de diferentes diâmetros deveria haver uma escolha criteriosa dos seus respectivos coeficientes de arrasto, porém os resultados obtidos neste trabalho mostram que mesmo que eles tenham mesmo diâmetro, a escolha do coeficiente de arrasto não poderá se dar somente em função do número de Reynolds, isto é, o coeficiente de arrasto médio. Este coeficiente, deverá ser obtido considerando a amplificação gerada pelas vibrações induzida por vórtices no *riser* de montante.

5.2.2 Comparação da Formulação Proposta por Huse com os Resultados Experimentais

Conforme mencionado no Capítulo 3, nos estudos experimentais conduzidos junto ao NMRI foram feitas medições da velocidade de escoamento dentro da esteira formada entre os risers. Este ponto de medição está mostrado na Figura 3.15 apresentada no Capítulo 3.

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam uma comparação das velocidades médias medidas no ensaio para o modelo 3, com os obtidos considerando a formulação proposta por Huse.

Usando o CD do *riser* de montante igual a 1.2, que corresponde a um valor médio, têm-se:

Tabela 5.1- Comparação da Velocidade na Esteira Medida nos Ensaio e Obtida com a Formulação de Huse (CD =1.2).

Espaçamento	Velocidade à Montante do Riser 1 (m/s)	Velocidade Medida nos Ensaios (m/s)	Velocidade Obtida com a Formulação de Huse (m/s)	Diferença (%)
3D	0.6	0.144	0.307	113.2
	0.8	0.341	0.409	19.9
	1.0	0.384	0.511	33.1
	1.2	0.487	0.613	25.9
5D	0.6	0.278	0.355	27.7
	0.8	0.429	0.474	10.5
	1.0	0.475	0.592	24.6
	1.2	0.623	0.710	14.0

Usando o CD do *riser* de montante igual a 2, que corresponde a um valor em que há vibrações transversais e longitudinais, têm-se:

Tabela 5.2- Comparação da Velocidade na Esteira Medida nos Ensaio e Obtida com a Formulação de Huse (CD = 2).

Espaçamento	Velocidade à Montante do Riser 1 (m/s)	Velocidade Medida nos Ensaios (m/s)	Velocidade Obtida com a Formulação de Huse (m/s)	Diferença (%)
3D	0.6	0.144	0.158	9.7
	0.8	0.341	0.211	-38.1
	1.0	0.384	0.264	-31.3
	1.2	0.487	0.316	-35.1
5D	0.6	0.278	0.250	-10.1
	0.8	0.429	0.333	-22.4
	1.0	0.475	0.417	-12.2
	1.2	0.623	0.500	-19.7

Os resultados acima mostram a validade da formulação proposta por Huse, desde de que o coeficiente de arrasto do *riser* de montante seja convenientemente escolhido, como dito anteriormente. É importante salientar, que a formulação de Huse é semi-empírica e o escoamento na esteira de um *riser* é extremamente complexo,

particularmente para valores elevados do número de Reynolds, como estudado neste trabalho.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Introdução

Neste Capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir da observação e análise dos resultados experimentais e numéricos, assim como, uma proposta para os trabalhos futuros, visto ser o assunto amplo e complexo, exigindo um aprofundamento das pesquisas.

6.2 Conclusões

A seguir, são apresentadas as principais conclusões sobre os estudos experimentais e numéricos da interferência entre *risers* alinhados e espaçados de 2, 3, 4 e 5D. O estudo da interferência é extremamente complexo, conforme mostrado nos estudos experimentais, e será influenciado pelo fenômeno de desprendimento de vórtices e pelas vibrações induzidas pela esteira.

Os estudos experimentais e os numéricos visaram o entendimento deste comportamento hidrodinâmico, e foi possível, também, quantificar a interferência, para o caso em que os *risers* estão espaçados de 2D, já que foi somente para este arranjo que ocorreu a colisão.

Os estudos experimentais de um *riser* isolado mostram que foram excitadas vibrações longitudinais e transversais, inclusive atingindo-se o valor de velocidade reduzida em que há o *lock in*. Estes resultados foram comparados com os disponíveis na literatura, especialmente os apresentados nas referências [28], [29] e [31], estando compatível com os resultados obtidos por estes pesquisadores.

A seguir, estão apresentadas as principais conclusões referentes aos resultados experimentais para um *riser* isolado:

- Os modelos estudados, 2 tubos de acrílico com espessura de parede de 3 e 4mm, e um de PVC, com espessura de parede de 7mm; possuíam frequências naturais dentro do intervalo de frequências de desprendimento de vórtices, capazes de serem excitadas pelas velocidades do carro dinamométrico. Este foi um dos requisitos dos ensaios.

- Os modelos 1 e 2 não resistiram às forças hidrodinâmicas amplificadas pelas vibrações induzidas por vórtices. É importante ressaltar que os cálculos estáticos mostravam que estes resistiriam.
- O modelo 3, tubo de PVC, resistiu bem às cargas hidrodinâmicas, mostrando ser um material mais adequado do que o acrílico, para este tipo de estudo, inclusive com menor amortecimento estrutural.
- As Figuras 3.45 e 3.46 apresentadas no Capítulo 3 e reproduzidas a seguir, mostram a boa qualidade dos resultados, já que as curvas obtidas para os diferentes modelos ensaiados ficaram próximas, sendo a pequena variação obtida em função dos modelos apresentarem frequências naturais distintas.

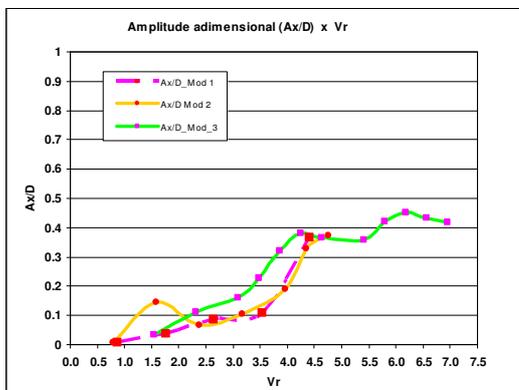


Figura 3.45- Gráfico de $(Ax/D)_{sig} \times V_R$ para os Modelos 1,2 e 3.

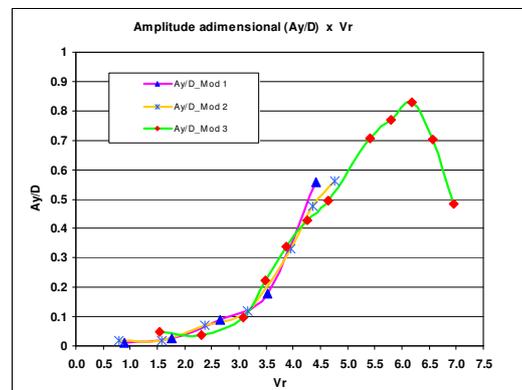


Figura 3.46 – Gráfico de $(Ay/D)_{sig} \times V_R$ para os Modelos 1, 2 e 3.

- A partir das Figuras 3.45 e 3.46, pode-se observar que a amplitude de vibração transversal será aproximadamente o dobro da longitudinal.
- A Figura 3.45 nos mostra que, próximo do intervalo de velocidade reduzida em que as vibrações transversais são máximas, isto é, quando há *lock in*, as vibrações longitudinais apresentam amplitudes constantes.
- A Figura 3.46 nos mostra que, a velocidade reduzida crítica é igual a 6.181, o que nos permite determinar o número de Strouhal, que é igual a 0.162.
- A comparação da amplitude da vibração transversal adimensionalizada máxima obtida no ensaio, igual a 1.07, com a obtida a partir de uma formulação empírica, ver referência [28], igual a 1.11, mostram a coerência dos resultados obtidos.
- A Figura 3.48 apresentada no Capítulo 3 e reproduzida a seguir, mostra que os resultados obtidos estão próximos dos obtidos por Vikestad para um cilindro livre para vibrar.

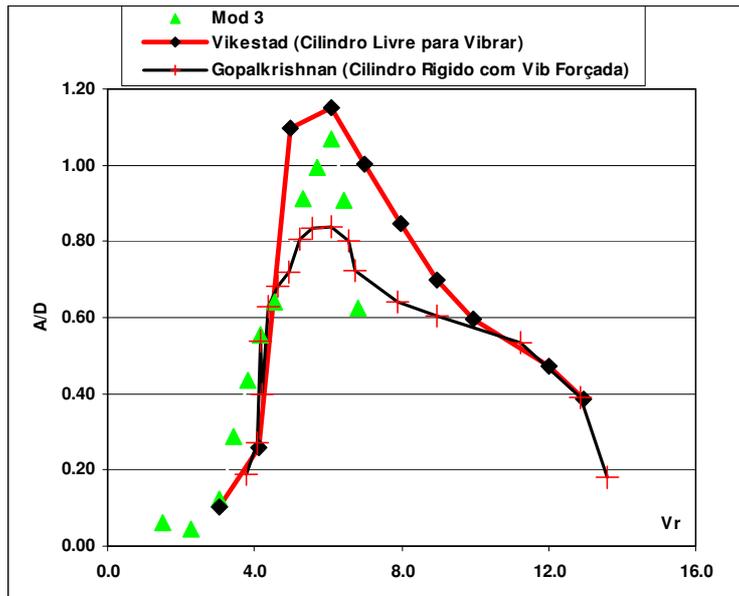


Figura 3.33- Comparação dos Resultados Obtidos no NMRI com os Obtidos por Vikestad e Gopalkrishnan.

As conclusões a seguir se referem ao caso de 2 *risers* alinhados; é importante salientar que ao longo dos Capítulos foram feitas considerações que refletem o efeito da esteira sobre o comportamento hidrodinâmico dos *risers*, quando eles estão alinhados.

- Comparando os espectros dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers*, para as diferentes velocidades e espaçamento estudados, pode-se observar que há uma atenuação da energia das vibrações na direção longitudinal e transversal do *riser* de jusante (R2) quando comparado a um *riser* isolado.
- As Figuras 6.1 e 6.2 ratificam a conclusão anterior.

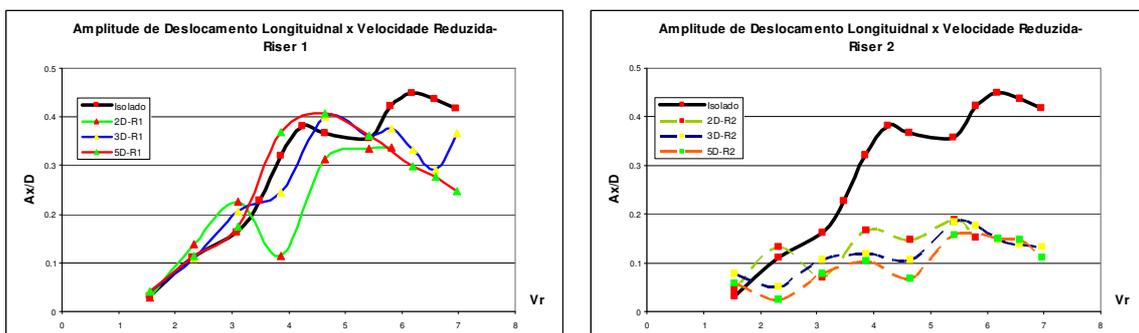


Figura 6.1- Comparação da $(Ax/D)_{sig} \times V_r$, para um *riser* isolado e os *risers* 1 e 2 espaçado de 2, 3 e 5D.

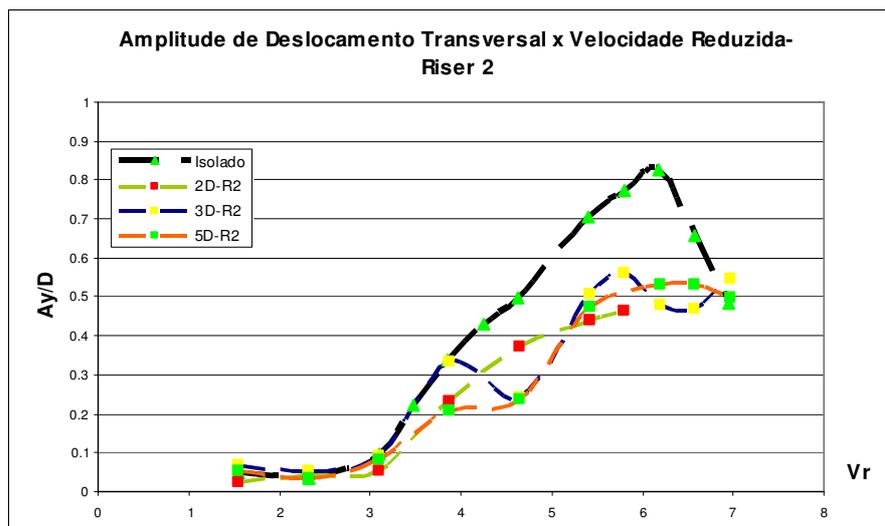


Figura 6.2- Comparação da $(Ay/D)_{sig} \times V_R$, para um riser isolado e o riser 2 espaçado de 2, 3 e 5D.

Nestas Figuras pode-se ver como o efeito da esteira irá afetar o comportamento hidrodinâmico dos *risers*, quando eles estão alinhados e espaçados de 2, 3 e 5D. As vibrações geradas pela esteira, conhecida pela sigla em inglês como *WIO (Wake Induced Oscillations)*, terá reflexos favoráveis na interferência entre os *risers*.

- Na direção longitudinal o *riser 1* (montante) irá vibrar como um *riser* isolado;
 - Na direção longitudinal, o *riser 2* (jusante) apresenta uma redução da amplitude de vibração;
 - Na direção transversal o *riser 2* apresenta uma redução da amplitude de vibração.
- Através das forças hidrodinâmicas medidas com as células de carga, podem-se obter os gráficos das variações destas forças em função do número de Reynolds, para os diferentes espaçamentos estudados. As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam estes gráficos.

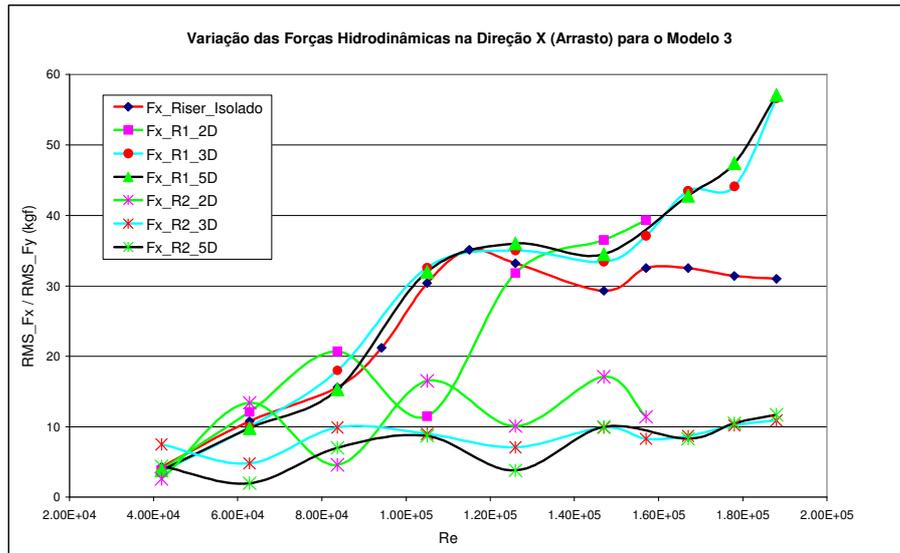


Figura 6.3- Gráfico de RMS_Fx x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 2, 3 e 5D para Modelo 3.

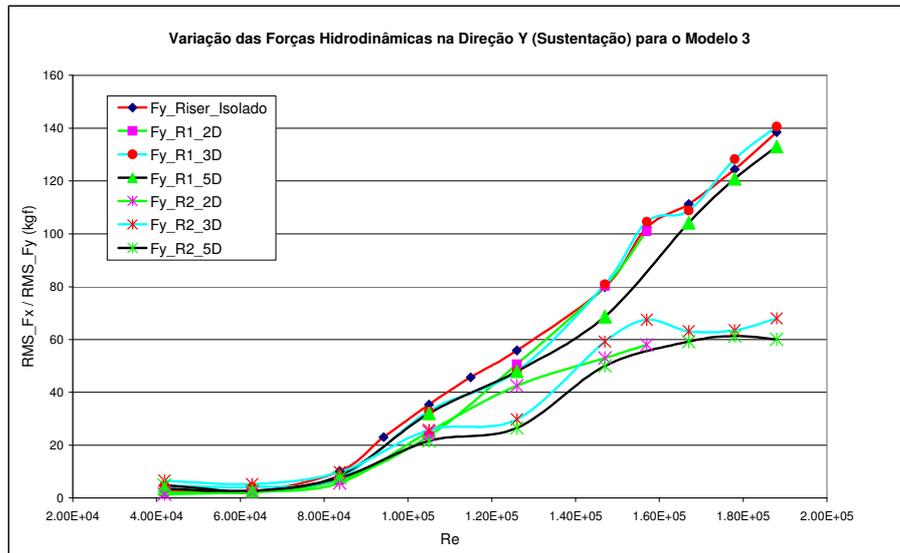


Figura 6.4- Gráfico de RMS_Fy x Re para um *Riser* Isolado e 2 *Risers* Alinhados e Espaçados de 2, 3 e 5D para Modelo 3.

Observando-se as Figuras 6.3 e 6.4, confirmam-se as constatações de que as vibrações geradas pela esteira, terão reflexos favoráveis na interferência entre os *risers*.

- Na direção longitudinal do *riser* 1 (montante) a variação da força será da mesma ordem de grandeza da que foi obtida para o *riser* isolado, sendo independente do espaçamento;
- Na direção longitudinal do *riser* 2 (jusante) a variação da força apresenta uma redução quando comparado ao *riser* isolado; ratificando a observação anterior relativa a redução da amplitude de vibração;

- Na direção transversal do *riser* 1 (montante) a variação da força será da mesma ordem de grandeza da que foi obtida para o *riser* isolado, sendo independente do espaçamento;
 - Na direção transversal do *riser* 2 (jusante) a variação da força apresenta uma redução quando comparado ao *riser* isolado; ratificando a observação anterior relativa a redução da amplitude de vibração.
 - É importante salientar, que a referência [8], menciona que o *riser* 1 (montante) pode ser tratado com um *riser* isolado, ver Capítulo 2. Esta tendência se confirmou nos resultados das variações das forças hidrodinâmicas, assim como nos resultados das vibrações longitudinais medidas no ensaio do NMRI e nos resultados apresentados na referência [21] para um espaçamento de 2 e 3D, e discutidos no Capítulo 3.
- Os valores dos coeficientes de arrasto médios em função do espaçamento, confirmam a existência do efeito de sombra. É importante salientar, que o efeito de sombra é mais expressivo para valores baixos de Reynolds. Isto é facilmente entendido, já que à medida que velocidade de escoamento aumenta, e conseqüentemente, o número de Reynolds, o ponto de descolamento da camada limite se desloca para jusante do *riser* 1 (montante), gerando um estreitamento da esteira. A Tabela 4.4 associada à Figura 4.5, mostra que este ângulo pode chegar a 105 graus para velocidade de escoamento de 0.5 m/s.
 - Para os casos estudados, só houve colisões para um afastamento entre eixos igual a 2D, quando submetidos a velocidades de 1.4 e 1.5 m/s. É importante salientar que a deflexão estática gerada pelo arrasto médio não provocaria as colisões entre os risers, ver Tabela 3.53. Portanto, as colisões só ocorreram devido às vibrações longitudinais dos risers.
 - Considerando que o efeito de sombra é mais expressivo para os risers espaçados de 2D, e baseando-se na observação anterior, pode-se concluir que as colisões entre os risers é função das vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices, sendo um problema dinâmico, não podendo ser tratado estaticamente, aplicando-se somente a formulação de Huse.
 - Conforme observado anteriormente, de que as vibrações induzidas pela esteira tendem a reduzir as amplitudes das vibrações longitudinais do *riser* 2 (jusante),

para os casos estudados, pode-se afirmar que quanto maior a velocidade de escoamento, mais estreita e turbulenta será a esteira, gerando efeitos benéficos sobre o riser de jusante, isto é, haverá uma redução da amplitude das vibrações longitudinais deste riser.

- As análises numéricas, usando a metodologia da dinâmica dos fluidos computacionais, mostraram-se úteis para a determinação dos coeficientes hidrodinâmicos (arrasto e sustentação), permitindo, estimar o comprimento da esteira, através do coeficiente de arrasto médio do riser de jusante.
- O uso de uma modelagem 2D associado a um modelo de turbulência, denominado de SST, quando comparado a um modelo 3D, mostrou bons resultados. Conduzindo a um bom custo computacional (tempo de processamento da ordem de 1/6 da simulação 3D).
- No Capítulo 5, foi apresentada uma validação da formulação proposta por Huse. Esta validação foi feita através das comparações com os resultados numéricos e experimentais.
- Conforme salientado no capítulo 5, a formulação de Huse conduz a bons resultados desde que o coeficiente de arrasto do *riser* de montante seja escolhido de forma apropriada, isto é, este deverá considerar uma amplificação; para os casos estudados é recomendado que seja escolhido um valor entre 1.7 e 2.
- Complementado a observação anterior, o uso da formulação de Huse por si só não resolve o problema. Deverá ser associado a esta, um estudo dinâmico que considere as vibrações *in-line*.

6.3 Trabalhos Futuros

Os resultados experimentais obtidos, conduziram a conclusões importantes para que no futuro seja proposta uma metodologia para análise de interferência. Contudo, ainda há um longo caminho a ser percorrido, visto que nas pesquisas bibliográficas não foi encontrada menção por exemplo, de que há uma redução da amplitude das vibrações transversais do riser de jusante. Portanto, como 1ª sugestão para trabalhos futuros, que seja feita uma validação desta importante constatação.

Conduzir estudos experimentais com diferentes arranjos que contemplem espaçamento de 5 a 15D. Conforme mencionado anteriormente, os estudos

experimentais realizados junto ao NMRI contemplaram outros arranjos, como lado a lado (*side by side*, ver Figura 1.5) e oblíquo (*staggered*, ver Figura 1.6).

Conduzir estudos experimentais com diferentes arranjos que contemplem espaçamento de 2 a 15D. Com *risers* de diferentes diâmetros e diferentes arranjos em função dos seus diâmetros, isto é, riser de maior diâmetro à montante e espaçado de 2 a 15D (alinhados, oblíquos e lado a lado); posteriormente riser de menor diâmetro à montante e espaçado de 2 a 15D (alinhados, oblíquos e lado a lado).

Conduzir estudos experimentais com diferentes arranjos que contemplem espaçamento de 2 a 15D, com o uso de supressores de vórtices (*strakes*).

Verificar experimentalmente, como será a variação do coeficiente de sustentação de um cilindro flexível em função das forças de excitação e de amortecimento, assim como em função da parcela de massa adicionada de fluido para várias velocidades e acelerações. Comparar com os resultados de um cilindro rígido e tentar estabelecer relações semi-empíricas, de forma que possa ser usado em programas para análise global.

Na pesquisa bibliográfica foi mencionado por vários autores, ver referências [12], [18] e [19], a ocorrência de uma instabilidade do *riser* de jusante. Contudo, este fenômeno não ocorreu nos estudos experimentais realizados no NMRI. Fica, portanto, a sugestão para o estudo deste fenômeno.

Também, que seja validado experimentalmente a extensão da esteira, que foi feita de forma numérica, indicando valores de 60 vezes o diâmetro, isto é, de pouco interesse prático.

No que se refere aos estudos numéricos, o uso do programa CFX, que emprega o método da dinâmica dos fluidos computacionais, se mostrou uma boa ferramenta para avaliar os coeficientes hidrodinâmicos, usando uma modelagem 2D. Quando foi usado para simular uma interação fluido-estrutura, surgiram problemas de malha. Foi, então, gerada uma malha hexaédrica que se mostrou, com elevado custo computacional e não resolveu o problema da ocorrência de volumes negativos. Portanto, fica a sugestão de verificar as potencialidades do programa, quando há movimentação de malha.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Ribeiro, E. J. B., *Análise de Risers em Plataformas Spar Buoy* – Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – 1999.
- 2 Chakrabarti, S., *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Great Britain, Computational Mechanics Publications, Springer- Verlag, 1987.
- 3 Chin, Y. D., Wang, X., “Mechanics of Heat Loss in Dry Tree Top-Tensioned Riser”- *Offshore Technology Conference*, OTC16501, Houston, Texas, USA, 3-6 May 2004.
- 4 Chen, C.Y., Mills, T., “A Review of In-Place Design Approaches for Spar Hulls”- *24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE 2005-67407, Halkidiki, Greece, 12-17 June 2005.
- 5 Huse, E., “Collision Criteria for deep-sea TLP riser arrays”, *Hydroelasticity in Marine Technology*, Faltinsen, 1994, Rotterdam.
- 6 Blevins, R. D., *Flow-Induced Vibrations*. 2nd ed. Malabar- Florida, Krieger Publishing Company, 1994.
- 7 White, F. M.- *Fluids Mechanics*, 4 ed., Estados Unidos, Mc Graw Hill, 2001.
- 8 DNV-RP-F203 (Draft), “Riser Interference”, *Det Norske Veritas*, February 2005.
- 9 DNV-OS-F201, “Dynamic Risers”, *Det Norske Veritas*, Januray 2001.
- 10 API 2RD, “Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Plattform (TLPs)”, *American Petroleum Institute*, June 1998.

- 11 Allen, D. W., Henning, D. L., Lee, L. “Riser Interference Tests on Flexible Tubulars at Prototype Reynolds Numbers”. Offshore Technology Conference, OTC 17290, 2005, Houston, Texas, EUA.
- 12 Huse, E., “Experimental Investigation of Deep Sea Riser Interaction.”, Offshore Technology Conference, OTC 8070, 1996, Houston, Texas, USA.
- 13 Santos, C. M. P. M. – *Análise de Estruturas Esbeltas Offshore Sujeitas a Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV)* – Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – 2005.
- 14 Lacerda, T. A. G. - *Análise de Movimentos Induzidos por Vórtices em Plataformas Flutuantes*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – 2007.
- 15 Huse, E., “Drag in Oscillatory Flow Interpreted From Wake Considerations”, Offshore Technology Conference, OTC 5370, 1987, Houston, Texas, USA.
- 16 Huse, E., “Interaction in Deep-Sea Riser Arrays”, Offshore Technology Conference, OTC 7237, 1993, Houston, Texas, USA.
- 17 Schlichting, H., Gersten, K., *Boundary Layer Theory*, 8 ed, Berlin, Springer-Verlag, 2000.
- 18 Wu, W. , Huang, S. , Barltrop, N. – “Multiple Stable/Unstable Equilibria of a Cylinder in the Wake of an Upstream Cylinder”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* v. 125, pp. 103-107, May 2003.
- 19 Wu, W., Huang, S., Barltrop, N. “Current Induced Instability of Two Circular Cylinders”, *Applied Ocean Research* v. 24, pp. 287-297, 2002.
- 20 Zdravkovich, M. M., “Review of Flow Interference Between Circular

- Cylinders in Various Arrangements”, Transaction of ASME, Journal of Fluid Engineering, v. 99, No 4, pp. 618-633, 1977.
- 21 Herfjord, K., Bryndum, M., “Hydrodynamic Interaction Between Two Cylinders in Steady Flow”, 11th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001, Stavanger, Noruega.
 - 22 Van Dyke, M. – An Album of Fluid Motion, 4th ed., Stanford- California, The Parabolic Press, 1988.
 - 23 Sarpkaya, T e Isaacson, M., *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
 - 24 Mourelle, M.M. e Casaprima, E.– *Manual do Usuário do Programa ANFLEX*, Petrobras/Cenpes/PDP/MC, 2004.
 - 25 Barltrop, N. D. P e Adams, A. J., *Dynamic of Fixed Marine Structures*, Butterworth- Heinemann Ltd, 3^a ed., 1991.
 - 26 Silva, E. M. C.- *Vibração Auto Induzida por Vorticidade* – Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – 2007.
 - 27 Dijk, R., V., Magee, A, Perryman, S., “Model Test Experience on Vortex Induced Vibrations of Truss Spars”, Offshore Technology Conference, OTC 15242, 2003, Houston, Texas, USA.
 - 28 Williamson, C., H., K., Govardhan, R., Vortex-Induced Vibrations- Annual Review Fluid Mech. 2004.36:413-55, 2004.
 - 29 Vikestad, K. – Multi-frequency response of a cylinder subjected vortex shedding and support motions, Tese de D.Sc, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega, 1998.
 - 30 Vikestad, K., Larsen, C., Vandiver, K., Experimental Study of Excited Circular

- in Current, 16th *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE 1997, 12-17 June 2005.
- 31 Gopalkrishnan, R. – Vortex-Induced Forces on Oscillating Cylinders, Tese de D.Sc, Massachussets Institute of Technology, Boston, EUA, 1993.
- 32 ANSYS- CFX- Solver, Release 10.0- Theory, 2004.
- 33 Neto, A. S. – *Apostila de Turbulência nos Fluidos Aplicada*- Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia- MG- Brasil.
- 34 ANSYS - CFX- Solver, Release 10.0 – Modeling, 2004.
- 35 Menter, F. R., Egorov, Y., “A Scale-Adaptive Simulation Model using Two Equation Models”, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2005-1995.
- 36 Menter, F. R., Kuntz, M., Langtry, R.- “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model”, *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Begell House, Inc, K. Hanjalić, Y. Nagano, M. Tummers Editores, 2003.
- 37 Meneghini, J. R. – *Projeto de Pesquisa no Tópico Geração e Desprendimento de Vórtices no escoamento ao Redor de Cilindros* – Trabalho de Livre Docência , USP, São Paulo – SP- Brasil – 2002.
- 38 Kundu, P. K., Cohen, I. M., *Fluids Mechanics*, 2^a ed., Estados Unidos, Academic Press, 2002.
- 39 Norberg, C. – “Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and New Measurements”, *Journal of Fluids and Structures*, v. 17, pp. 57-96, 2003.
- 40 Carmo, B. S. – *Estudo Numérico do Escoamento ao Redor de Cilindros Alinhados*, Tese de M. Sc., EPUSP, São Paulo, SP, Brasil – 2005.

- 41 Vandiver, K., Li, L. – Shear 7 V4.4 Theoretical Manual, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- 42 Vandiver, J. K.; Lee, L.; Leverette, S. e Marcollo, H. – User Guide for Shear7 – Version 4.3 – For Vortex-Induced Vibration response Prediction of Beams or Cables with Slowly Varying Tension in Sheared or Uniform Flow- Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- 43 ANSYS - CFX- Release 10.0 – Tutorials, 2004.
- 44 Fox, R. W., Mc Donald, A., T., Pritchard, P. J. – Mecânica dos Fluidos, 6ª ed., Livros Técnicos e Científicos, 2006.
- 45 Maliska, C. R., Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, 2ª ed, Rio de Janeiro, RJ, Livros Técnicos e Científicos, 2004.
- 46 ANSYS- CFX- Release 10.0 – Introduction, 2004.
- 47 ANSYS- CFX- Release 10.0 – Reference Guide, 2004.

ANEXO A

DETERMINAÇÃO DA RAZÃO DE MASSA PARA RISERS.

A.1) INTRODUÇÃO

O arquivo mathcad a seguir, apresenta a determinação da razão de massa para diferentes tipos de *Risers*, de acordo com os artigos *Multiple Stable / Unstable Equilibria of a Cylinder in the Wake of an Upstream Cylinder*, referência [18], e *Current Induced Instability of Two Circular Cylinders - Applied Ocean Research*, referência [19]:

Fatores de transformação de unidade:

$$l_{in} = 0.025m$$

$$ppg := 1175.17 \frac{N}{m^3}$$

A.2) Determinação da Razão de Massa para Diferentes Tipos de *Risers*

A.2.1) *Riser* Rígido Vertical de Produção de Plataforma do Tipo *Spar Buoy*

$$D_{ext} := 10.in \quad \text{Diâmetro externo do riser}$$

$$w_{riser} := 0.5.in \quad \text{Espessura de parede do riser}$$

$$D_{int} := D_{ext} - 2 \cdot w_{riser} \quad \text{Diâmetro interno do riser}$$

$$D_{ext_col} := 4.5.in \quad \text{Diâmetro externo da coluna de produção}$$

$$w_{col} := 0.5.in \quad \text{Espessura de parede da coluna de produção}$$

$$D_{int_col} := D_{ext_col} - 2 \cdot w_{col} \quad \text{Diâmetro interno da coluna de produção}$$

$$\gamma_{anular} := 1900 \frac{N}{m^3} \quad \text{Peso específico do fluido do anular (Gás lift)}$$

$$\gamma_{prod} := 9000 \frac{N}{m^3} \quad \text{Peso específico do fluido produzido (Óleo)}$$

$$\gamma_{aco} := 77000 \frac{N}{m^3} \quad \text{Peso específico do aço}$$

$$\rho_{agua} := 1025 \frac{kg}{m^3} \quad \text{Peso específico da água do mar}$$

$$A_{ris} := \frac{\pi (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \quad \text{Área de aço do riser}$$

$$A_{col} := \frac{\pi (D_{ext_col}^2 - D_{int_col}^2)}{4} \quad \text{Área de aço da coluna de produção}$$

$$A_{int_col} := \frac{\pi \cdot D_{int_col}^2}{4} \quad \text{Área interna da coluna de produção}$$

$$A_{anular} := \frac{\pi (D_{int}^2 - D_{ext_col}^2)}{4} \quad \text{Área interna do riser (Espaço anular)}$$

$$Pris1 := A_{ris} \cdot \gamma_{aco} \quad \text{Peso unitário do riser (Somente a parede)}$$

$$Pris2 := A_{col} \cdot \gamma_{aco} \quad \text{Peso unitário da coluna de produção (Somente a parede)}$$

$$Pris3 := A_{anular} \cdot \gamma_{anular} \quad \text{Peso unitário do fluido no anular (Gás lift)}$$

$$Pris4 := A_{int_col} \cdot \gamma_{flprod} \quad \text{Peso unitário do fluido na coluna (Óleo)}$$

$$Pris_{total} := Pris1 + Pris2 + Pris3 + Pris4 \quad \text{Peso unitário total do riser}$$

Massa unitária total do riser

$$M := \frac{Pris_{total}}{g}$$

Massa adicional

$$M_{adic} := \left(\pi \frac{D_{ext}^2}{4} \right) \cdot \rho_{agua}$$

Razão de Massa:

$$a := \frac{(\rho_{agua} \cdot D_{ext}^2)}{2(M + M_{adic})} \quad a = 0.193$$

A.2.2) Riser Rígido Vertical de Perfuração

$$DR_{ext} := 10 \text{ in} \quad \text{Diâmetro externo do riser de perfuração (DR)}$$

$$w_{tdr} := \frac{1}{2} \text{ in} \quad \text{Espessura de parede do riser de perfuração (DR)}$$

$$DR_{int} := DR_{ext} - 2 \cdot w_{tdr} \quad \text{Diâmetro interno do riser de perfuração (DR)}$$

$$\gamma_{aco} := 77000 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \quad \text{Peso específico do aço}$$

$$\gamma_{lama} := 10 \cdot \text{ppg} \quad \text{Peso específico da lama de perfuração}$$

$$\text{Arisdr} := \frac{\pi \cdot (\text{DRext}^2 - \text{DRint}^2)}{4} \quad \text{Área de aço do riser}$$

$$\text{Ainldr} := \frac{\pi \cdot (\text{DRint}^2)}{4} \quad \text{Área interna do riser de perfuração}$$

$$\text{Pris1dr} := \text{Arisdr} \cdot \gamma_{\text{aço}} \quad \text{Peso unitário do riser (Somente a parede)}$$

$$\text{Pris2dr} := \text{Ainldr} \cdot \gamma_{\text{lama}} \quad \text{Peso unitário do fluido de perfuração}$$

$$\text{Prisdr_total} := \text{Pris1dr} + \text{Pris2dr} \quad \text{Peso unitário total do riser}$$

Massa unitária total do riser de perfuração

$$\text{Mdr} := \frac{\text{Prisdr_total}}{g}$$

Massa adicional

$$\text{Madic_DR} := \left(\pi \cdot \frac{\text{DRext}^2}{4} \right) \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Razão de Massa do Riser de Perfuração:

$$\text{adr} := \frac{(\rho_{\text{agua}} \cdot \text{DRext}^2)}{2(\text{Mdr} + \text{Madic_DR})} \quad \text{adr} = 0.187$$

A.2.3) Riser Flexível de Produção de 6 polegadas

$$\text{DFext} := 8.4\text{in} \quad \text{Diâmetro externo do riser flexível}$$

$$\text{DFint} := 6\text{in} \quad \text{Diâmetro interno do riser flexível}$$

$$\text{Aintrf} := \frac{\pi \cdot (\text{DFint}^2)}{4} \quad \text{Área interna do riser de perfuração}$$

$$\text{Pris1fl} := 680 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad \text{Peso unitário do riser no ar vazio}$$

$$\text{Pris2fl} := \text{Aintrf} \cdot \gamma_{\text{flprod}} \quad \text{Peso unitário do fluido interno}$$

$$\text{Prisfl_total} := \text{Pris1fl} + \text{Pris2fl} \quad \text{Peso unitário total do riser}$$

Massa unitária total do riser de flexível

$$\text{Mfl} := \frac{\text{Prisfl_total}}{g}$$

Massa Adicional

$$M_{\text{adic_fl}} := \left(\pi \frac{D_{\text{Fext}}^2}{4} \right) \rho_{\text{agua}}$$

Razão de Massa do Riser Flexível:

$$a_{\text{fl}} := \frac{(\rho_{\text{agua}} D_{\text{Fext}}^2)}{2 \cdot (M_{\text{fl}} + M_{\text{adic_fl}})} \quad a_{\text{fl}} = 0.19$$

Nota: No artigo mencionado acima o autor afirma que as razões de massa para os *risers* ficam na faixa de 0.2, o que foi confirmado pelos cálculos acima.

ANEXO B

DESCRIÇÃO DA FORMAÇÃO E DESPRENDIMENTO DOS VÓRTICES E ESTUDO DA CAMADA LIMITE.

B.1) Introdução

Neste anexo, está descrito como os vórtices se formam e por que eles se desprendem. Além disto, é apresentado um estudo da camada limite, mostrando como será sua variação ao longo de uma placa plana.

B.2) Mecanismo Físico da Formação e Desprendimento dos Vórtices

Conforme mencionado pela referência [37], foi Gerrard que em 1966 sugeriu que a interação mútua entre as duas camadas cisalhantes, formadas devido à separação da camada limite, exerce forte influência no processo de formação dos vórtices da esteira. Gerrard postulou que um vórtice cresce ganhando circulação oriunda da camada cisalhante a qual ele está conectado; em determinado instante ele torna-se tão intenso que atrai a camada cisalhante oposta. Esta atração é gerada pela velocidade induzida pelo vórtice em crescimento. A aproximação de fluido com vorticidade oposta, em uma concentração suficientemente intensa, interrompe a alimentação de circulação do vórtice em crescimento e então, ele é desconectado da camada cisalhante e a seguir, é convectado para jusante formando a esteira. A Figura B.1 a seguir mostra esquematicamente o modelo proposto por Gerrard.

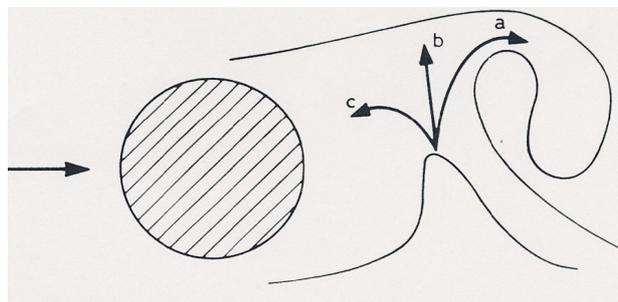


Figura B.1- Esquema de Formação e Desprendimento de um Vórtice.

Na Figura anterior, pode-se verificar 3 caminhos possíveis para as partículas de fluido da camada cisalhante quando atraída pela velocidade induzida da camada oposta:

- a) Elas podem misturar-se com o vórtice que está se formando no lado oposto da esteira;
- b) Elas podem mover-se em direção da camada cisalhante oposta, a qual possui vorticidade de sinal reverso;
- c) Elas podem voltar na direção da região da esteira próxima ao corpo.

O balanço da quantidade de fluido que segue cada um destes caminhos controla a frequência de geração e desprendimento dos vórtices, a intensidade dos mesmos e a pressão na região posterior do corpo (pressão de base).

A parcela do escoamento que segue o caminho indicado pela seta **a** da Figura anterior, mistura-se com o fluido que está formando um vórtice na região superior da esteira. Devido ao fato de possuírem vorticidade com sinais contrários, há uma diminuição da circulação do vórtice que atraiu o vórtice do lado oposto.

A parcela do escoamento que segue o caminho indicado pela seta **b** tem um importante papel no que se refere à estabilidade do escoamento. Havendo uma diminuição da pressão, a camada cisalhante que está se separando do corpo torna-se mais intensa, por conseguinte, o vórtice também se torna mais intenso. Com isto, uma parcela maior da camada cisalhante oposta atravessará a linha de centro da esteira e uma porção maior de fluido com vorticidade oposta irá se chocar com esta camada fazendo com que haja uma diminuição da intensidade do vórtice que está crescendo. Isto, em última instância, causa a interrupção da alimentação de circulação para este vórtice. Após esta interrupção, o vórtice adquire sua circulação final e desprende-se da camada cisalhante a partir da qual ele se formou.

Finalmente, a parcela do escoamento que segue o caminho indicado pela seta **c**, colabora para a formação de um novo vórtice na parte inferior da esteira, fechando desta maneira o ciclo de geração e desprendimento de vórtices.

B.3) Estudo da Camada Limite

B.3.1) Introdução

Conforme publicado na maioria dos compêndios de mecânica dos fluidos, foi o pesquisador alemão Prandtl, que no início do século XX, suscitou a existência da camada limite nos escoamentos reais. Até então, se considerava o fluido como ideal, isto é, desprezavam-se os efeitos da viscosidade (fluido invíscido), e aplicava-se a teoria potencial para obtenção das linhas de corrente ao redor de corpos submersos nos fluidos. Havia, no entanto, sérias divergências no resultado referente ao cálculo do arrasto em corpos submersos em um escoamento de fluido, já que a teoria potencial fornecia para corpos simétricos força de arrasto nula, que não era comprovada por estudos experimentais. Esta discordância é chamada na literatura de paradoxo de D'Alembert. A Figura B-1 a seguir ilustra a variação de pressão em torno de um cilindro para um escoamento ideal e para um escoamento real com diferentes valores do número de Reynolds.

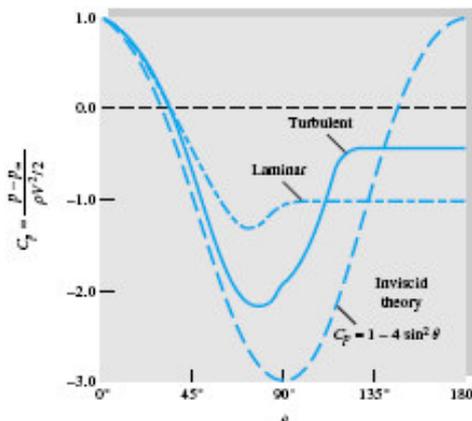


Figura B-1 – Distribuição de Pressão em Torno de um Cilindro.

Tal discordância foi explicada por Prandtl, através da existência de uma fina camada próxima da parede do cilindro, na qual os efeitos viscosos são de grande importância, que foi chamada por ele de camada limite. Nesta fina camada, junto à parede do cilindro, as forças viscosas são da mesma ordem de grandeza que as forças de inércia, já que a velocidade é nula na parede do cilindro e cresce rapidamente na direção normal até atingir o valor da velocidade do escoamento ao longe, onde é válida a teoria potencial, já que os

efeitos da viscosidade são desprezíveis. Esta constatação nos permite estimar a ordem de grandeza da espessura desta camada em função das características particulares do escoamento, cuja dedução está apresentada a seguir.

B.3.2) Determinação da Ordem de Grandeza da Camada Limite para Escoamento em Placas Planas.

Considerando a equação da continuidade e a de Navier-Stokes, apresentadas a seguir:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{B.2})$$

Assumindo o escoamento como permanente e $u \gg v$, a força de inércia por unidade de massa ($f_{inercia}$) na direção x é dada por:

$$f_{inercia} \approx u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{B.3})$$

Sendo L uma dimensão característica da parede e V a velocidade característica do escoamento, tal força será proporcional a:

$$f_{inercia} \propto \frac{V^2}{L} \quad (\text{B.4})$$

O termo de difusão de quantidade de movimento da equação de Navier-Stokes, por sua vez, nada mais é do que a força viscosa por unidade de massa ($f_{viscosa}$), dada pela 2ª parcela do lado direito da equação (B.1) apresentada anteriormente.

$$f_{viscosa} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \approx \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (\text{B.5})$$

já que na camada limite, temos:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \gg \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (\text{B.6})$$

$$f_{viscosa} \propto \nu \frac{V^2}{\delta^2} \quad (\text{B.7})$$

Admitindo a mesma ordem de grandeza para estas duas forças, temos:

$$\frac{V^2}{L} \approx o\left(\frac{\nu V}{\delta^2}\right) \quad (\text{B.8})$$

a qual, rearranjada nos fornece:

$$\frac{\delta}{L} \approx o\left[\left(\frac{\nu}{VL}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \approx o\left(\frac{1}{\sqrt{\text{Re}}}\right) \quad (\text{B.9})$$

O grupo de expressões apresentado é conhecido como equação de Prandtl e nos dá a ordem de grandeza da camada limite e permite concluir que, quanto maior o número de Reynolds, menor será a espessura da camada limite. De acordo com a referência [37], para um valor elevado do número de Reynolds, por exemplo $\text{Re}=10^6$, a espessura torna-se bastante reduzida e a velocidade passa de um valor nulo junto à parede para um valor $V_{\text{potencial}}$ a uma distância da mesma da ordem de 10^{-3} .

B.3.3) Variação da Pressão ao Longo da Camada Limite para Placas Planas

Considerando-se as variáveis adimensionalizadas a seguir:

$$u^* = \frac{u}{U}, \quad v^* = \frac{v}{U}, \quad p^* = \frac{p}{\rho U^2}, \quad x^* = \frac{x}{L}, \quad y^* = \frac{y}{L}, \quad \delta^* = \frac{\delta}{L}. \quad (\text{B.10})$$

Podemos reescrever as equações [B.1] e [B.2], para o caso de 2D e regime permanente:

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (\text{B.11})$$

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (\text{B.12})$$

$$u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (\text{B.13})$$

Reescrevendo a equação de Prandtl [B.9]:

$$\frac{\delta}{L} = \delta^* \approx o\left(\frac{1}{\sqrt{\text{Re}}}\right) \quad (\text{B.14})$$

admitindo-se que $u^* \approx o(1)$ e $x^* \approx o(1)$, temos pela equação da continuidade:

$$\frac{v^*}{y^*} \approx o(1) \quad (\text{B.15})$$

Como na camada limite $y^* \approx o(\delta^*)$, o que implica que $v^* \approx o(\delta^*)$.

Devido à premissa básica apresentada na equação [B.14], as parcelas do termo difusivo (2ª parcela do lado direito das equações B-13 e B-14) apresentam as seguintes ordens de grandeza:

$$\frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \approx o(\delta^*)^2 \left(\frac{o(1)}{o(1)} \right) + \frac{o(1)}{o(\delta^*)^2} \quad (\text{B.16})$$

Com isto, conclui-se que o produto de $1/\text{Re}$ por $\partial^2 u^* / \partial x^{*2}$ é desprezível, já que ele é de ordem $o(\delta^*)^2$. No entanto, o produto $1/\text{Re}$ por $\partial^2 u^* / \partial y^{*2}$, por envolver um produto de ordem $o(\delta^*)^2$ por outro de ordem $o(1/\delta^*)^2$, passa a ser de ordem $o(1)$, não sendo, portanto, desprezível.

Na equação de Navier Stokes na direção y , todos os termos convectivos terão ordem $o(\delta^*)$. Se fizermos uma análise para o termo difusivo similar ao que foi feito para a direção x , temos que a maior parcela deste termo é de ordem $o(\delta^*)$.

Como todos os outros termos na equação de Navier-Stokes são, no máximo de ordem $o(\delta^*)$, $\partial p^* / \partial y^*$ poderá também ter no máximo esta ordem, isto é:

$$\frac{\partial p^*}{\partial y^*} \approx o(\delta^*) \ll o(1) \quad (\text{B.17})$$

$$\therefore \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \approx 0 \quad (\text{B.18})$$

A interpretação física da equação [B.18] é que o gradiente de pressão normal à parede é desprezível, o que significa que $p^* = p^*(x)$ apenas. Conseqüentemente, a pressão

atuante na camada limite é gerada pelo escoamento externo a ela. Dentro da camada limite a pressão não varia com y .

B.3.4) Influência da Curvatura nas Equações da Camada Limite

Como o foco deste trabalho está relacionado a corpos cilíndricos, vamos verificar como as equações da camada limite apresentadas anteriormente são afetadas pela curvatura.

Definindo-se um sistema de coordenadas (s,n) orientado localmente com a parede do cilindro, de forma que as curvas com n constante seguem a forma da fronteira do corpo, enquanto as curvas com s constante são localmente normais a esta fronteira. Chamamos de R_c , o raio de curvatura da fronteira, sendo este positivo para o caso da parede ser externamente convexa e negativo no caso contrário.

De acordo com a referência [37], as equações de Prandtl para camada limite, apresentadas anteriormente em coordenada cartesianas, tornam-se:

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (\text{B.19})$$

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{ds} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} \quad (\text{B.20})$$

e

$$\frac{u^2}{R_c} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (\text{B.21})$$

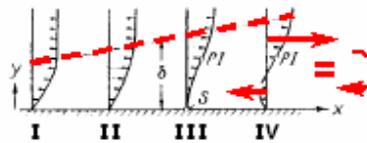
Em relação à equação da continuidade e de Navier-Stokes, podemos notar a existência de uma nova equação [B.21]. Esta equação indica que deve haver um gradiente radial de pressões para contrabalançar a componente da força centrífuga no escoamento ao longo de uma superfície curva. Analisando a ordem de grandeza de Δp na camada limite, verifica-se que:

$$\Delta p \approx o\left(\rho U^2 \frac{\delta}{R_c}\right) \quad (\text{B.22})$$

Este termo poderá ser desprezado se, e somente se, $R_C \gg \delta$. Quando isto ocorre, $\Delta p \approx 0$ e as equações da camada limite têm exatamente a mesma forma daquelas apresentadas anteriormente.

B.3.5) Separação da Camada Limite

De acordo com a referência [37], há na camada limite um gradiente de pressões adverso, isto é, $dp/dx > 0$, representado pela linha tracejada na Figura B-2 a seguir; as partículas de fluido perdem energia cinética devido às forças viscosas geradas junto à parede do corpo. Esta condição adversa irá provocar ao longo da camada limite uma diminuição da velocidade até que a mesma se torne nula, representado pelo estágio III na Figura B-2; neste ponto de gradiente nulo ($du/dy|_{parede} = 0$), temos a separação ou o descolamento da camada limite; a partir deste estágio, haverá uma inversão do sentido do fluxo, gerando um vórtice como representado no estágio IV da Figura B-2.



B-2- Distribuição de Pressão na Camada Limite de uma Placa Plana.

Para maiores discussões sobre a separação da camada limite, ver referência [37].

ANEXO C

RESULTADO DOS ESTUDOS EXPERIMENTAIS

C.1 Introdução

Neste anexo, estão apresentados os resultados dos estudos experimentais conduzidos junto ao NMRI.

Serão apresentados somente os casos que não constam do Capítulo 3.

C.2 Resultados dos Estudos Experimentais

Inicialmente, serão apresentados os resultados dos estudos experimentais para o escoamento em torno de 1 *riser* para as velocidades apresentadas na Tabela 3.14 do Capítulo 3; estes resultados foram obtidos nos estudos experimentais conduzidos junto ao NMRI.

C.2.1 Escoamento ao Redor de um *Riser*

Foi inicialmente verificado o comportamento hidrodinâmico de um *riser* isolado, para que fosse possível avaliar como o efeito da esteira iria afetar o comportamento do *riser* de jusante e permitir uma verificação se haveria impacto, também, no comportamento hidrodinâmico do *riser* de montante.

Os valores do número de Reynolds, número de Strouhal e as frequências de desprendimento de vórtices, estão apresentados. na Tabela 3.18 do Capítulo 3.

C.2.1.1 Velocidade de 0.2 m/s

A Figura C-1 mostra os espectros das vibrações transversais e longitudinais obtidas para os modelos 1 e 2, nos pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

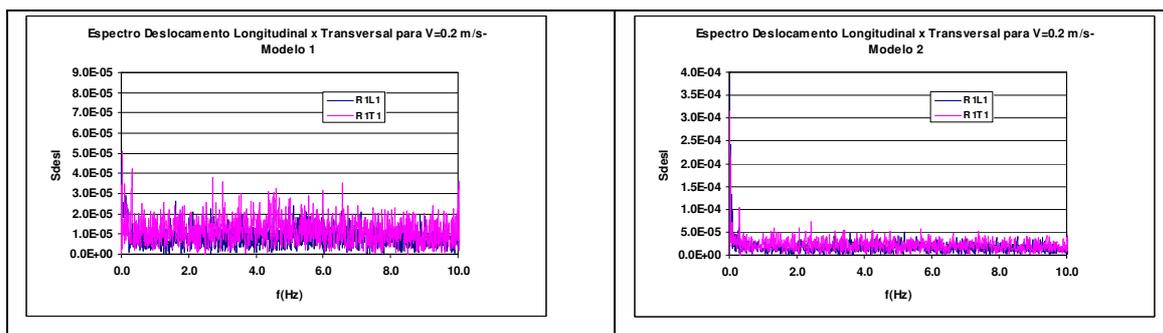


Figura C.1- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os Modelo 1 e 2.

Analisando os espectros, pode-se verificar que não foram excitadas as frequências naturais dos modelos, conclusão está ratificada pela amplitude de vibração adimensionalizadas que estão mostradas na Tabela C.1.

Tabela C.1- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
R1L1	0.008	0.007		
R1L2	0.009	0.011		
R1L3	0.012	0.006		
R1L4	0.012	0.015		
R1T1			0.013	0.0173
R1T2			0.007	0.0171
R1T3			0.018	0.0178

A Tabela C.2, mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.2- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.94 \times 10^4$.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	Mod.1	Mod. 2	Mod.1	Mod. 2
Máximo	3.762	3.777	1.104	1.259
Médio	1.082	1.714	0.073	-0.004
Desvio Padrão	0.531	0.337	0.243	0.250
Mínimo	-1.526	-0.407	-1.031	-1.204

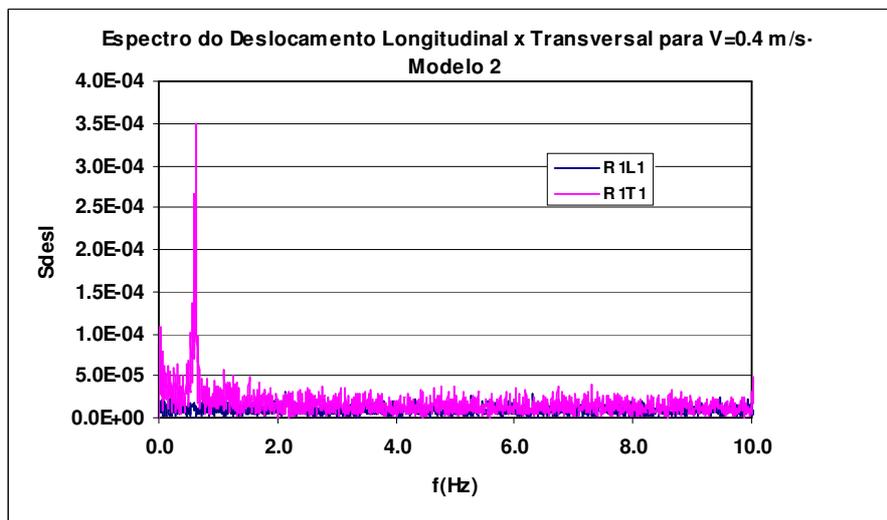
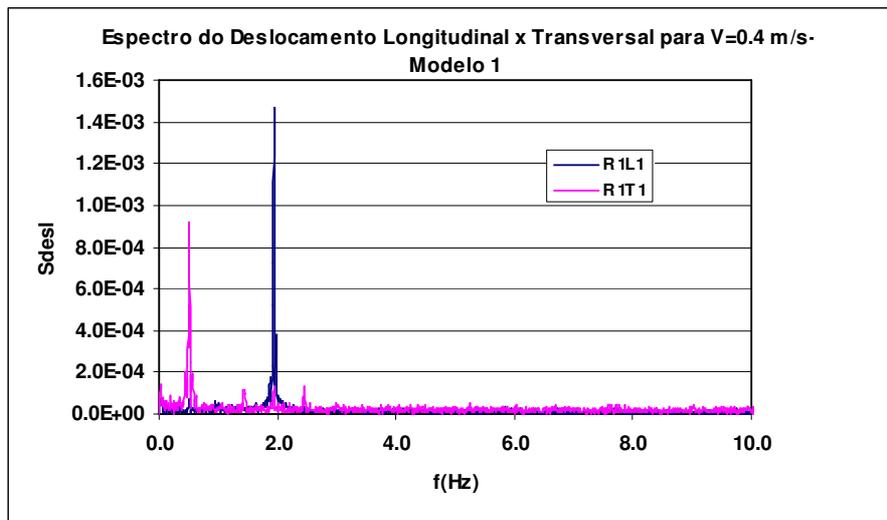
A Tabela C.3 mostra os coeficientes de arrasto e os coeficientes de sustentação, já que como foi mostrado acima não houve vibrações induzidas por vórtices, comportando-se o riser como um cilindro rígido.

Tabela C.3- Coeficiente de Arrasto Médio e Coeficiente de Sustentação.

	CD		CL	
	Mod.1	Mod. 2	Mod.1	Mod. 2
Médio	1.000	1.585		
Desvio Padrão			0.224	0.231

C.2.1.2 Velocidade de 0.4 m/s

A Figura C.2 mostra o espectro de deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1 dos modelos 1, 2 e 3.



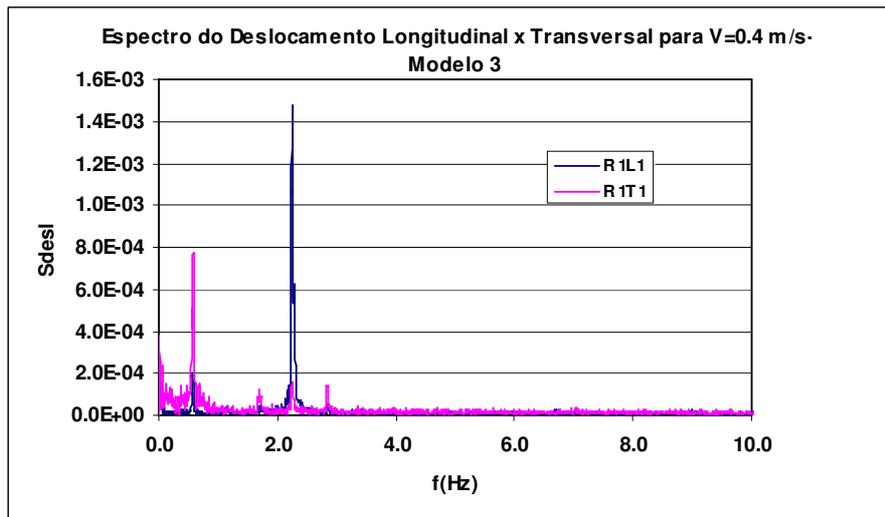


Figura C.2- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os Modelos 1, 2 e 3.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal dos modelos 1 e 3, pode-se observar que os modelos foram excitados em ambas as direções com maior energia na direção longitudinal; já para o modelo 2 há somente energia na direção transversal. O esperado seria haver também energia de excitação também na direção longitudinal do modelo 2, tem-se como causa provável uma falha no registro dos deslocamentos pela câmera superior.

Os valores de $(Ax/D)_{sig}$ e $(Ay/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.4, mostram que os modelos 1 e 3 foram excitados em ambas as direções; já o modelo 2 foi excitado predominantemente na direção transversal. É importante salientar que as amplitudes adimensionalizadas obtidas mostram que os modelos estão afastados da condição de *lock in*, isto é, quando a frequência de desprendimento dos vórtices está próxima da frequência natural.

Tabela C.4- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$			$(Ay/D)_{sig}$		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
R1L1	0.037	0.0146	0.0485			
R1L2	0.037	0.0081	0.0476			
R1L3	0.029	0.0047	0.0394			
R1L4	0.029	0.0214	0.0299			
R1T1				0.027	0.018	0.033
R1T2				0.025	0.018	0.032
R1T3				0.022	0.018	0.028

A Tabela C.5 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.5- Forças Hidrodinâmicos para $Re = 3.88 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2) e 4.19×10^4 (Modelo 3).

	Fx (kgf)			Fy (kgf)		
	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3
Máximo	11.402	6.857	11.483	4.373	2.354	7.258
Médio	5.042	4.841	4.498	0.164	-0.060	0.073
Desvio Padrão	3.100	0.383	4.264	1.556	0.628	3.037
Mínimo	-1.731	2.499	-3.748	-3.783	-2.190	-8.186

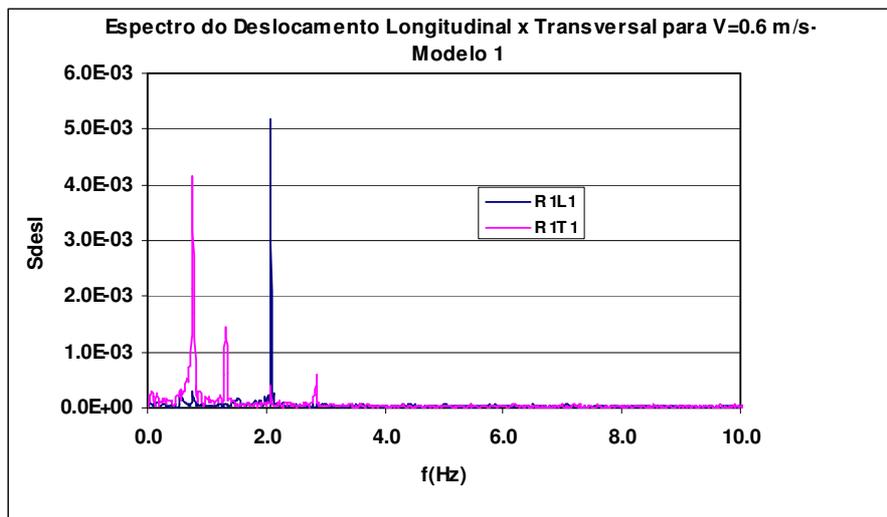
A Tabela C.6, mostra os coeficientes de arrasto médios para os modelos 1, 2 e 3.

Tabela C.6- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 3.88 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2) e 4.19×10^4 (Modelo 3).

	CD		
	Mod.1	Mod. 2	Mod.3
Médio	1.166	1.119	1.163

C.2.1.3 Velocidade de 0.6 m/s

A Figura C.3 mostra o espectro de deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1 dos modelos 1, 2 e 3.



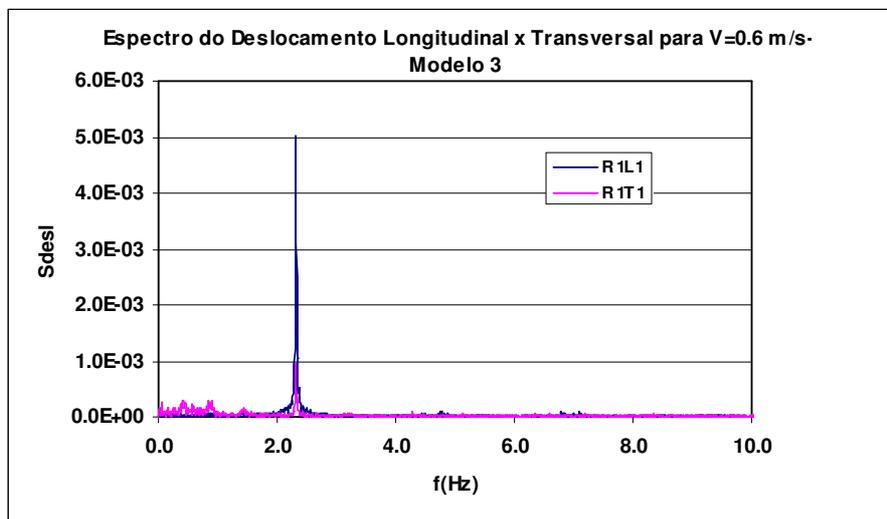
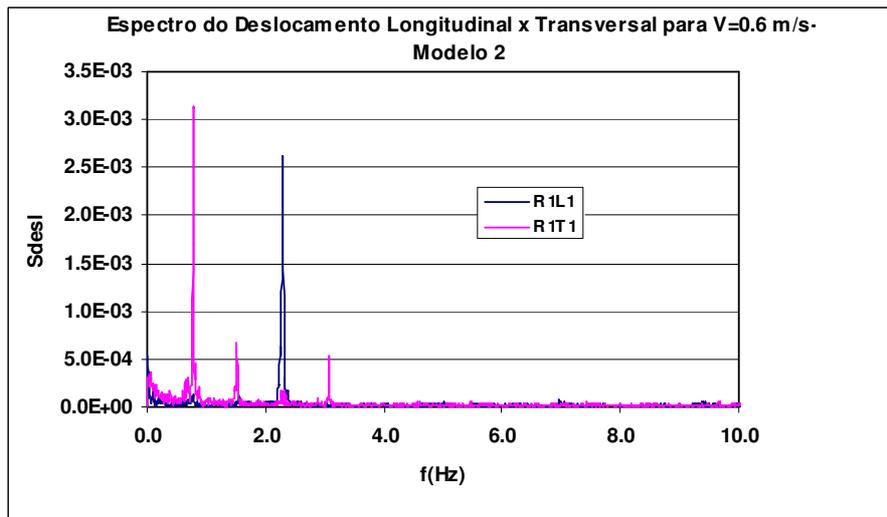


Figura C.3- Espectros dos Deslocamentos Transversal e Longitudinal para os Modelos 1, 2 e 3.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal dos modelos 1 e 2, pode-se observar que os modelos foram excitados em ambas as direções e com energia similar, já para o modelo 3 há predominância de energia na direção longitudinal.

Os valores de $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.7, mostram que os modelos 1 e 2 foram excitados em ambas as direções; já o modelo 3 foi excitado predominantemente na direção longitudinal. É importante salientar, que as amplitudes adimensionalizadas obtidas mostram que os modelos estão afastados da condição de *lock in*, isto é, quando a frequência de desprendimento dos vórtices está próxima da frequência natural.

Tabela C.7- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$			$(Ay/D)_{sig}$		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
R1L1	0.085	0.067	0.116			
R1L2	0.086	0.068	0.112			
R1L3	0.067	0.058	0.096			
R1L4	0.050	0.040	0.067			
R1T1				0.090	0.071	0.036
R1T2				0.090	0.070	0.033
R1T3				0.070	0.057	0.031

A Tabela C.8 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.8- Forças Hidrodinâmicos para $Re = 5.81 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2) e 6.28×10^4 (Modelo 3).

	Fx (kgf)			Fy (kgf)		
	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3
Máximo	25.292	25.859	26.376	13.212	13.411	6.923
Médio	11.780	12.555	8.274	0.484	0.102	0.519
Desvio Padrão	7.230	7.335	10.822	6.543	6.365	2.203
Mínimo	-1.089	-0.232	-8.732	-13.391	-13.794	-6.950

A Tabela C.9 mostra os coeficientes de arrasto médios para os modelos 1, 2 e 3.

Tabela C.9- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 5.81 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2) e 6.28×10^4 (Modelo 3).

	CD		
	Mod.1	Mod. 2	Mod.3
Médio	1.210	1.290	0.950

C.2.1.4 Velocidade de 0.8 m/s

A Figura C.4 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1 dos modelos 1, 2 e 3.

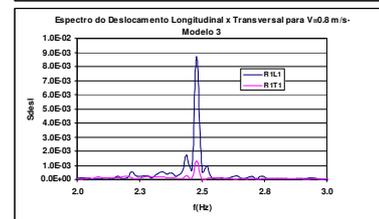
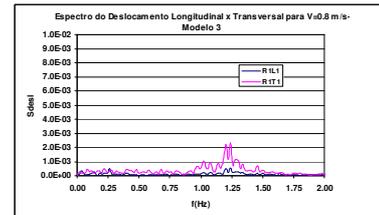
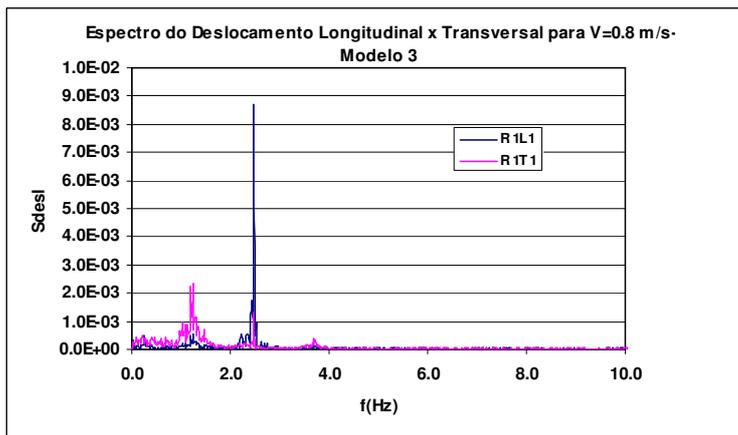
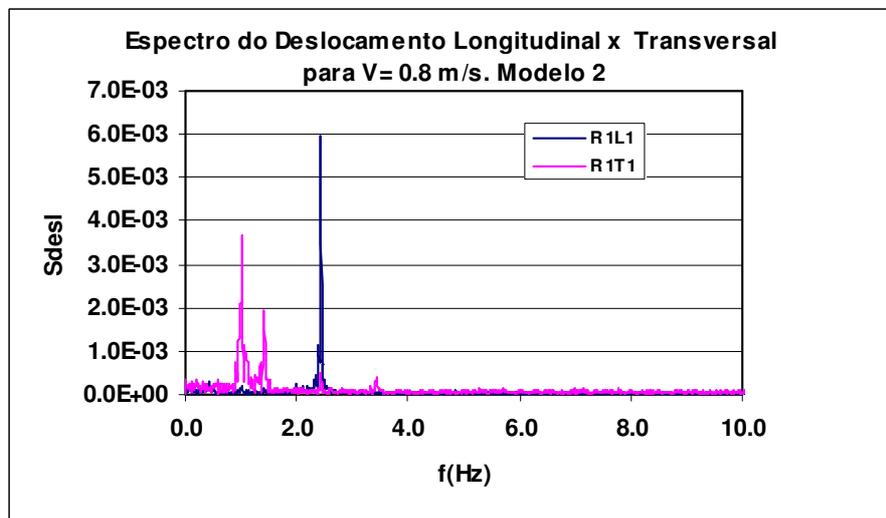
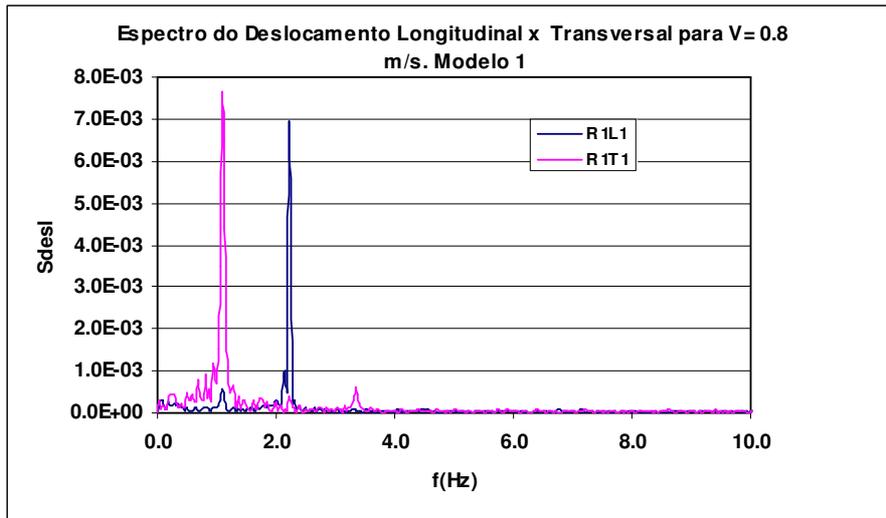


Figura C.4- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os Modelos 1, 2 e 3.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal dos modelos 1, 2 e 3, pode-se observar que os modelos foram excitados em ambas as direções.

Os valores de $(Ax/D)_{sig}$ e $(Ay/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.10, mostram que para o modelo 1 há predominância das vibrações transversais; já para o modelo 2 as vibrações transversais e longitudinais foram similares, enquanto que para o modelo 3 há predominância das vibrações transversais.

Tabela C.10- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$			$(Ay/D)_{sig}$		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
R1L1	0.107	0.104	0.165			
R1L2	0.107	0.105	0.162			
R1L3	0.085	0.091	0.137			
R1L4	0.064	0.062	0.093			
R1T1				0.178	0.118	0.095
R1T2				0.175	0.110	0.093
R1T3				0.137	0.094	0.079

A Figura C.5 mostra que há deslocamento em ambas as direções, aproximando-se a trajetória da clássica trajetória em forma de oito para o modelo 1, enquanto para os modelos 2 e 3 não há uma trajetória definida.

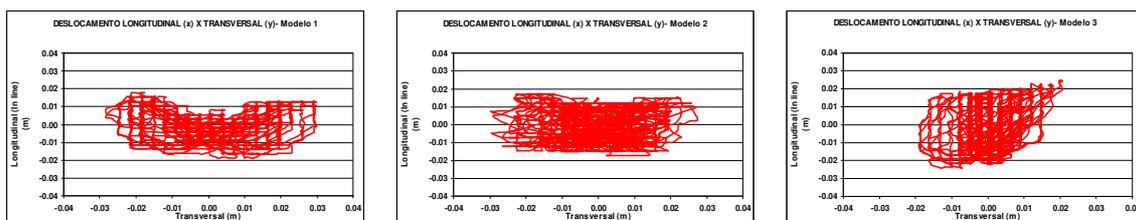


Figura C.5- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para os Modelo 1, 2 e 3.

A Tabela C.11 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal..

Tabela C.11- Coeficientes Hidrodinâmicos para $Re = 7.75 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2) e 8.37×10^4 (Modelo 3).

	Fx (kgf)CD			Fy (kgf)		
	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3
Máximo	45.268	47.533	41.999	29.535	25.399	31.093
Médio	22.951	22.960	15.153	0.904	-0.399	1.603
Desvio Padrão	9.466	12.259	15.557	14.640	11.178	10.183
Mínimo	4.068	1.278	-14.793	-27.176	-27.425	-25.185

A Tabela C.12 mostra os coeficientes de arrasto médios para os modelos 1, 2 e 3.

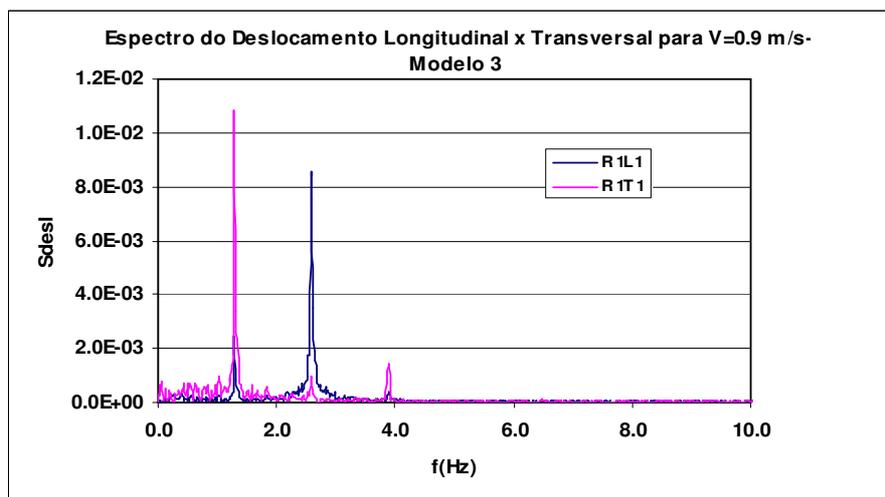
Tabela C.12- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 7.75 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2) e 8.37×10^4 (Modelo 3).

	CD		
	Mod.1	Mod. 2	Mod.3
Médio	1.326	1.327	0.979

C.2.1.5 Velocidade de 0.9 m/s

Este resultado está disponível somente para o modelo 3, isto é, tubo de PVC com 7 mm de espessura de parede.

A Figura C.6 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.



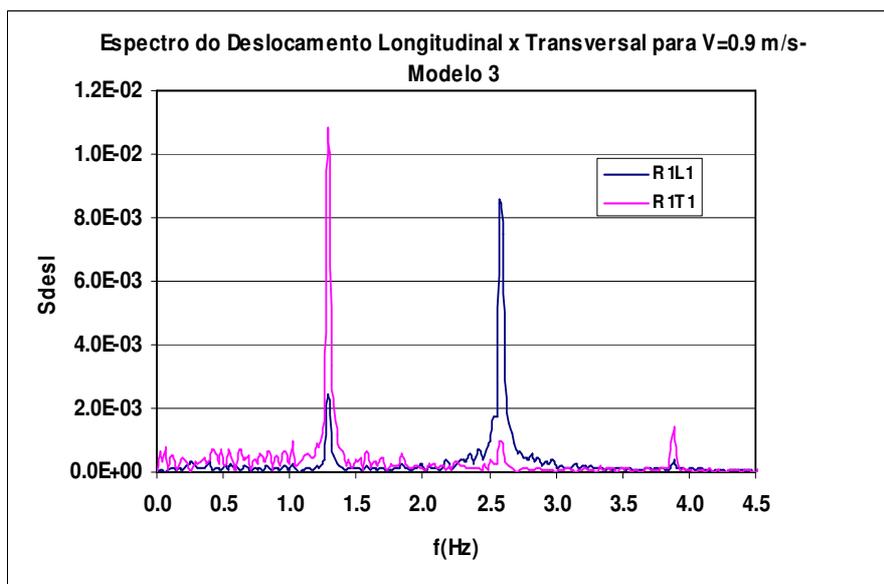


Figura C.6- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3 e Detalhe na Faixa de 0 a 4.5 Hz.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se observar o modelo foi excitado em ambas as direções e com energia similar.

Os valores de $(Ax/D)_{sig}$ e $(Ay/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.13, mostram que o modelo foi excitado em ambas as direções, com amplitudes de vibrações próximas em ambas as direções.

Tabela C.13- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$	$(Ay/D)_{sig}$
R1L1	0.233	
R1L2	0.228	
R1L3	0.194	
R1L4	0.131	
R1T1		0.223
R1T2		0.215
R1T3		0.179

A Figura C.7 mostra que há deslocamento em ambas as direções, aproximando-se a trajetória da clássica figura em forma de oito.

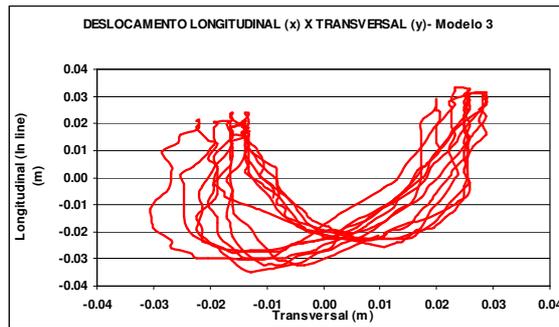


Figura C.7- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3.

A Tabela C.14 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.14- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 9.42 \times 10^4$.

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	61.006	43.326
Médio	23.969	2.775
Desvio Padrão	21.232	22.989
Mínimo	-16.955	-42.269

A Tabela C.15 mostra o coeficiente de arrasto médio.

Tabela C.15- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 9.42 \times 10^4$.

	CD
Médio	1.224

C.2.1.6 Velocidade de 1.0 m/s

A seguir serão apresentados os resultados somente para os modelos 1 e 2. Para o modelo 3, ver resultados no Capítulo 3.

A Figura C.8 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1 dos modelos 1 e 2.

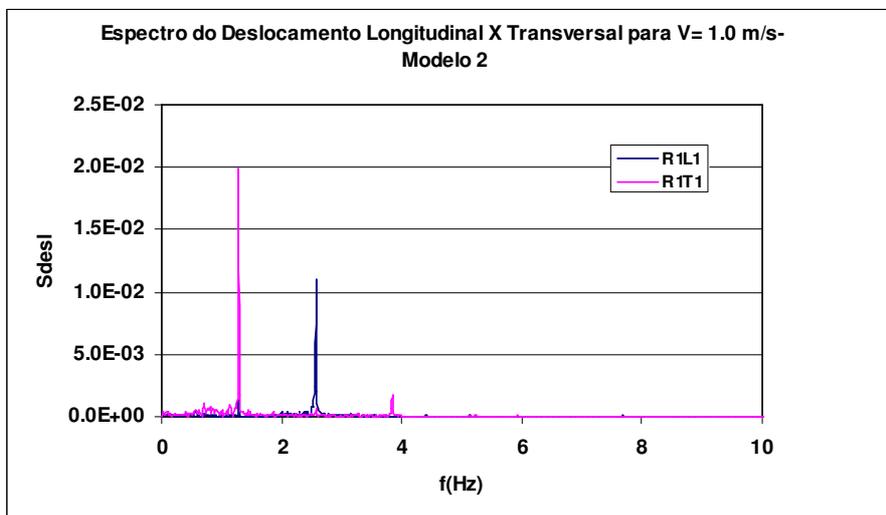
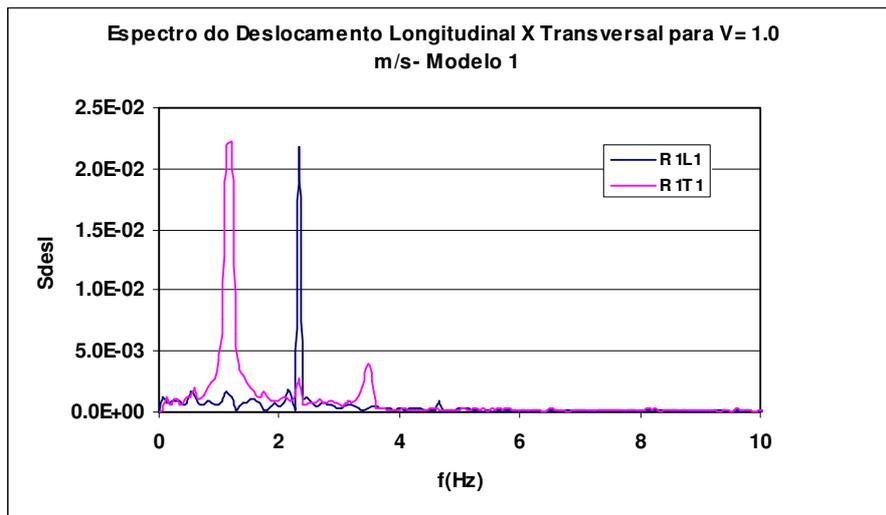


Figura C.8- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os Modelos 1, 2.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se concluir que há energia excitação em ambas as direções para os 2 modelos, com predominância na direção transversal.

Os valores de $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.16, mostram que os modelos 1 e 2, foram excitados em ambas as direções, com predominância das vibrações transversais.

Tabela C.16- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
R1L1	0.364	0.191		
R1L2	0.372	0.191		
R1L3	0.045	0.165		
R1L4	0.091	0.112		
R1T1			0.559	0.330
R1T2			0.550	0.328
R1T3			0.467	0.281

A Figura C.9 mostra que há deslocamento em ambas as direções para os modelos 1 e 2, aproximando-se a trajetória da clássica figura em forma de oito. Mostrando que foram excitadas vibrações por desprendimento de vórtices.

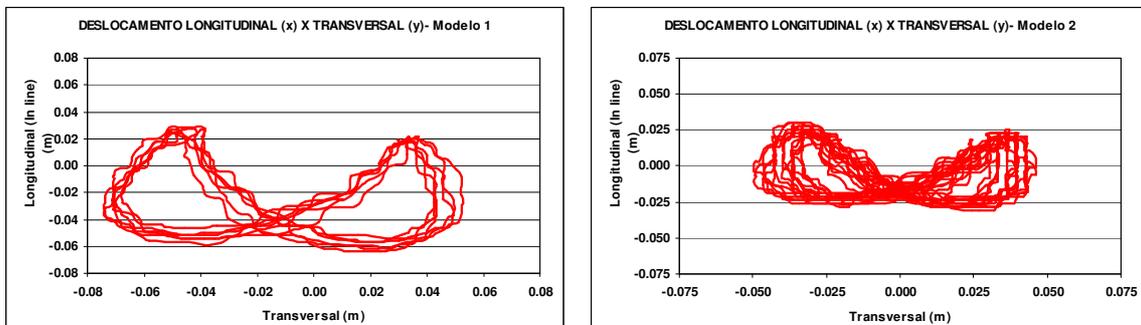


Figura C.9- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para os Modelo 1 e 2.

A Tabela C.17 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.17- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 9.7 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 1	Mod. 2
Máximo	100.905	85.885	72.493	56.765
Médio	42.318	40.735	-0.822	-0.713
Desvio Padrão	33.360	22.773	43.842	36.172
Mínimo	-12.349	1.337	-66.874	-57.696

A Tabela C.18 mostra os coeficientes de arrasto médios para os Modelos 1 e 2.

Tabela C.18- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 9.7 \times 10^4$ (Modelos 1 e 2).

	CD	
Médio	1.565	1.507

C.2.1.7 Velocidade de 1.1 m/s

A seguir serão apresentados os resultados somente para o modelo 2. Para o modelo 3, ver resultados no Capítulo 3.

A Figura C.10 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1 do modelo 2.

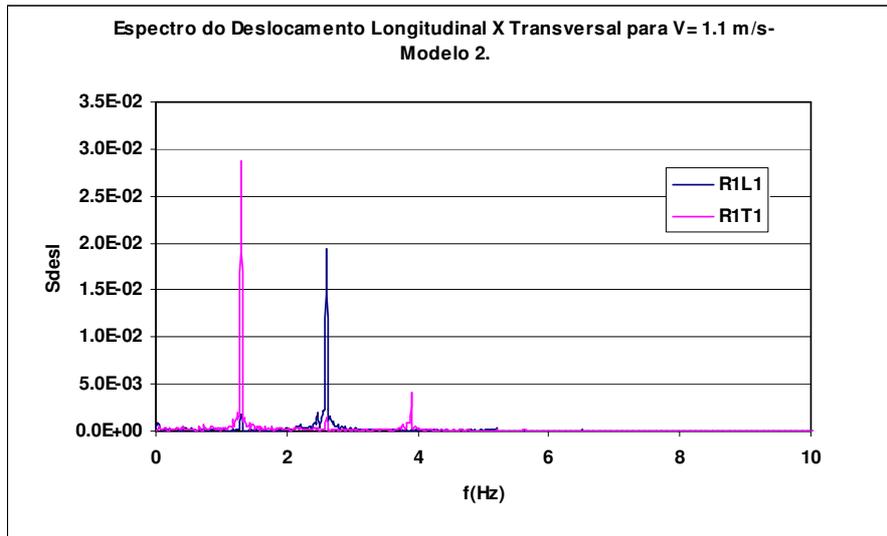


Figura C.10- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal do Modelo 2.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se observar que há energia excitação em ambas as direções para o modelo 2.

Os valores de $(A_x/D)_{sig}$ e $(A_y/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.19, mostra que o modelo 2, foi excitado em ambas as direções, com predominância das vibrações transversais.

Tabela C.19- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$	$(A_y/D)_{sig}$
R1L1	0.330	
R1L2	0.505	
R1L3	0.286	
R1L4	0.195	
R1T1		0.477
R1T2		0.478
R1T3		0.378

A Figura C.11 mostra que há deslocamento em ambas as direções, aproximando-se a trajetória da clássica figura em forma de oito. Mostrando que foram excitadas vibrações por desprendimento de vórtices.

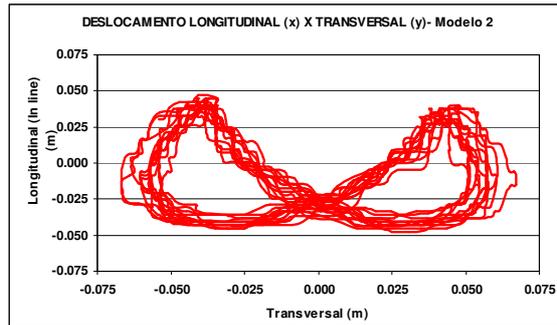


Figura C.11- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para os Modelo 2.

A Tabela C.20 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.20- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.07 \times 10^5$ (Modelo 2).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	124.063	76.362
Médio	49.287	-1.546
Desvio Padrão	39.048	50.322
Mínimo	-16.852	-79.318

C.2.1.8 Velocidade de 1.2 m/s

A seguir serão apresentados os resultados somente para o modelo 2. Para o modelo 3, ver resultados no Capítulo 3.

A Figura C.12 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1 do modelo 2.

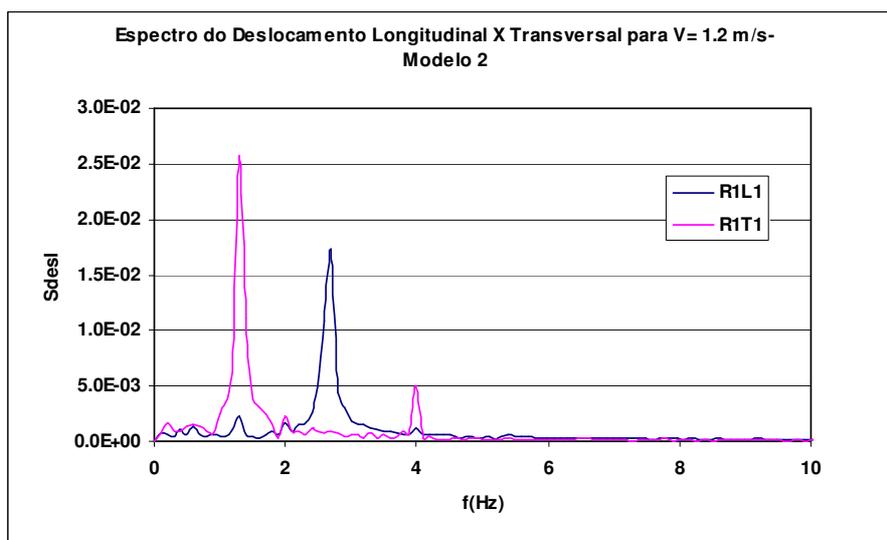


Figura C.12- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal do Modelo 2.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se observar que há energia de excitação em ambas as direções, com predominância na direção transversal. Pode-se, ainda, observar que há excitação de outras frequências com menores energias em ambas as direções, estas frequências excitadas são denominadas de harmônicos.

Os valores de $(Ax/D)_{sig}$ e $(Ay/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.16, mostram que o modelo 2, foi excitado em ambas as direções, com predominância das vibrações transversais.

Tabela C.16- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio do Modelo 2.

	$(Ax/D)_{sig}$	$(Ay/D)_{sig}$
R1L1	0.372	
R1L2	0.372	
R1L3	0.137	
R1L4	0.222	
R1T1		0.561
R1T2		0.560
R1T3		0.484

A Figura C.13 mostra que há deslocamento em ambas as direções, com predominância do deslocamento transversal, a trajetória fica achatada aproximando-se da forma denominada na literatura de *banana-shaped* [27].

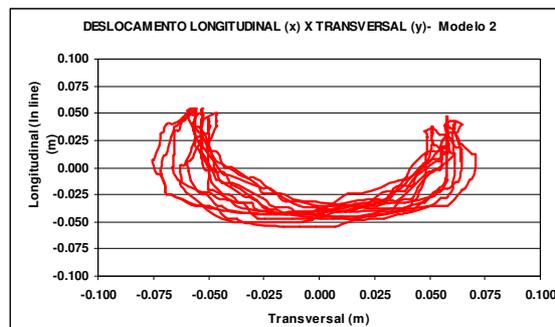


Figura C.13- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal.

A Tabela C.21 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.21- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.16 \times 10^5$ (Modelo 2).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	137.602	89.390
Médio	55.699	-0.424
Desvio Padrão	42.582	60.113
Mínimo	-14.469	-93.988

A Tabela C.22 mostra o coeficiente de arrasto médio, obtido a partir da força de arrasto média.

Tabela C.22- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.16 \times 10^5$ (Modelo 2).

	CD
Médio	1.431

C.2.1.9 Velocidade de 1.4 m/s

Ver resultados no Capítulo 3.

C.2.1.10 Velocidade de 1.5 m/s

Ver resultados no Capítulo 3.

C.2.1.11 Velocidade de 1.6 m/s

Ver resultados no Capítulo 3.

C.2.1.12 Velocidade de 1.7 m/s

Ver resultados no Capítulo 3.

C.2.1.13 Velocidade de 1.8 m/s

Este resultado está disponível somente para o modelo 3, isto é, tubo de PVC com 7 mm de espessura de parede.

A Figura C.14 mostra o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal para os pontos de monitoramento R1L1 e R1T1.

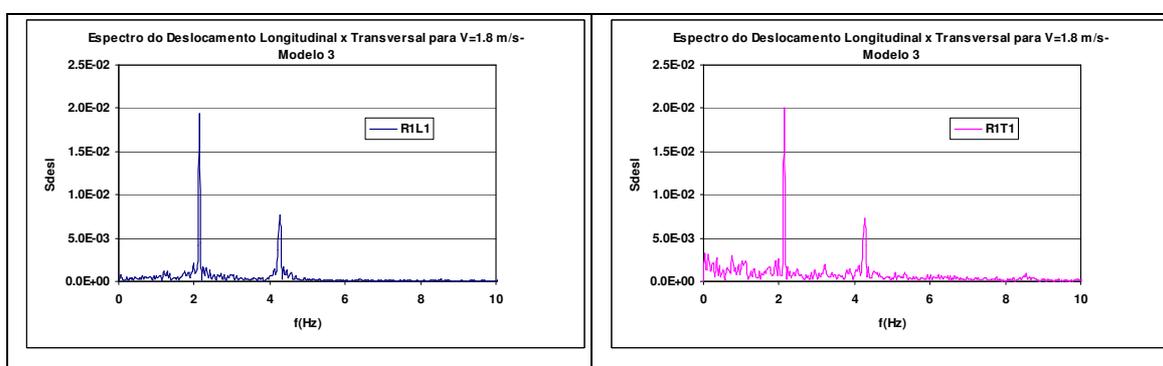
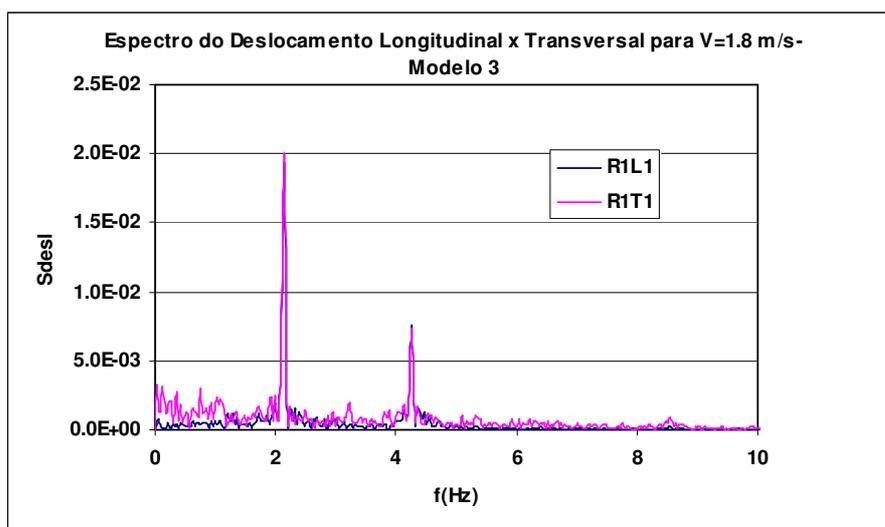


Figura C.14- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para o Modelo 3.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal e longitudinal, pode-se observar que a energia excitação é similar em ambas as direções com um pico em uma frequência em torno de 2.15 Hz e foram excitados vários harmônicos.

Os valores de $(Ax/D)_{sig}$ e $(Ay/D)_{sig}$ obtidos, apresentados na Tabela C.23, mostra que o modelo 3, foi excitado em ambas as direções.

Tabela C.23- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$	$(Ay/D)_{sig}$
	Modelo 3	Modelo3
R1L1	0.410	
R1L2	0.417	
R1L3	0.412	
R1L4	0.360	
R1T1		0.485
R1T2		0.435
R1T3		0.622

A Figura C.15 mostra que há deslocamento em ambas as direções, com predominância do deslocamento transversal gerando uma trajetória que é denominada na literatura de *banana-shaped* [27].

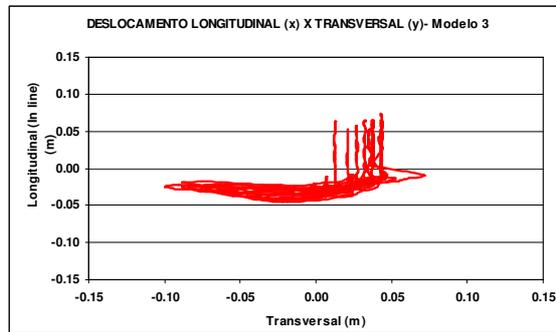


Figura C.15- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Modelo 3.

A Tabela C.24 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal.

Tabela C.21- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.88 \times 10^5$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)	Fy (kgf)
Máximo	171.108	257.004
Médio	97.652	6.997
Desvio Padrão	31.048	138.512
Mínimo	36.871	-224.892

A Tabela C.25 mostra o coeficiente de arrasto médio, obtido a partir da força de arrasto média.

Tabela C.25- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 1.88 \times 10^5$.

	CD
Médio	1.246

C.2.2 Escoamento ao Redor de Dois Cilindros

Serão apresentados, os seguintes casos:

Espaçamento de 2D:

Modelo 1, com velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

Modelo 3, com velocidades de 0.4, 0.6, 0.8 m/s

Espaçamento de 3D:

Modelo 1, com velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

Modelo 2, com velocidades de 0.8, 1 e 1.1 m/s.

Modelo 3, com velocidades de 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 m/s.

Espaçamento de 4D:

Modelo 1, com velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

Espaçamento de 5D:

Modelo 1, com velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

Modelo 3, com velocidades de 0.4, 0.6, 1.0, 1.2 m/s

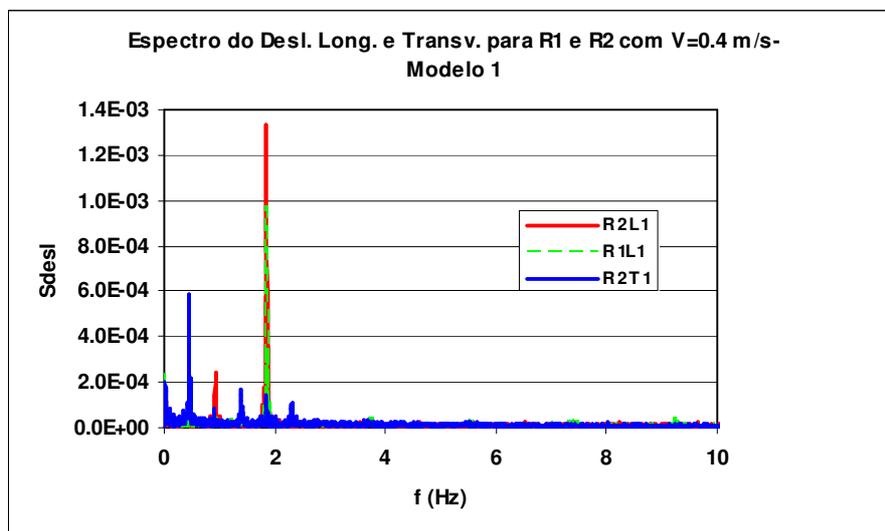
C.2.2.1)

C.2.2.1 Espaçamento 2D

C.2.2.1.1 Velocidade de 0.4 m/s

C.2.2.1.1.1 Modelo 1

A Figura C.16 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.



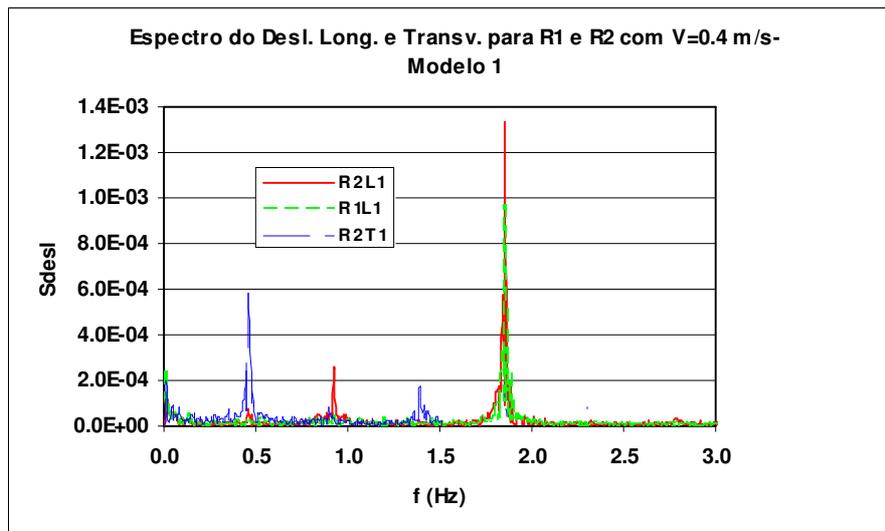


Figura C.16- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3Hz- Modelo 1.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2* para o modelo 1, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.85 Hz na direção longitudinal do *riser* de jusante (R2), curva denominada de R2L1 (Curva vermelha), que é igual à frequência natural deste modelo. Pode-se, ainda, observar que há um harmônico em uma frequência em torno de 0.95 Hz, que corresponde aproximadamente a metade da frequência excitada com maior energia na direção longitudinal. Ainda para o *riser 2*, pode-se, também, observar que ele foi excitado na direção transversal, curva denominada R2T1 (Curva azul escura), com uma frequência em torno de 0.45 Hz e há 2 harmônicos com menor energia, um deles na frequência de 1.4 Hz e outro na frequência de 2.35 Hz. Quanto ao *riser 1*, pode-se afirmar que na direção longitudinal foi excitada a frequência natural do modelo, representada pela curva denominada de R1L1 (Curva verde clara- tracejada) com menor energia que o *riser 2*.

A Figura C.17 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados e espaçados de 2D com um *riser* isolado do modelo 1. Nas Figuras C.18 e C.19 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

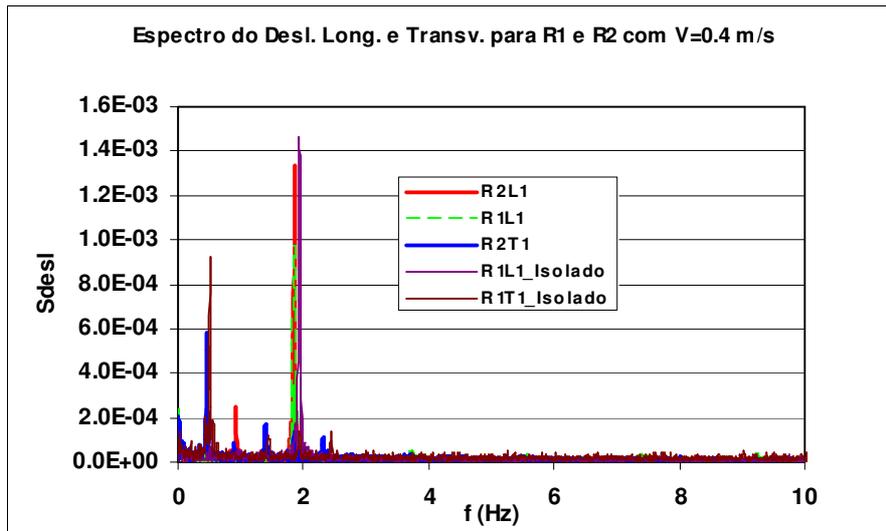


Figura C.17- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

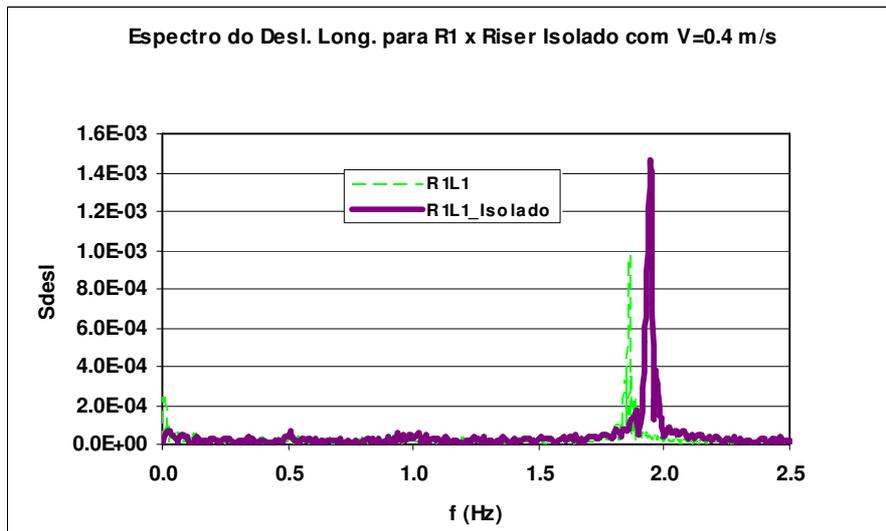


Figura C.18- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

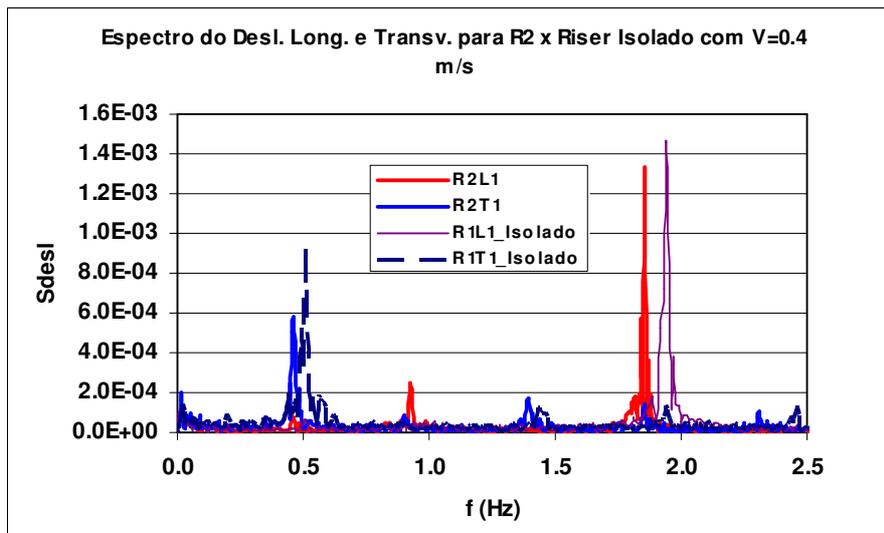


Figura C.19- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada para as direções longitudinais em ambos os *risers*, e na direção transversal do *riser 2*;
- há uma redução da energia da vibração na direção longitudinal do *riser 1* (montante);
- para o *riser 2* há uma pequena redução da energia da vibração na direção longitudinal, na direção transversal esta redução é mais expressiva.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 1, apresentados na Tabela C.26, mostram que os *risers* foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.26- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o modelo 1.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.0206	0.028		
L2	0.022	0.029		
L3				
L4				
T1				0.0210
T2				0.022
T3				0.018

A Tabela C.27 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.27- Forças Hidrodinâmicos para $Re = 3.88 \times 10^4$ (Modelo 1).

	F_x (kgf)		F_y (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	8.762	6.156	3.572	4.538
Médio	4.215	0.221	0.297	-0.140
Desvio Padrão	1.829	2.232	0.787	1.303
Mínimo	0.405	-5.815	-2.279	-4.932

A Tabela C.28 mostra o coeficiente de arrasto médio, obtido a partir da força de arrasto média.

Tabela C.28- Coeficiente de Arrasto Médio para $Re = 3.88 \times 10^4$ (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.974	0.051

C.2.2.1.1.2 Modelo 3

A Figura C.20 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

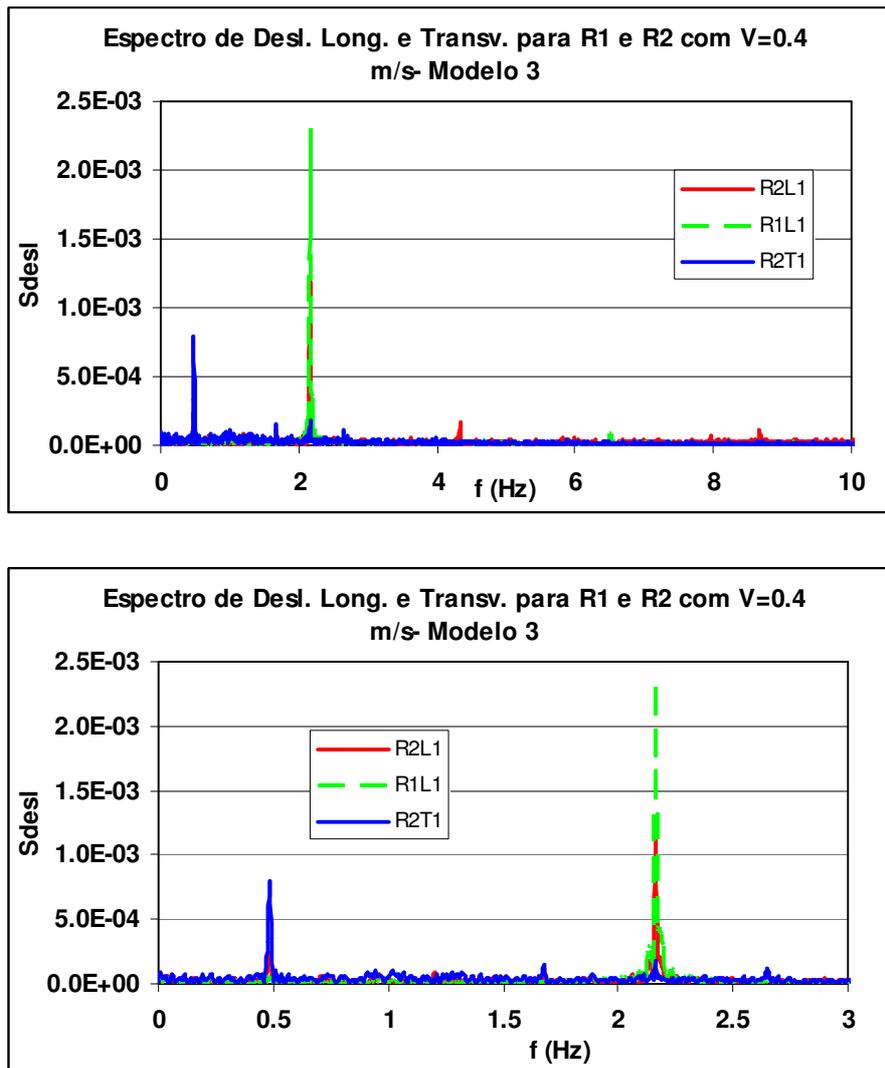


Figura C.20 - Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3Hz- Modelo 3.

Analisando os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2* para o modelo 3, pode-se observar que há um comportamento hidrodinâmico similar ao obtido para o modelo 1. Foi excitada uma frequência em torno de 2.2 Hz na direção longitudinal do *riser* de jusante (R2), curva denominada de R2L1 (Curva vermelha), que é próxima da frequência natural deste modelo, que é igual 2.31Hz, não há o harmônico em uma frequência em torno de 0.95Hz, que foi observado para o modelo 1. Ainda para o *riser 2*, pode-se observar que foi excitada na direção transversal uma frequência em torno de 0.48 Hz. Na direção longitudinal do *riser 1* foi excitada a frequência natural do modelo, representada pela curva denominada de R1L1 (Curva verde clara) com energia de vibração menor que a energia do *riser 2*.

A Figura C.21 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 2D com um *riser* isolado do modelo 3. Nas Figuras C.22 e C.23 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 3 Hz.

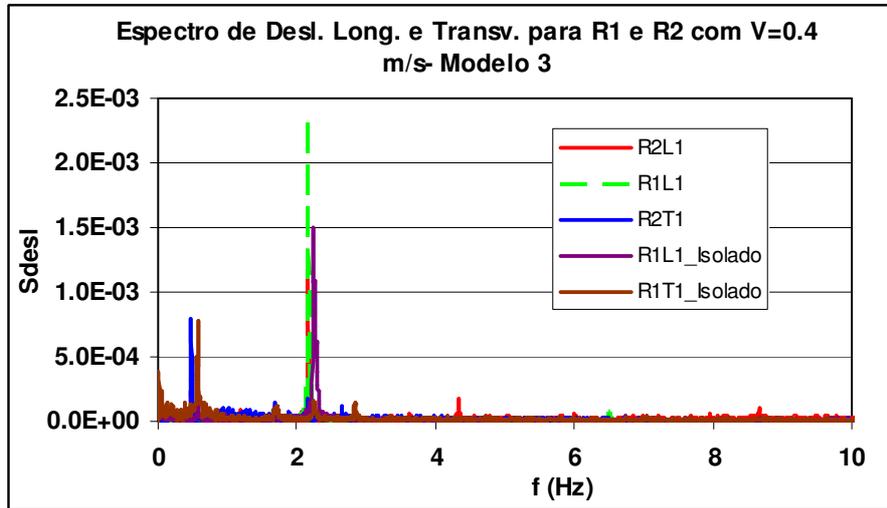


Figura C.21- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

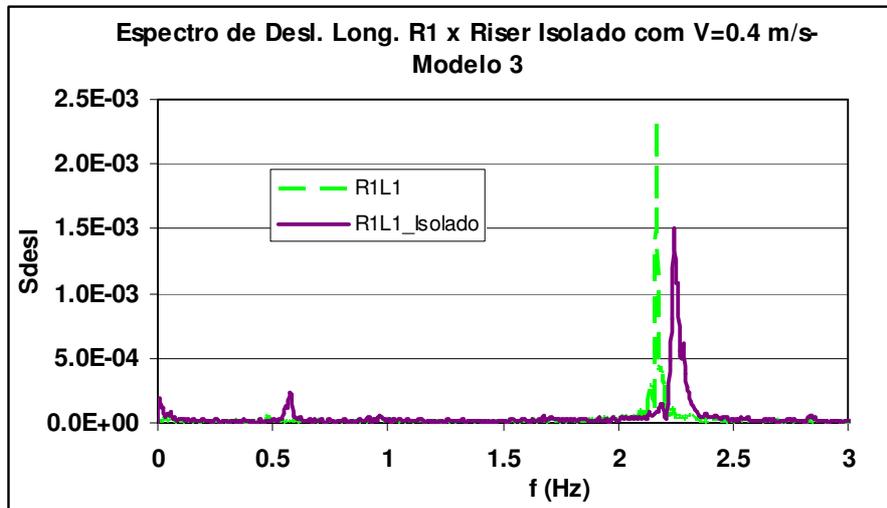


Figura C.22- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

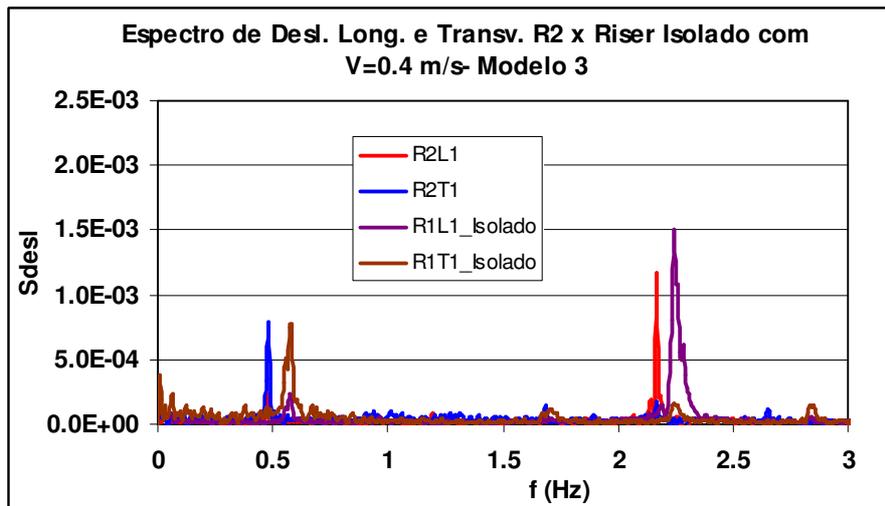


Figura C.23- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada para as duas direções em ambos os *risers*;
- há um aumento da energia da vibração na direção longitudinal do *riser* 1 (montante);
- para o *riser* 2 há uma redução da energia da vibração na direção longitudinal, na direção transversal o comportamento foi bastante similar ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 3, apresentados na Tabela C.29 mostram que os *risers* foram excitados em ambas às direções com baixa energia; os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser* 2 na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.29- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o modelo 3.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.030	0.045		
L2	0.027	0.045		
L3	N.D	N.D		
L4	N.D	N.D		
T1				0.024
T2				0.022
T3				0.019

A Tabela C.30 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.30- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 4.19 \times 10^4$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	8.569	5.823	5.651	3.396
Médio	1.724	0.560	0.255	-0.017
Desvio Padrão	3.890	2.555	2.177	1.376
Mínimo	-4.659	-4.503	-4.557	-4.134

A Tabela C.31 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.31- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 4.19 \times 10^4$ (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.446	0.145

C.2.2.1.2 Velocidade de 0.6 m/s

C.2.2.1.2.1 Modelo 1

A Figura C.24 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.

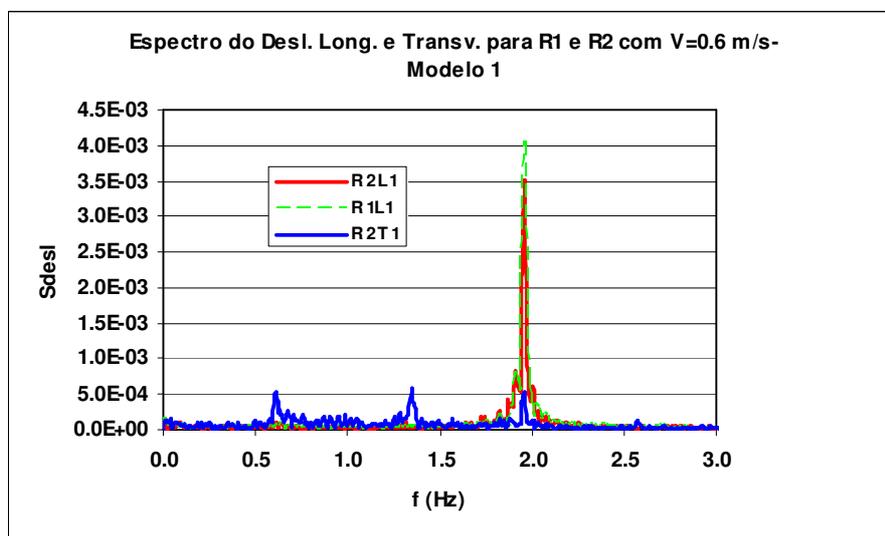
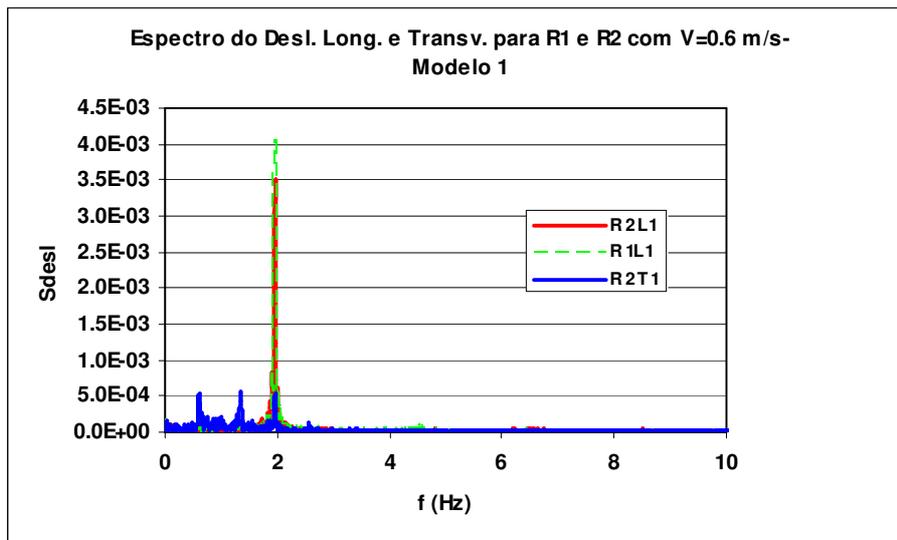


Figura C.24- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3Hz- Modelo 1.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2* do modelo 1, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.95 Hz na direção longitudinal em ambos os *risers*, curvas denominadas R1L1 (Curva verde clara tracejada) e R2L1 (Curva vermelha); com energia de excitação bastante similar; pode-se, ainda, observar que na direção transversal à energia de excitação de ambos do *risers 2* é desprezível, havendo alguns harmônicos, nas frequências em torno de 0.6, 1.3 e 1.9 Hz.

A Figura C.25 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 2D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.26 e C.27 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

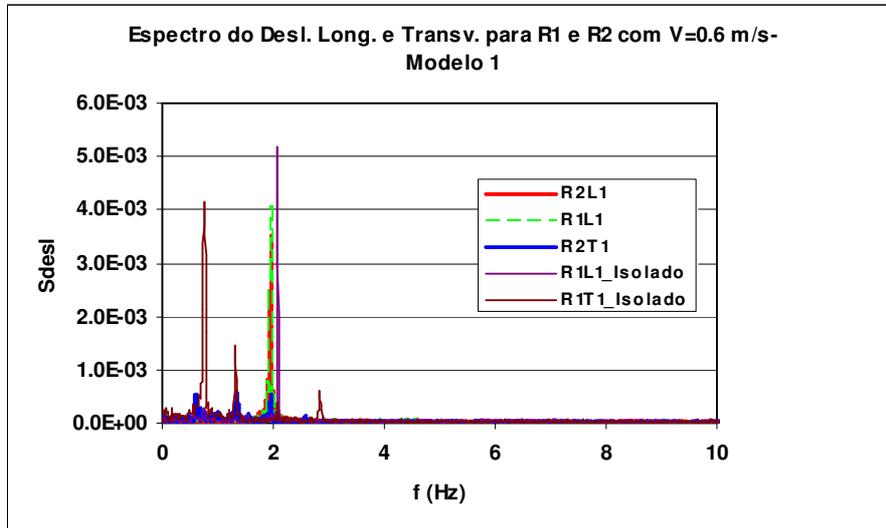


Figura C.25- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

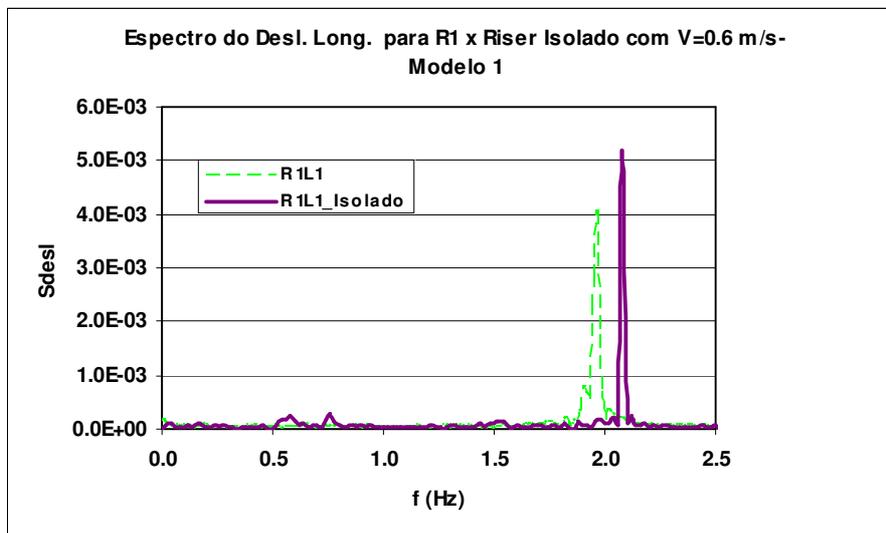


Figura C.26- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

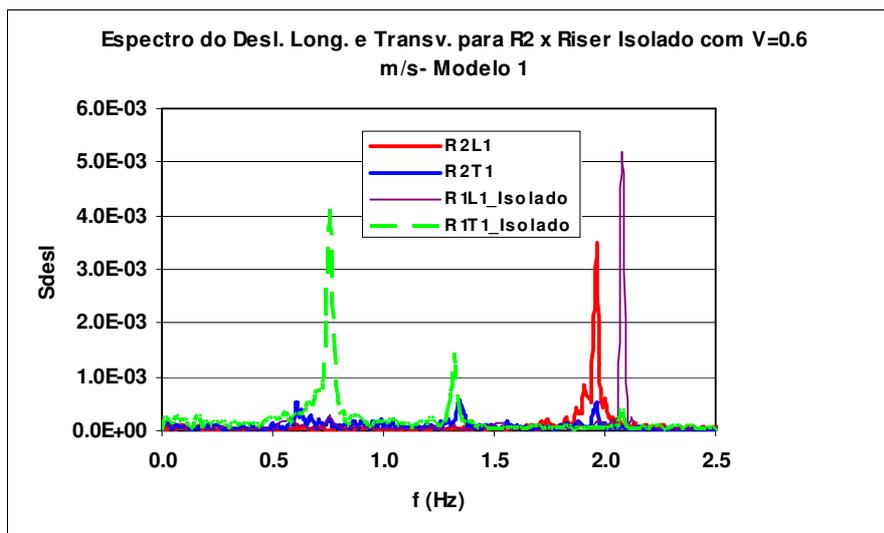


Figura C.27- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico das frequências excitadas em ambas as direções;
- há uma redução na energia de vibração longitudinal do *riser* 1;
- há uma redução na energia de vibração longitudinal do *riser* 2. Na direção transversal, também, não há energia de excitação deste *riser* quando comparado ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 1, apresentados na Tabela C.32, confirmam que os *risers* foram excitados com maior energia na direção longitudinal.

Tabela C.32- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio para o modelo 1.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.098	0.084		
L2	0.098	0.084		
L3				
L4				
T1				0.034
T2				0.034
T3				0.024

A Tabela C.33 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.33- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 5.81 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	22.846	14.281	6.582	7.3045
Médio	9.052	0.815	0.111	0.1995
Desvio Padrão	8.290	6.648	1.640	2.1817
Mínimo	-7.569	-11.984	-5.837	-8.0226

A Tabela C.34 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.34- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 5.81 \times 10^4$ (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.930	0.084

C.2.2.1.2.2 Modelo 3

A Figura C.28 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

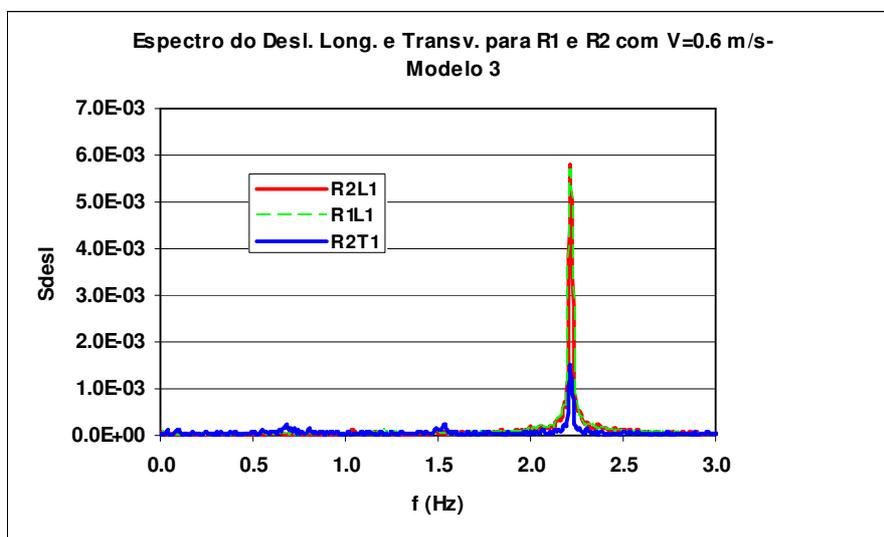
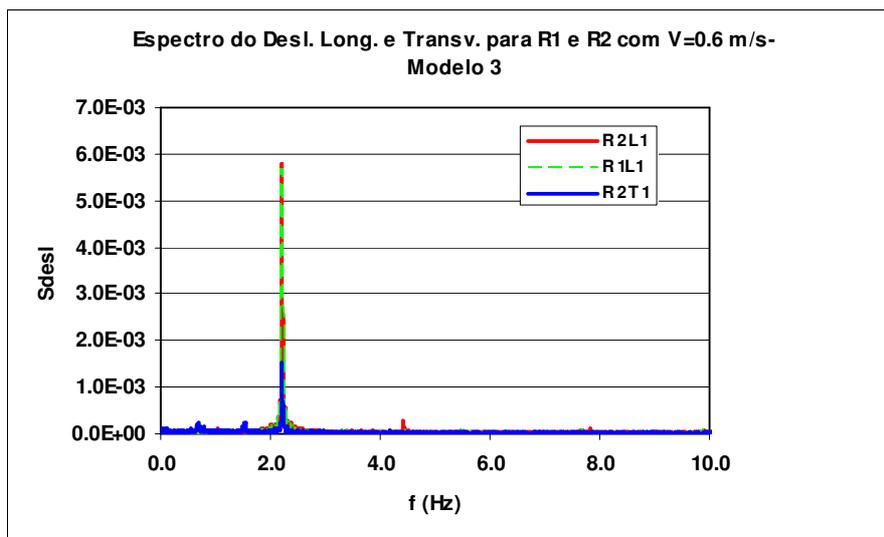


Figura C.28- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 na Faixa de Freqüência de 0 a 3 Hz- Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2 do modelo 3, pode-se observar que foi excitada uma freqüência em torno de 2.2 Hz na direção longitudinal em ambos os *risers* e com energias de excitação bastante similares, curvas R1L1 (Curva verde clara tracejada) e R2L1 (Curva vermelha). Pode-se, ainda, observar que na direção transversal a energia de excitação do *riser* 2 está bastante reduzida quando comparada à energia de excitação na direção longitudinal.

Comparando os espectros obtidos para os modelos 1 e 3, vemos que o comportamento hidrodinâmico foi bastante similar, sendo excitadas na direção longitudinal as freqüências naturais de cada modelo.

A Figura C.29 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 2D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.30 e C.31 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 3 Hz.

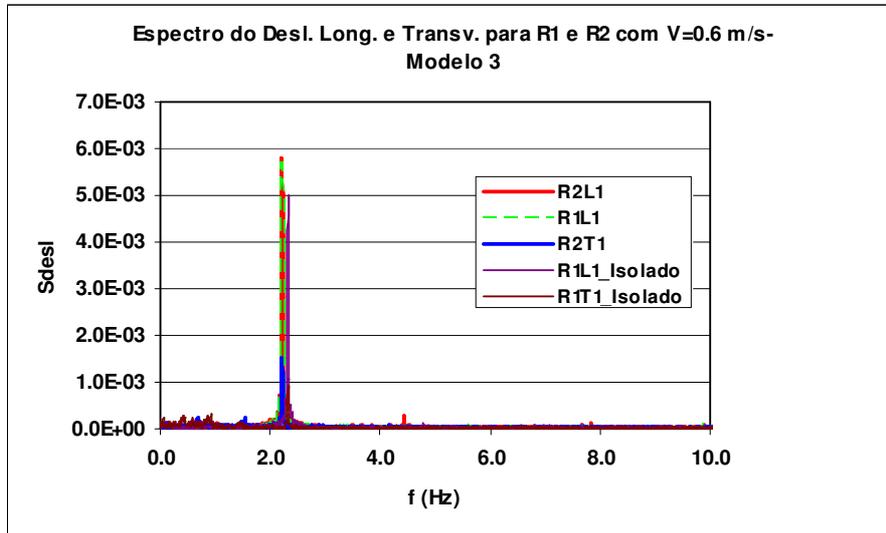


Figura C.29- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

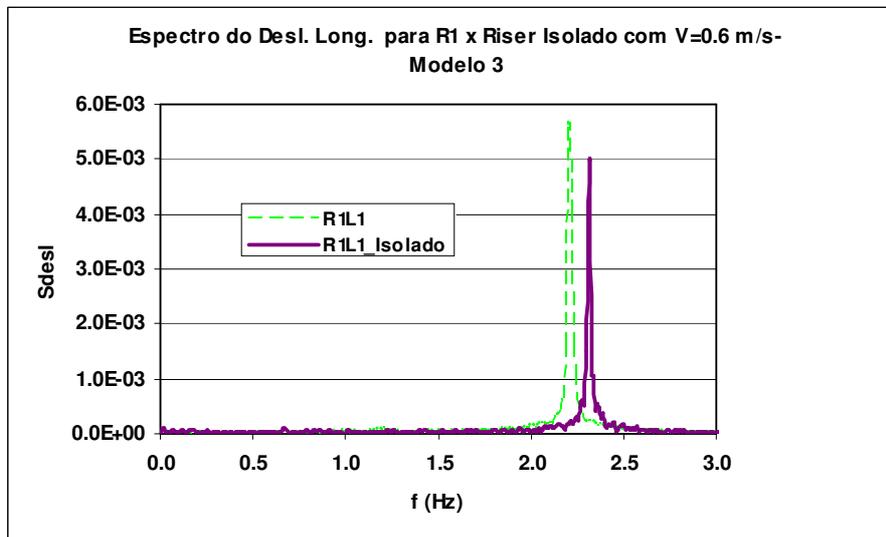


Figura C.30- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

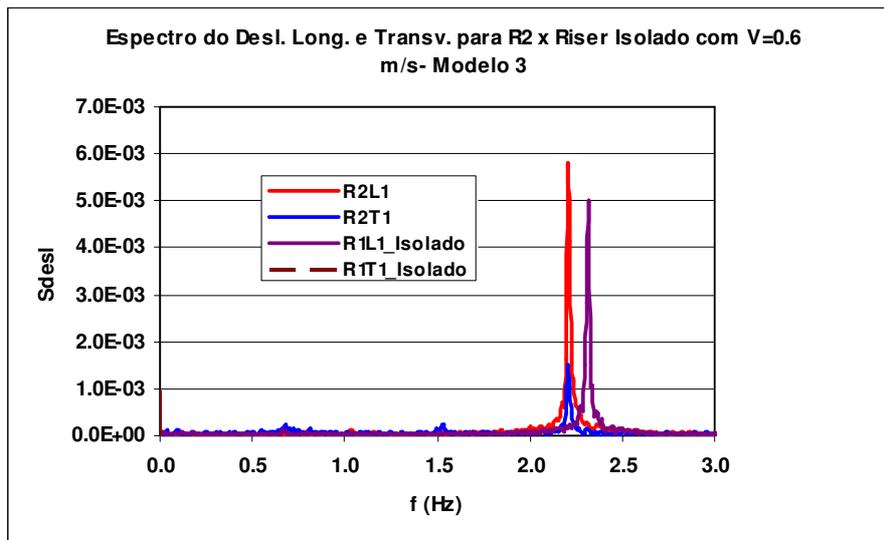


Figura C.31- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico das frequências excitadas em ambas as direções;
- há um aumento na energia de vibração longitudinal do *riser* 1;
- há um aumento na energia de vibração longitudinal do *riser* 2. Na direção transversal há uma pequena energia de excitação deste *riser* quando comparado ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 3, apresentados na Tabela C.35, confirmam que os *risers* foram excitados com maior energia na direção longitudinal.

Tabela C.35- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o modelo 3.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.138	0.135		
L2	0.135	0.134		
L3				
L4				
T1				0.043
T2				0.039
T3				0.032

A Tabela C.36 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.36- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 6.28 \times 10^4$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	27.129	23.526	7.225	7.916
Médio	6.703	1.682	0.932	0.516
Desvio Padrão	12.089	13.356	2.247	2.274
Mínimo	-12.814	-19.327	-5.498	-5.957

A Tabela C.37 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

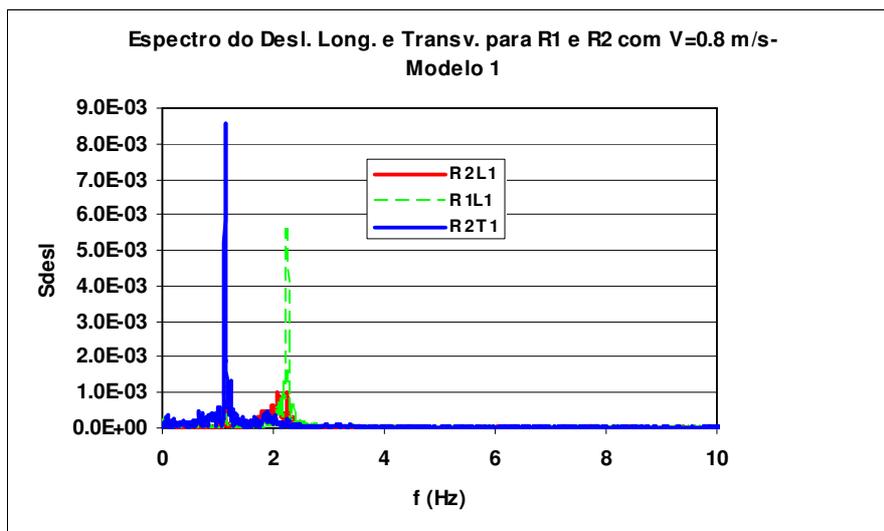
Tabela C.37- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 6.28 \times 10^4$ (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.770	0.193

C.2.2.1.3 Velocidade de 0.8 m/s

C.2.2.1.3.1 Modelo 1

A Figura C.32 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.



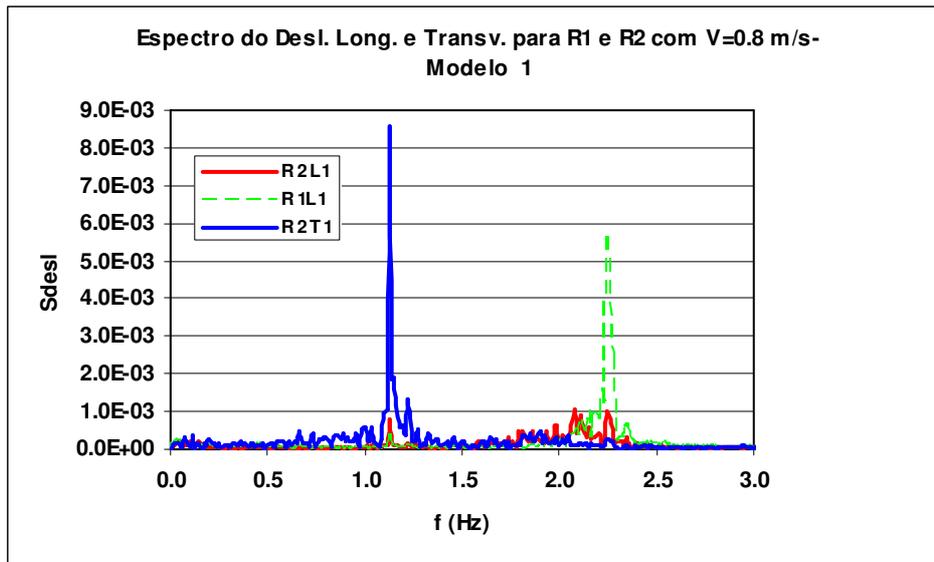


Figura C.32- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhes na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz para o Modelo 1.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2 do modelo 1, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.25 Hz na direção longitudinal do *riser* 1 (Curva verde clara tracejada); já para o *riser* 2 foram excitados dois harmônicos com energia bastante reduzida quando comparado ao *riser* 1.

A Figura C.33 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de $2D$ com um *riser* isolado. Nas Figuras C.34 e C.35 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5Hz.

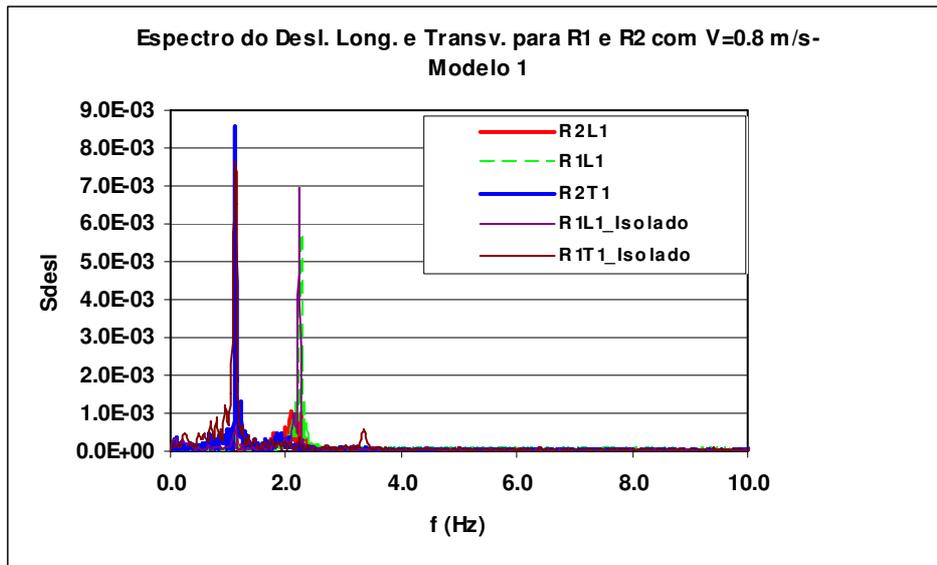


Figura C.33- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

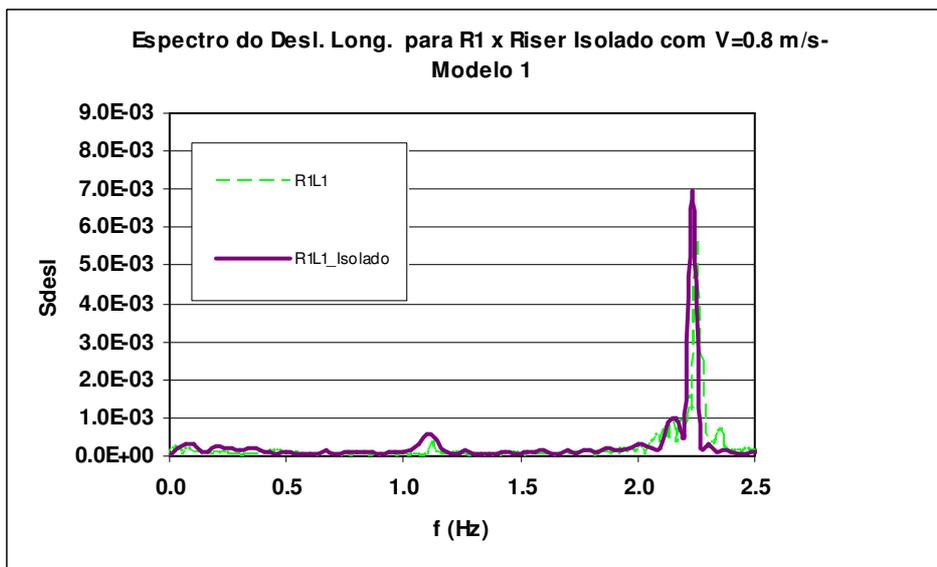


Figura C.34- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

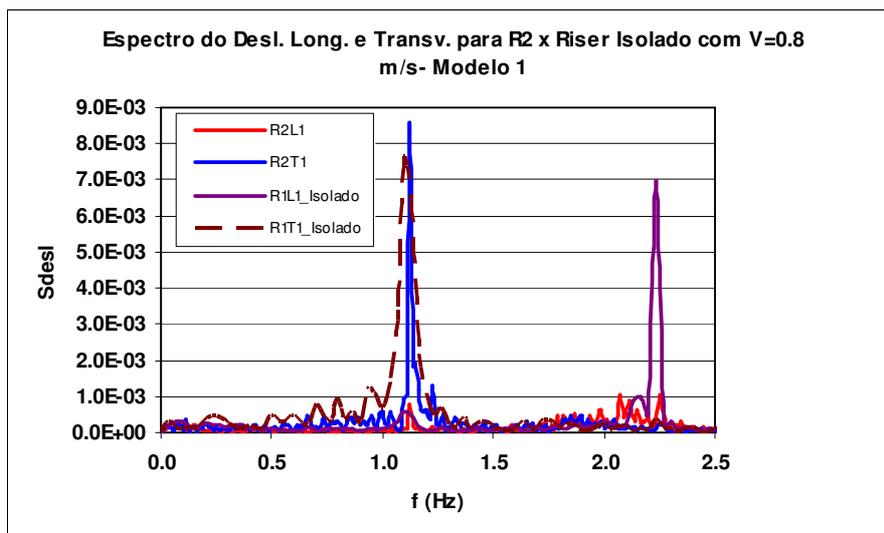


Figura C.35- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico das frequências excitadas na direção longitudinal do *riser* 1;
- há uma redução na energia de vibração longitudinal do *riser* 1, também há uma redução na direção transversal;
- há uma redução na energia de vibração longitudinal do *riser* 2;
- há um aumento da energia de excitação na direção transversal do *riser* 2 (Curva azul escura).

Os valores de A/D obtidos para os dois risers do modelo 1, apresentados na Tabela C.38, mostram que o riser 1 (montante) foi excitado na direção longitudinal; já o riser 2 foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela C.38- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o Modelo 1.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.124	0.054		
L2	0.124	0.053		
L3				
L4				
T1				0.158
T2				0.155
T3				0.109

A Figura C.36 mostra que no modelo 1 há predominância do deslocamento transversal no *riser 2*, gerando trajetória próxima da conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

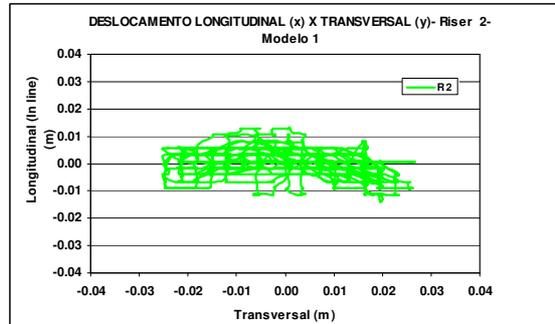


Figura C.36- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal do *Riser 2* do Modelo 1.

A Tabela C.39 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.39- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 7.8 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	41.54	18.16	24.12	26.30
Médio	18.23	1.57	0.23	0.24
Desvio Padrão	10.97	4.31	10.87	12.99
Mínimo	-6.72	-13.04	-21.38	-26.03

A Tabela C.40 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.40- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 7.8 \times 10^4$ (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.053	0.090

C.2.2.1.3.2 Modelo 3

A Figura C.37 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

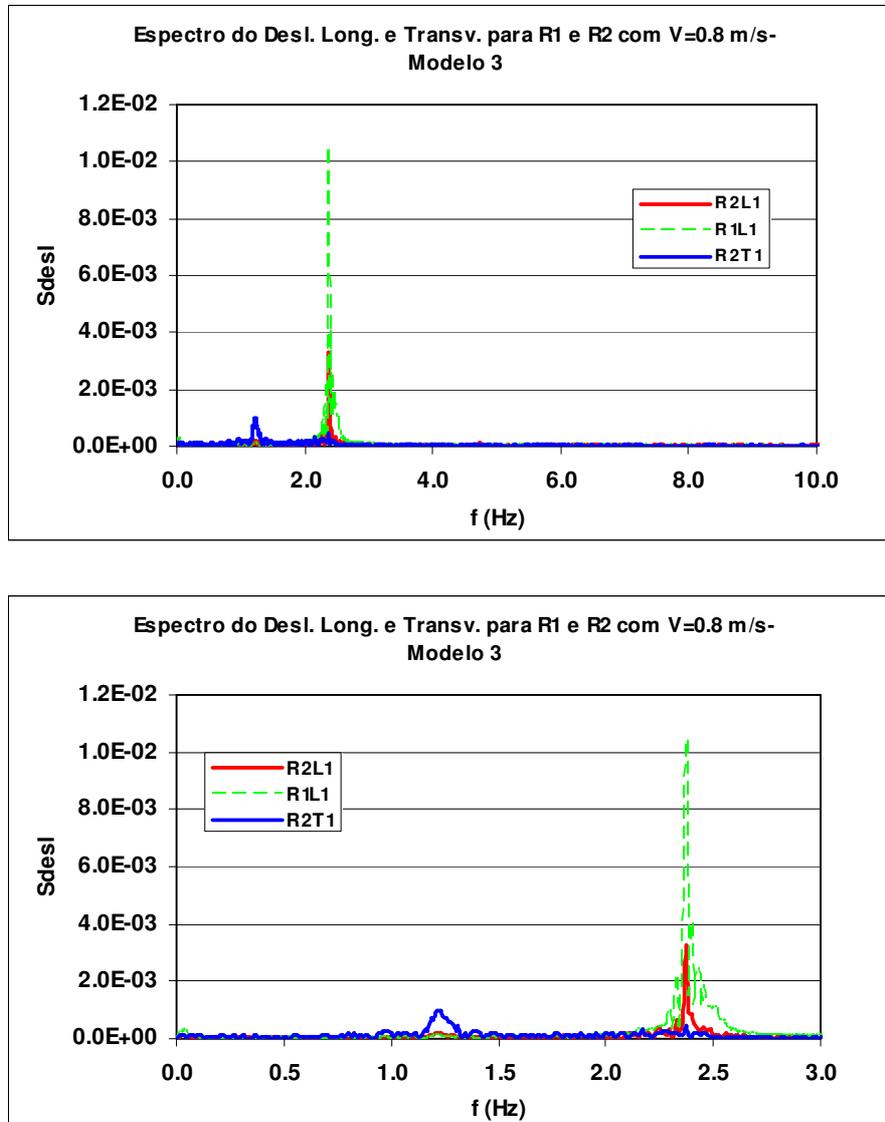


Figura C.37- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhes na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2 do modelo 3, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.4 Hz na direção longitudinal de ambos os *risers*, sendo a energia de excitação do *riser* 1 (Curva verde clara tracejada) bastante superior ao do *riser* 2 (Curva vermelha).

A Figura C.38 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 2D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.39 e C.40 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 3 Hz.

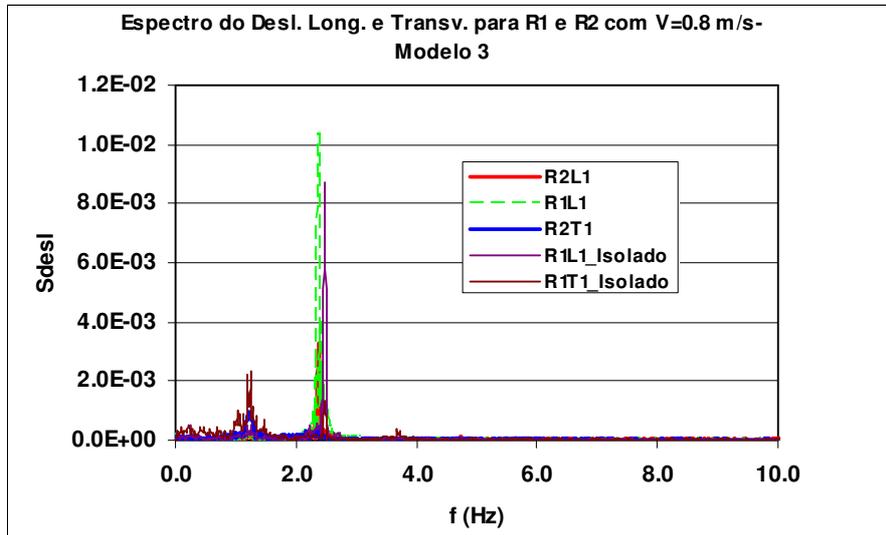


Figura C.38- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

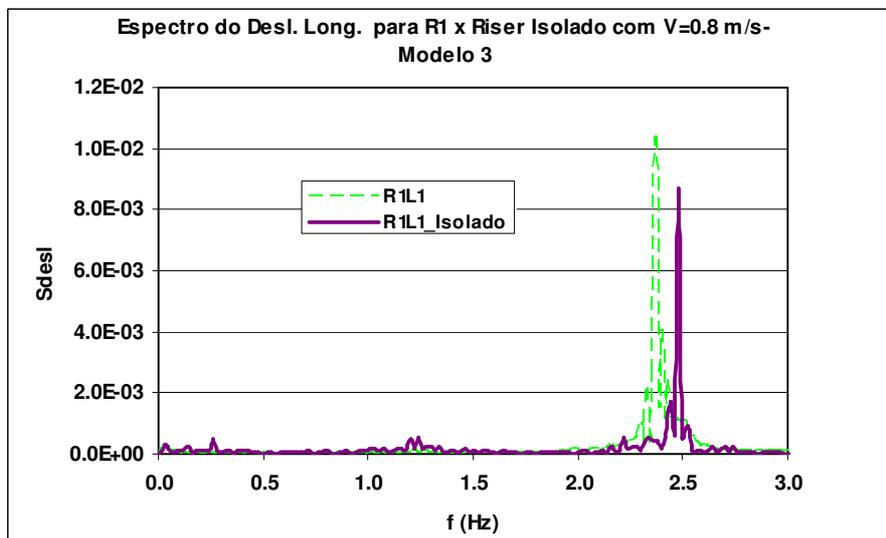


Figura C.39- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

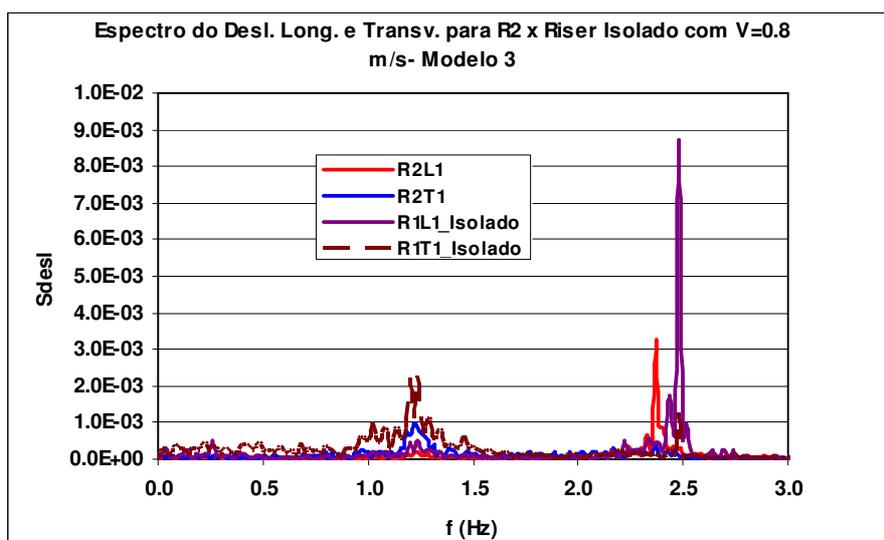


Figura C.40- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada na direção longitudinal em ambos os *risers*;
- há um aumento da energia de vibração longitudinal do *riser 1*;
- há uma redução da energia de vibração longitudinal do *riser 2* (Curva vermelha);
- há uma redução da energia de vibração transversal para o *riser 2*.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 3, apresentado na Tabela C.41 mostra que o *riser 1* (montante) foi excitado com maiores energias na direção longitudinal, já o *riser 2* foi excitado com energia maior na direção transversal.

Tabela C.41- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.225	0.071		
L2	0.223	0.070		
L3				
L4				
T1				0.052
T2				0.049
T3				0.041

A Figura C.41 mostra que no *riser 2* do modelo 3 há predominância do deslocamento transversal, gerando uma trajetória atípica.

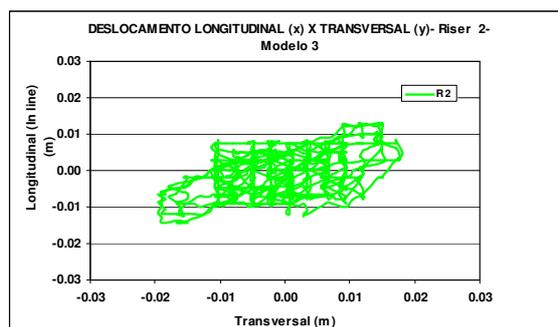


Figura C.41- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser 2* do Modelo 3.

A Tabela C.42 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.42- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 8.4 \times 10^4$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	49.322	17.705	19.270	24.628
Médio	12.923	3.775	1.612	1.027
Desvio Padrão	20.719	6.911	4.550	5.692
Mínimo	-22.005	-10.691	-12.408	-21.180

A Tabela C.43 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.43- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 8.4 \times 10^4$ (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.835	0.244

C.2.2.2 Espaçamento 3D

A seguir estão apresentados os seguintes resultados:

Modelo 1, com velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

Modelo 2, com velocidades de 0.8, 1 e 1.1 m/s.

Modelo 3, com velocidades de 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 e 1.2 m/s

C.2.2.2.1 Velocidade de 0.4 m/s

C.2.2.2.1.1 Modelo 1

A Figura C.41 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.

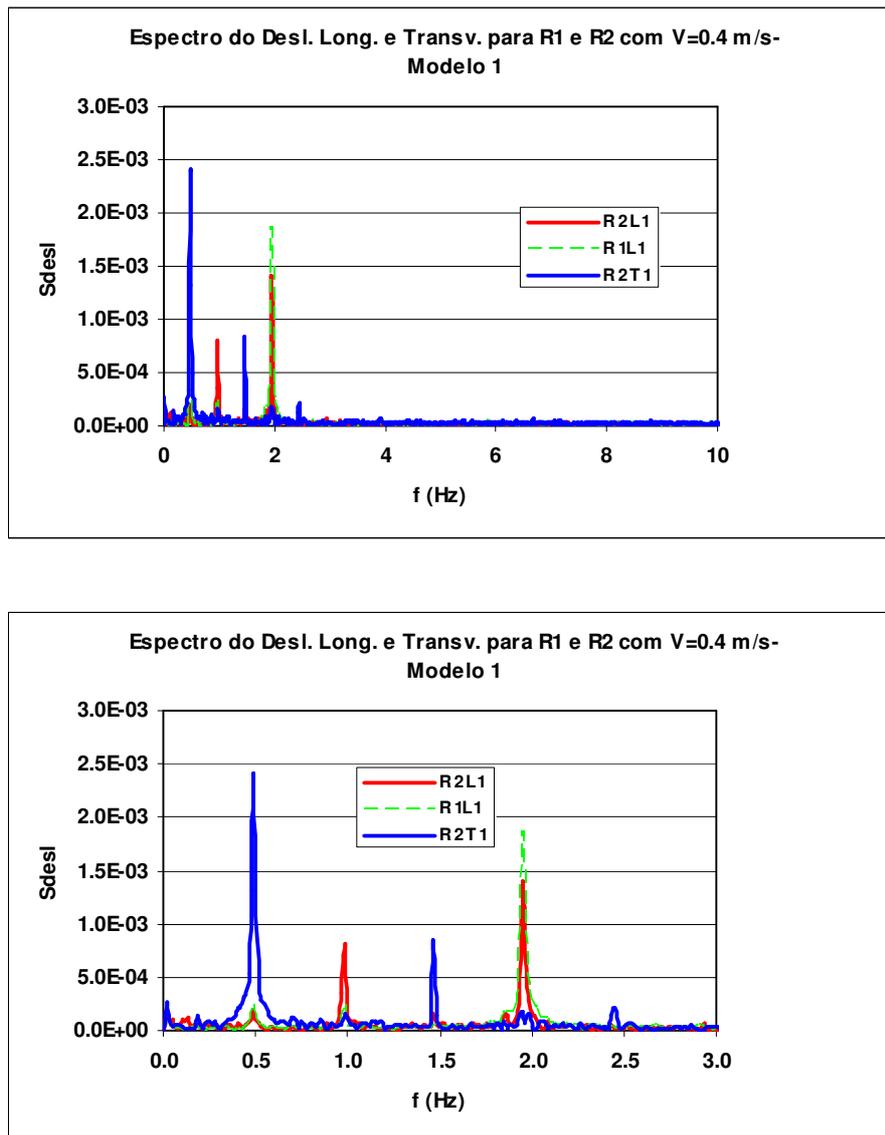


Figura C.41- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3Hz do Modelo 1.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2 para o modelo 1, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 1.95 Hz na direção longitudinal do *riser* 1 (Curva verde tracejada- R1L1) e do *riser* 2 (Curva vermelha- R2L1), estando este valor bem próximo da frequência natural

do modelo 1, que é igual a 1.85 Hz. Pode-se, ainda, observar que a energia de vibração na direção longitudinal do *riser* 2 é inferior a do *riser* 1, para o riser 2 há um harmônico com considerável energia em uma frequência em torno de 1 Hz.

A Figura C.42 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.43 e D.44 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

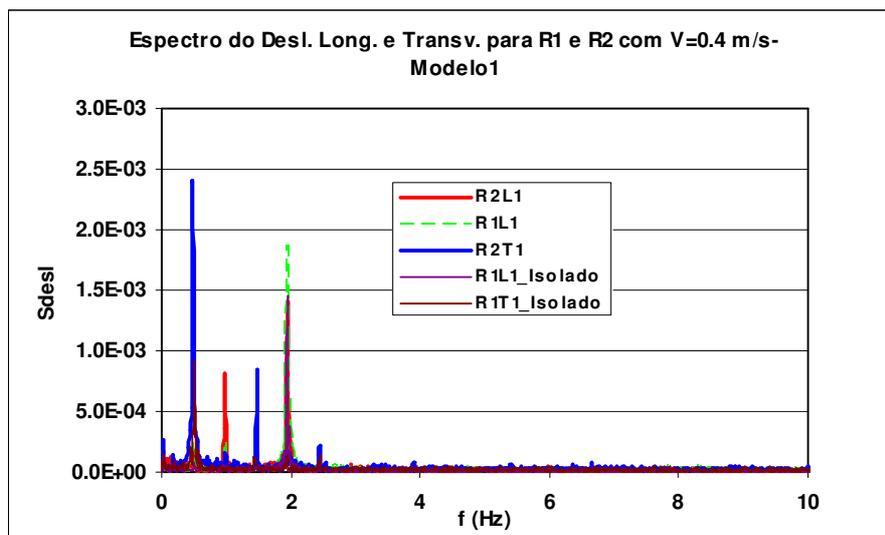


Figura C.42- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

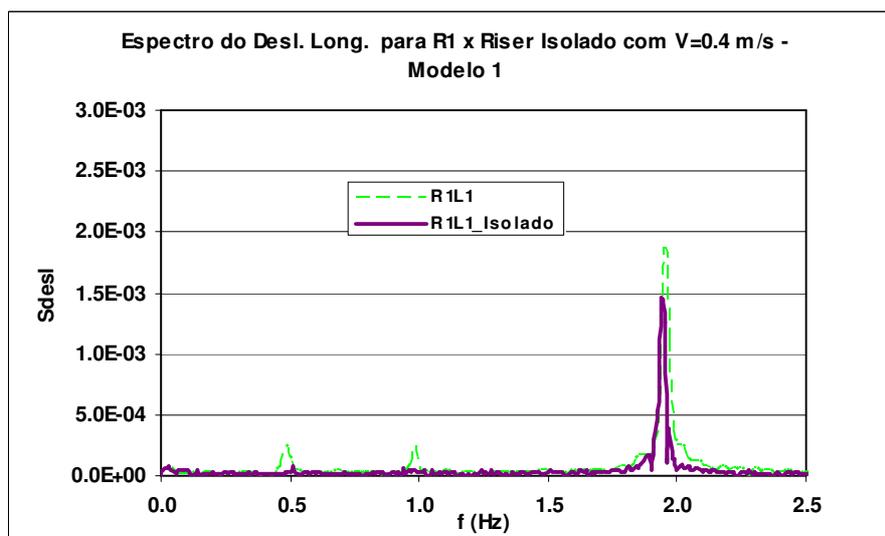


Figura C.43- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

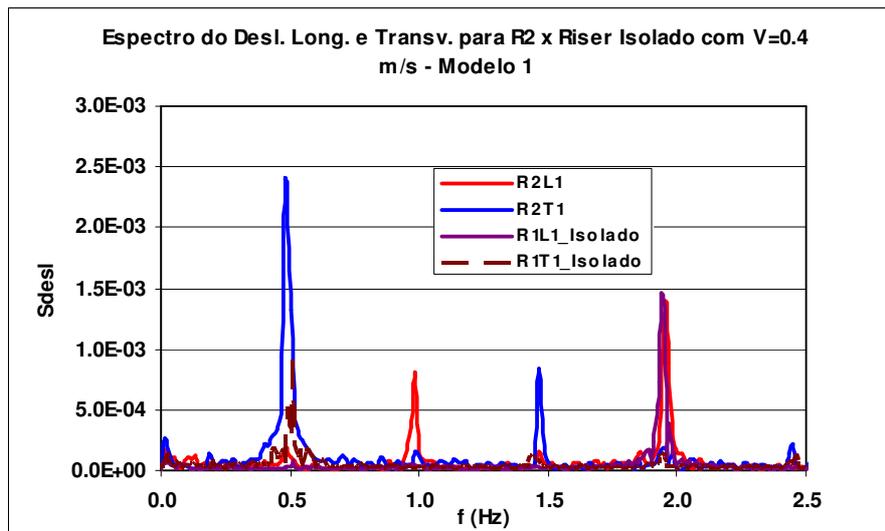


Figura C.44- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 para o modelo 1, quando comparado ao riser isolado, pode-se observar que:

- como no caso em que os *risers* estavam espaçados de 2D, há uma diminuição da variação no pico da frequência excitada para as duas direções em ambos os *risers*;
- há um aumento da energia das vibrações transversais do *riser 2* (Curva azul escura) quando comparado ao *riser* isolado, enquanto para a direção longitudinal as vibrações do *riser 2* permanecem bastante similares ao do *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 1, apresentados na Tabela C.44, mostram que os *risers* foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.44- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* do Modelo 1 medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.040	0.039		
L2	0.041	0.040		
L3				
L4				
T1				0.055
T2				0.049
T3				0.053

A Tabela C.44 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.44- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 3.88 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	9.266	9.844	10.979	9.937
Médio	3.054	0.828	3.779	0.101
Desvio Padrão	3.223	3.041	3.546	3.873
Mínimo	-3.787	-8.519	-3.052	-7.744

A Tabela C.45 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.45- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 3.88 \times 10^4$ (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.706	0.191

C.2.2.2.1.2 Modelo 3

A Figura C.45 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

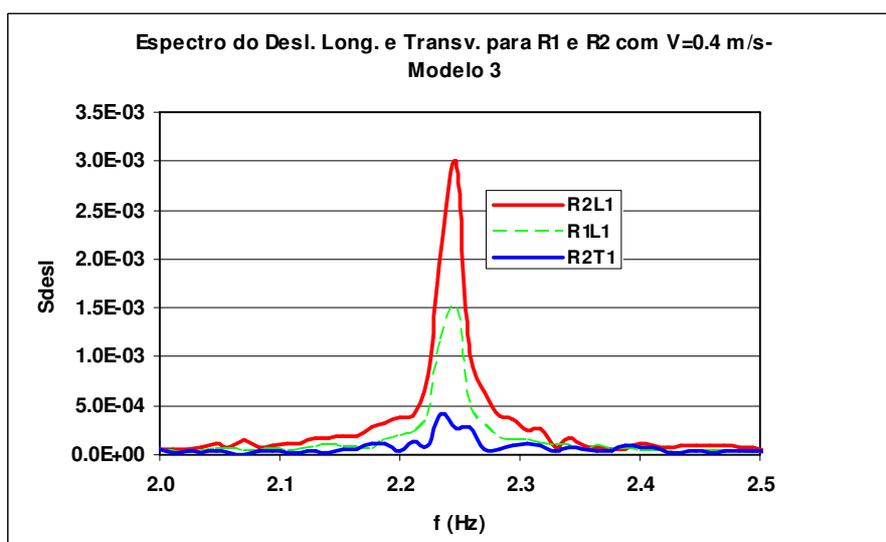
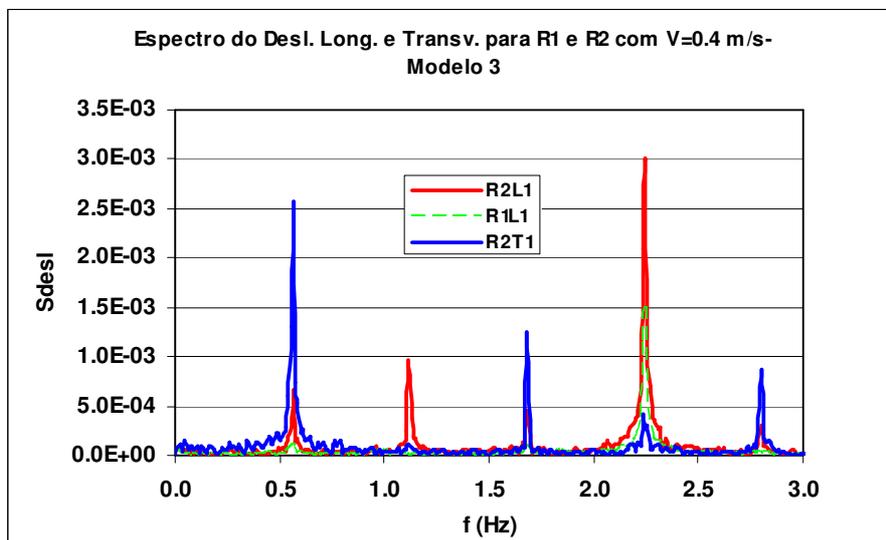
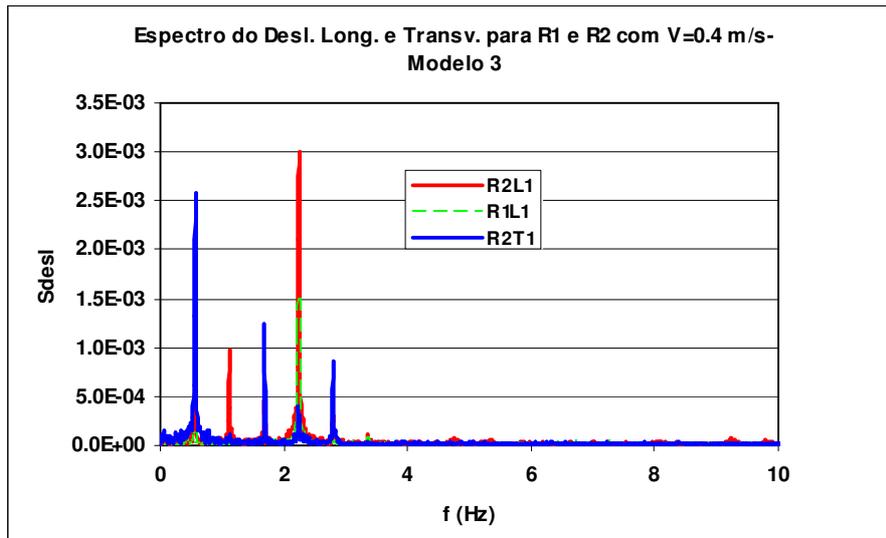


Figura C.45- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhes nas Faixas de Freqüências de 0 a 3 Hz e 2 a 2.5 Hz do Modelo 3.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2* para o modelo 3, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.25 Hz na direção longitudinal do *riser 1* (Curva verde tracejada) e do *riser 2* (Curva vermelha), estando este valor bem próximo da frequência natural do modelo 3, que é igual a 2.31 Hz. Pode-se, ainda, observar que a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 1* são inferiores as do *riser 2*. Há ,também, para este modelo um harmônico com considerável energia em uma frequência em torno de 1.1Hz para o *riser 2*.

A Figura C.46 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.47 e C.48 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

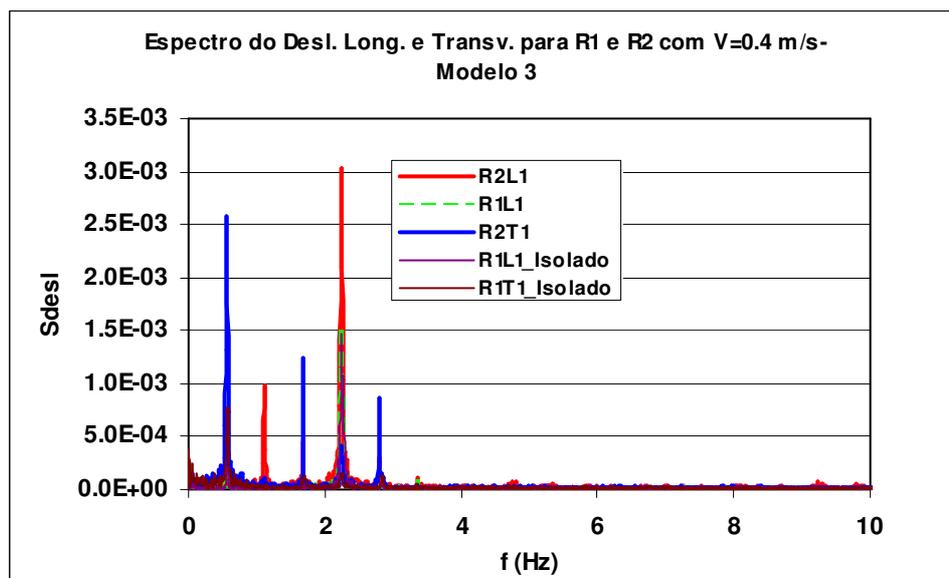


Figura C.46- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers 1* e *2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

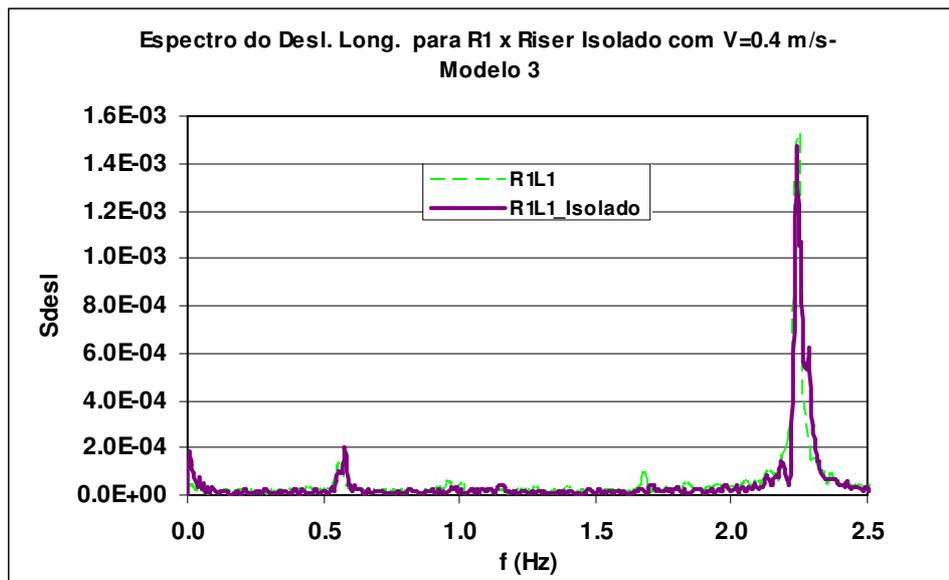


Figura C.47- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* do Modelo 3 com o *Riser Isolado*.

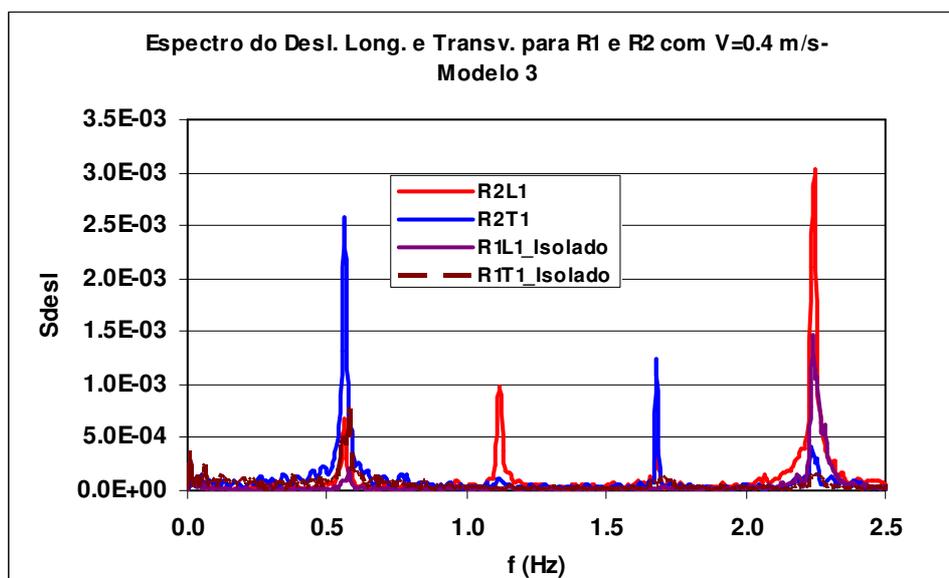


Figura C.48- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 para o modelo 3, quando comparado ao riser isolado, pode-se observar que:

- não há variação nos picos das frequências excitadas para a direção longitudinal em ambos os *risers*, como foi observada para o caso em que estão espaçados de 2D;
- há um aumento da energia das vibrações transversais do *riser 2* quando comparado ao *riser* isolado;

- na direção longitudinal, ao contrário do modelo 1, há um aumento da energia das vibrações do *riser 2* quando comparado ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 3, apresentados na Tabela C.46, mostram que os *risers* foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.46- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* do Modelo 3 medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.0389	0.0782		
L2	0.0402	0.0768		
L3				
L4				
T1				0.0659
T2				0.0626
T3				0.0537

A Tabela C.47 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.47- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 4.19 \times 10^4$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	12.500	16.387	8.027	13.008
Médio	5.831	0.757	-0.596	-0.036
Desvio Padrão	3.636	7.526	4.772	6.567
Mínimo	-1.247	-13.816	-8.851	-13.429

A Tabela C.48 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.48- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 4.19 \times 10^4$ (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.507	0.196

C.2.2.2.2 Velocidade de 0.6 m/s

C.2.2.2.2.1 Modelo 1

A Figura C.49 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.

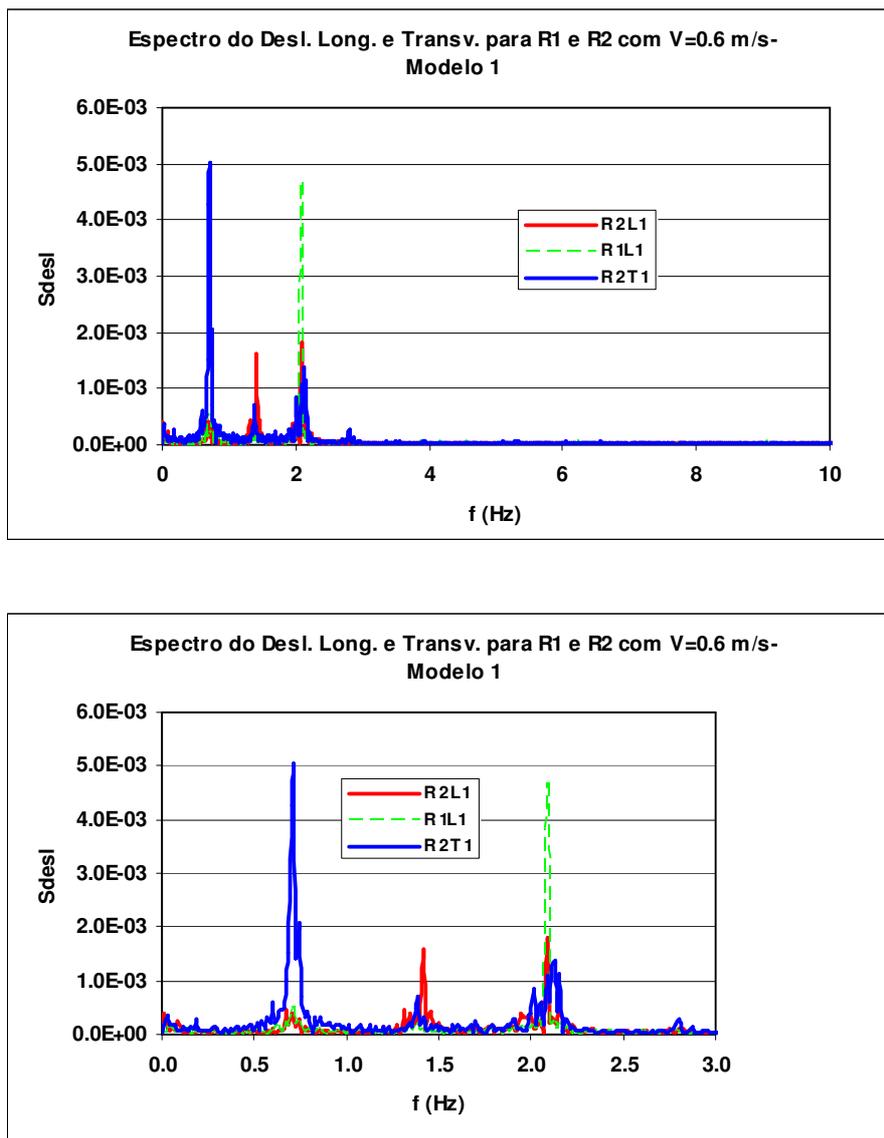


Figura C.49- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser* 2 e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz. para o Modelo 1.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2 do modelo 1, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.1 Hz na direção longitudinal do *riser* 1, este deslocamento

longitudinal do *riser* 1 apresenta considerável energia quando comparada a energia de excitação na direção longitudinal do riser 2. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal do *riser* 2 há uma considerável energia de excitação na frequência de 0.72 Hz.

A Figura C.50 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.51 e C.52 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

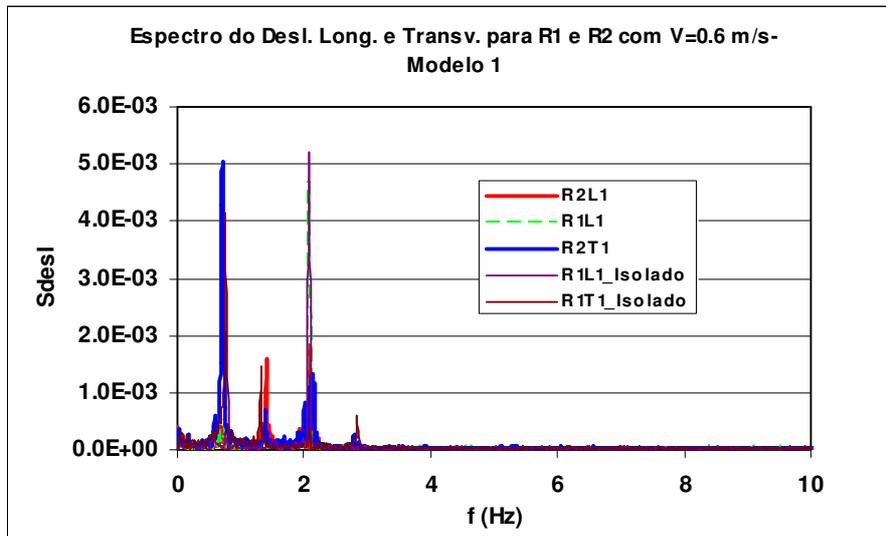


Figura C.50- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado para o Modelo 1.

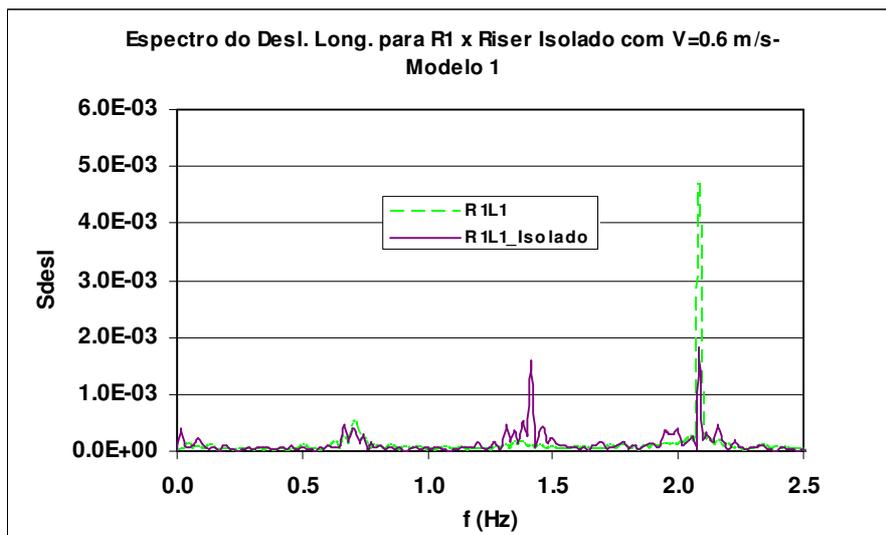


Figura C.51- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

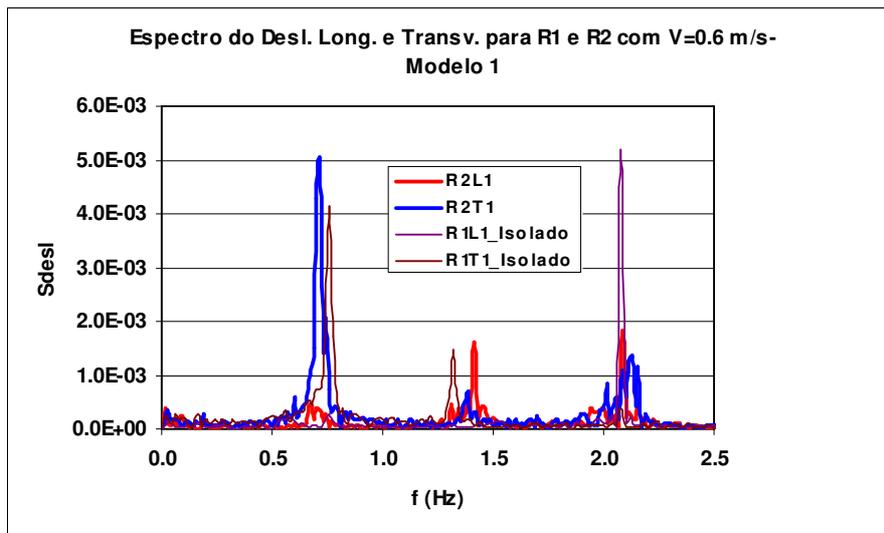


Figura C.52- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 1 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 do modelo 1, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena variação nos picos das frequências excitadas na direção longitudinal para ambos os *risers* e na direção transversal do *riser 2*;
- há uma redução expressiva na energia das vibrações longitudinais do *riser 2*;
- há uma redução na energia das vibrações transversais do *riser 2* quando comparado ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 1, apresentados na Tabela C.48, mostram que os *risers* foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.48- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio para o Modelo 1.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.040	0.039		
L2	0.041	0.040		
L3				
L4				
T1				0.055
T2				0.049
T3				0.053

A Tabela C.49 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.49- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 5.81 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	21.188	16.677	28.541	24.359
Médio	3.738	3.051	12.053	0.745
Desvio Padrão	8.918	4.232	7.280	10.439
Mínimo	-18.698	-8.600	-1.851	-22.936

A Tabela C.50 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.50- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 5.81 \times 10^4$ (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.384	0.313

C.2.2.2.2 Modelo 3

A Figura C.53 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

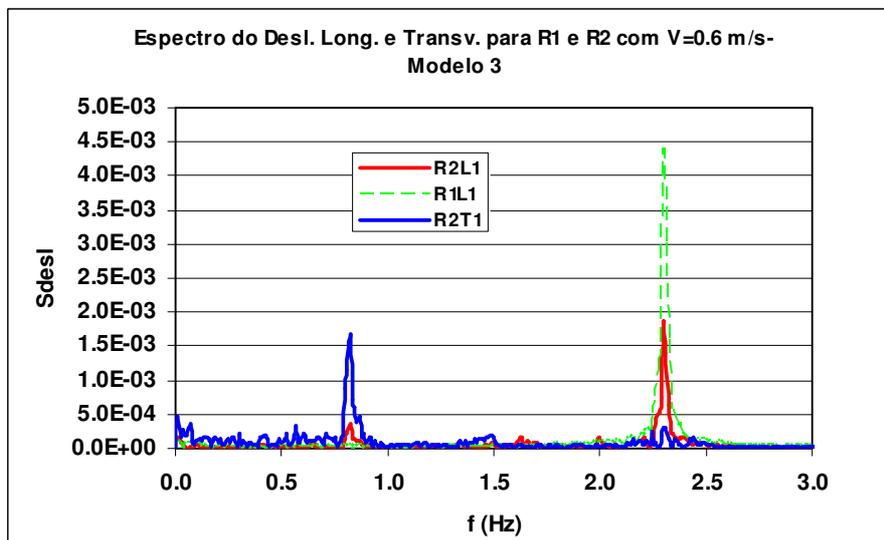
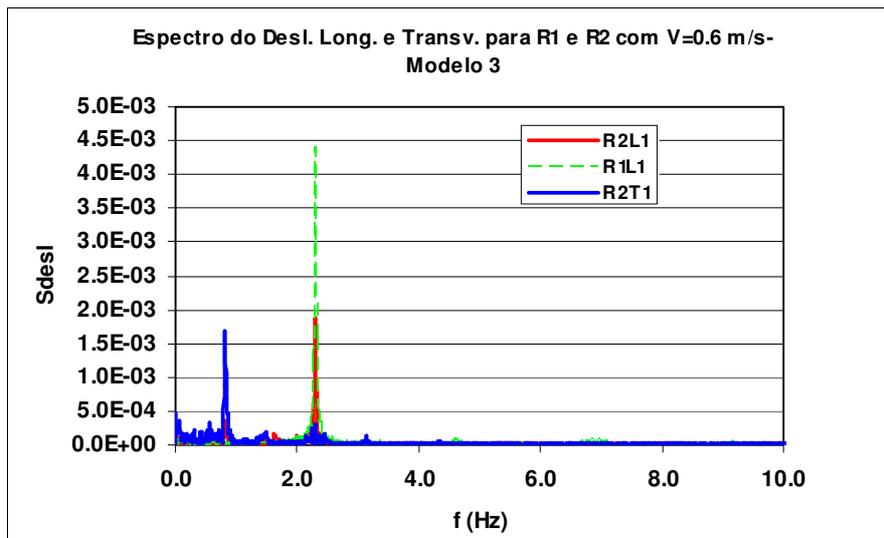


Figura C.53- Espectro do Deslocamento Transversal e Longitudinal para os *Risers* 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Freqüência de 0 a 3 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2* do modelo 3, pode-se observar que há um comportamento similar ao modelo 1, sendo que os picos estão em freqüências um pouco maiores, já que a freqüência natural do modelo 3 é maior que do 1.

A Figura C.54 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.55 e C.56 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de freqüência de 0 a 2.5 Hz.

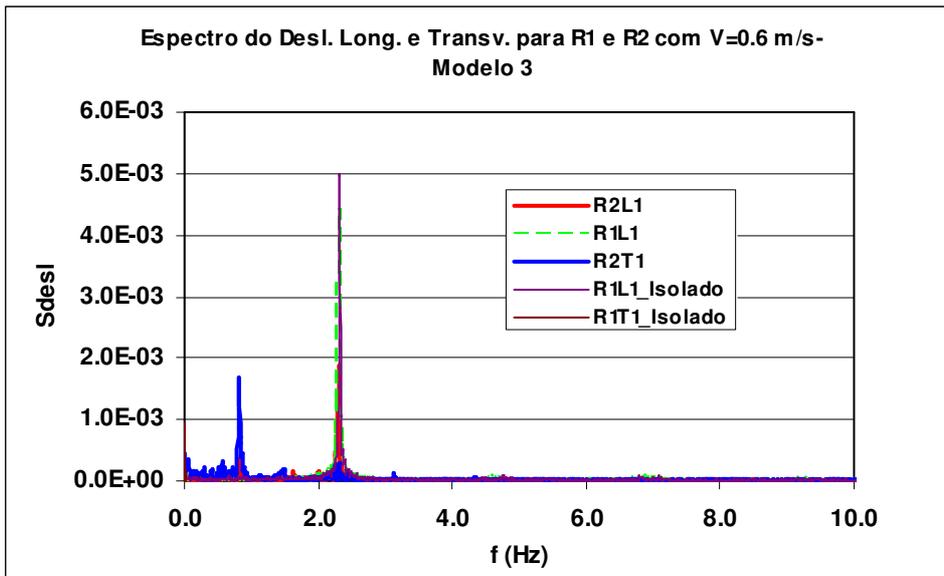


Figura C.54- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado para o Modelo 3.

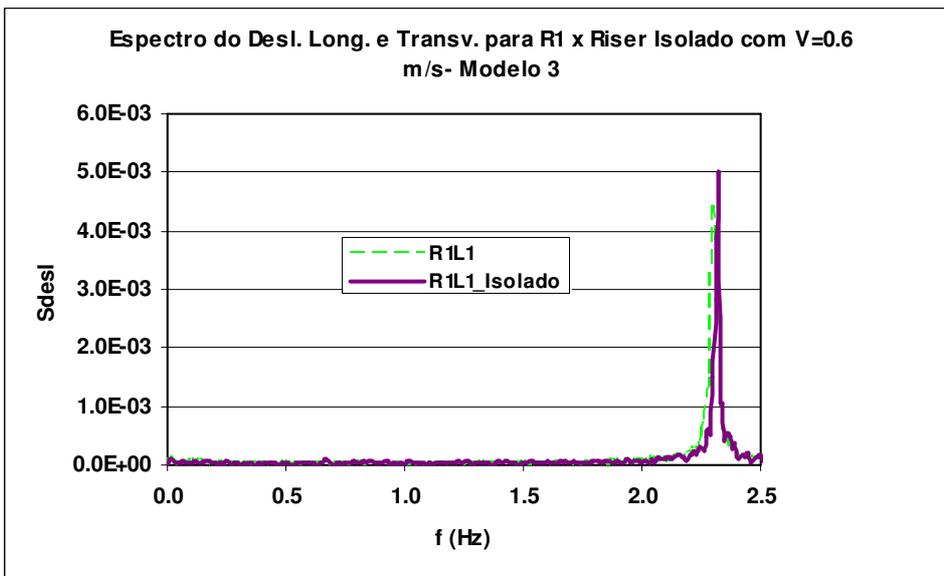


Figura C.55- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

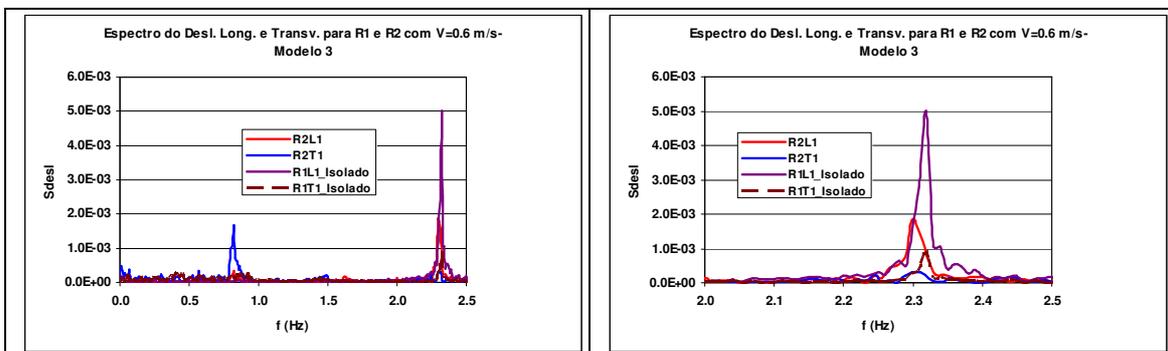


Figura C.56- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser* 2 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 do modelo 3, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada na direção longitudinal do *riser* 1;
- há uma redução na energia das vibrações longitudinais do *riser* 2;

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 3, apresentados na Tabela C.51, mostram que os *risers* foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser* 2 na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.51- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o Modelo 3.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.1096	0.0500		
L2	0.1083	0.0503		
L3				
L4				
T1				0.0530
T2				0.0518
T3				0.0459

A Tabela C.52 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.52- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 6.28 \times 10^4$ (Modelo 3).

	F_x (kgf)		F_y (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	25.704	12.844	9.609	12.262
Médio	8.223	2.883	-0.065	0.149
Desvio Padrão	9.952	4.780	4.175	5.279
Mínimo	8.533	-6.001	-10.644	-12.605

A Tabela C.53 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.53- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 6.28 \times 10^4$ (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.945	0.331

C.2.2.2.3 Velocidade de 0.8 m/s

C.2.2.2.3.1 Modelo 1

A Figura C.57 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.

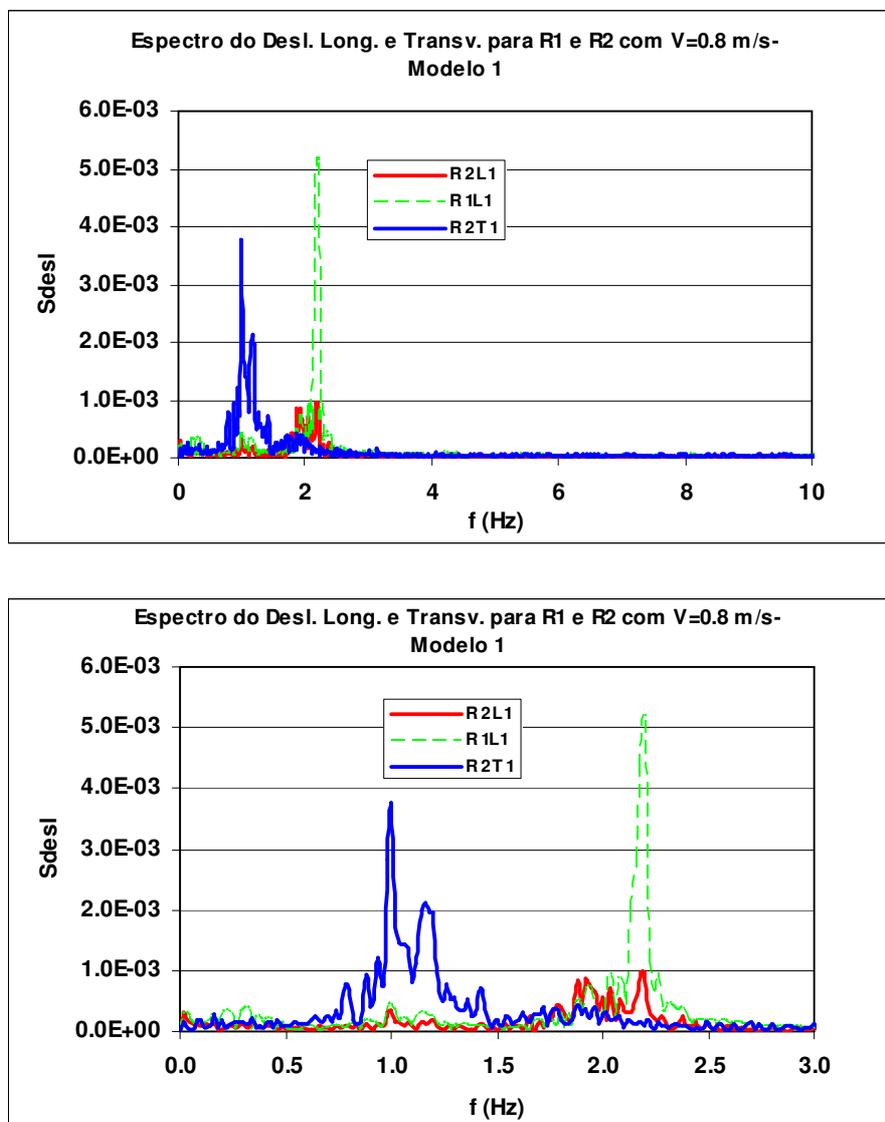


Figura C.57- Espectro do Deslocamento Transversal para o Riser 2 e Longitudinal para os Risers 1 e 2 e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz para o Modelo 1.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.2 Hz na direção longitudinal do *riser 1*, já para o *riser 2* a energia está reduzida e foram excitados 2 harmônicos com pequena energia quando comparado ao *riser 1*. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal do *riser 2* há uma considerável energia de excitação.

A Figura C.58 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.59 e C.60 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

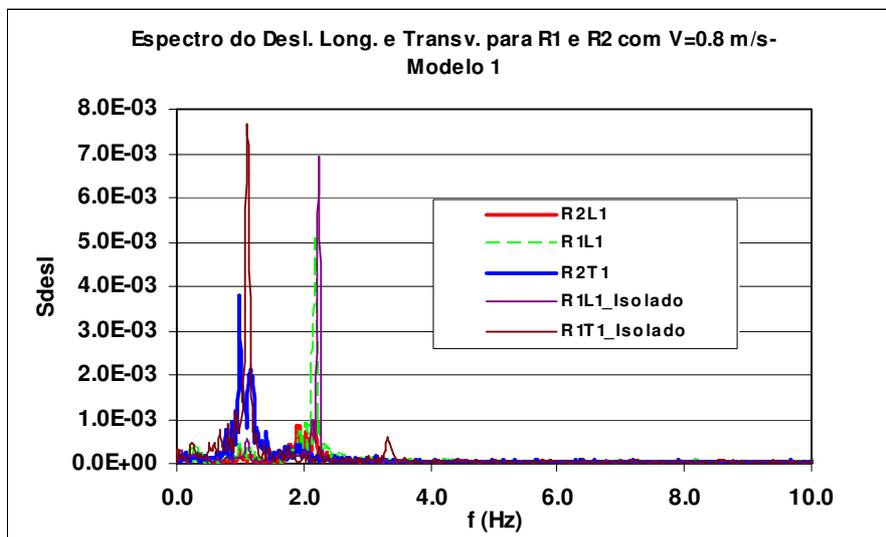


Figura C.58- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers 1* e 2 com o *Riser* Isolado.

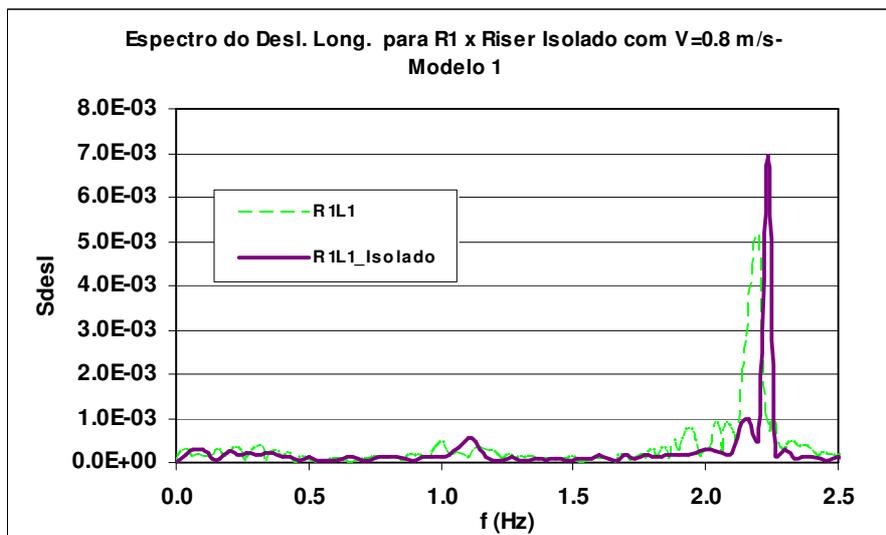


Figura C.59- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* com o *Riser* Isolado.

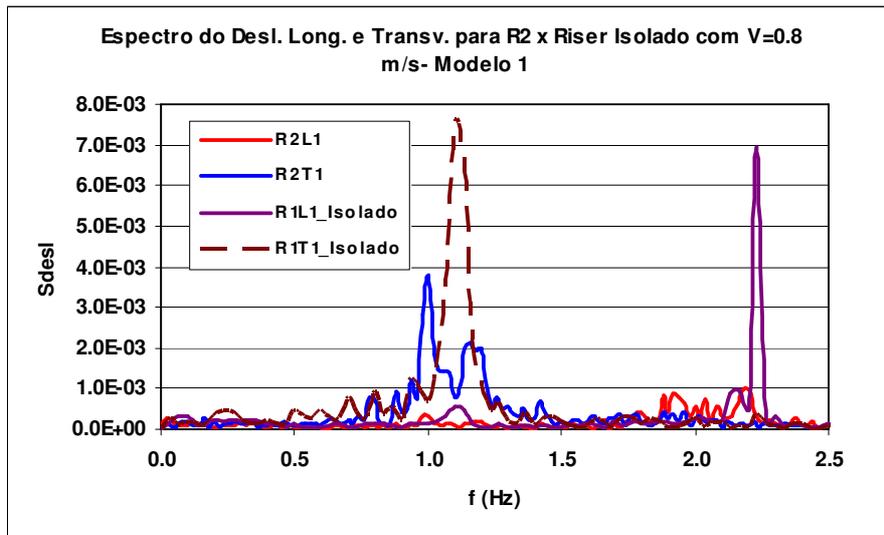


Figura C.60- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma redução da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 2 (jusante);
- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal em do *riser* 2 quando comparado ao *riser* isolado. Pode-se, ainda, observar que é excitada uma faixa maior de frequências e que há uma mudança da frequência de pico quando comparada ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.54, mostram que o *riser* 2 foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela C.54- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.132	0.049		
L2	0.132	0.049		
L3				
L4				
T1				0.124
T2				0.121
T3				0.115

A Figura C.61 mostra que para o *riser 2* há deslocamentos em ambas as direções, com predominância das vibrações na direção transversal. A trajetória é atípica, aproximando-se da clássica figura em forma de oito como encontrado na literatura.

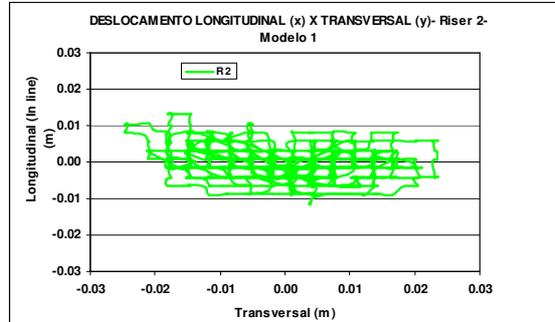


Figura C.61- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser 2*.

A Tabela C.55 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.55- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 7.8 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	45.195	15.111	21.594	24.994
Médio	18.997	4.193	-5.325	0.561
Desvio Padrão	12.183	3.873	9.868	10.270
Mínimo	-4.064	-7.377	-29.644	-24.665

A Tabela C.56 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.56- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 7.8 \times 10^4$ (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.098	0.242

C.2.2.2.3.2 Modelo 2

A Figura C.62 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 2.

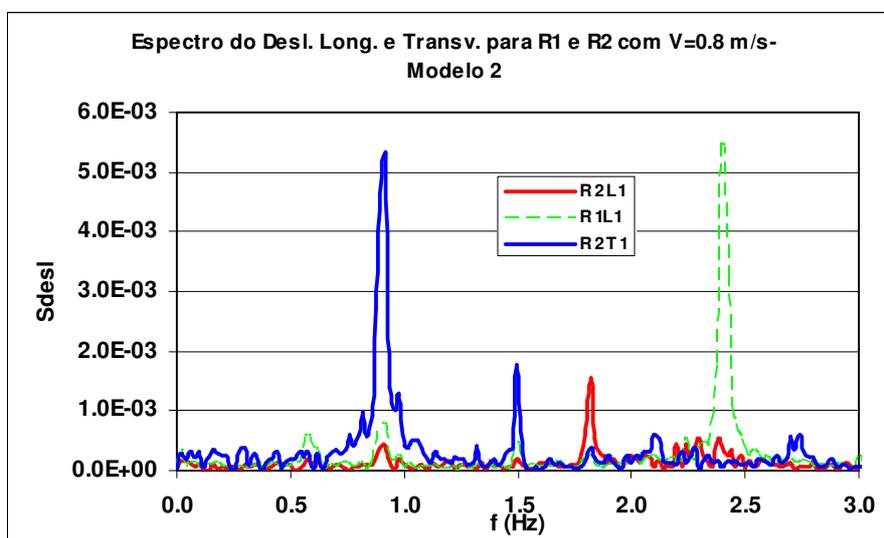
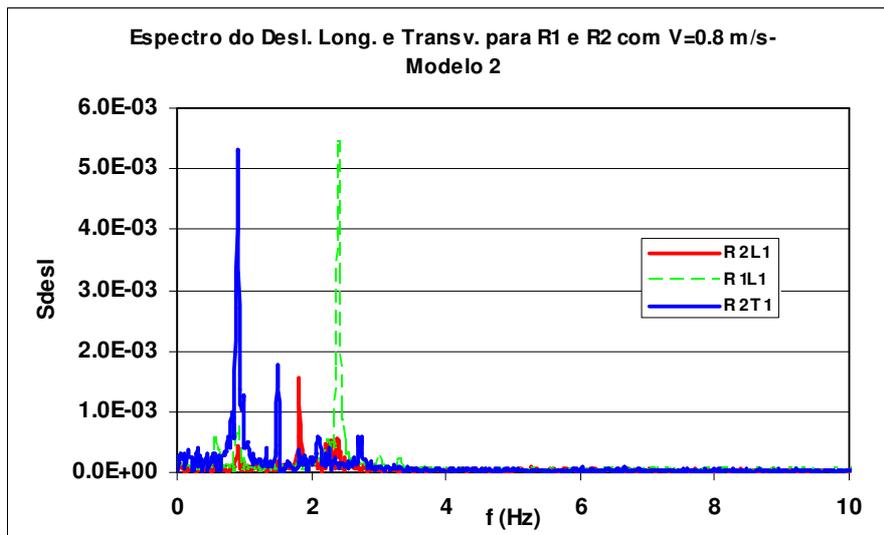


Figura C.62- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1 e 2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz.do Modelo 2.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1 e 2* do modelo 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.4 Hz na direção longitudinal do *riser 1*; já para o *riser 2* foi excitada uma frequência com pico em torno 1.82 Hz com energia bastante reduzida quando comparado ao *riser 1*. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal há energia de excitação considerável para o *riser 2*. É importante salientar que comportamento similar foi obtido para o modelo 1.

A Figura C.63 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.64 e

C.65 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 3 Hz.

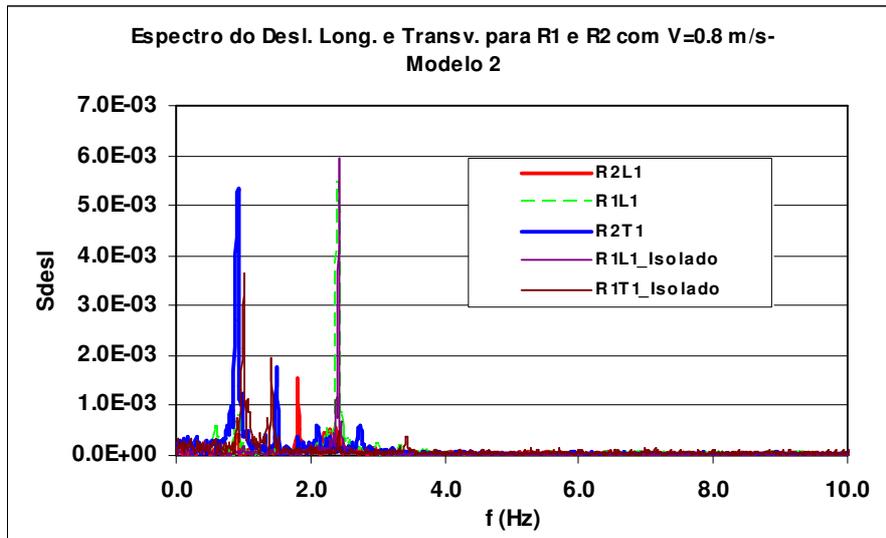


Figura C.63- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

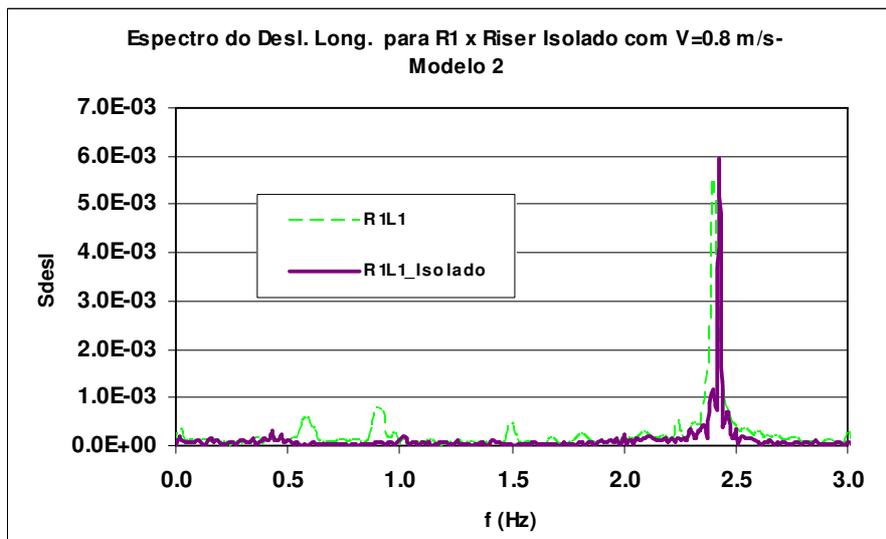


Figura C.64- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

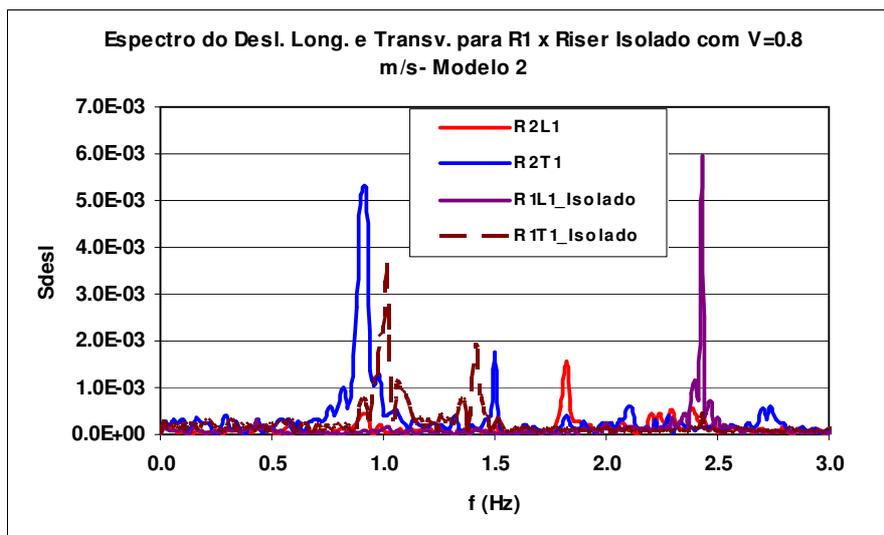


Figura C.65- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança dos picos de frequência dos *risers* alinhados e espaçados de 3D;
- há uma pequena redução na energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 1 (montante);
- há uma redução na energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 2 (jusante);
- há um aumento da energia da vibração na direção transversal do *riser* 2 (Jusante), quando comparado ao *riser* isolado.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.57, mostram que o *riser* 2 foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela C.57- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o Modelo 2.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.118	0.043		
L2	0.117	0.044		
L3				
L4				
T1				0.146
T2				0.145
T3				0.142

A Figura C.66 mostra que o *riser* 2 desloca-se predominantemente na direção transversal. A trajetória é atípica, aproximando-se da clássica figura em forma de oito como encontrado na literatura.

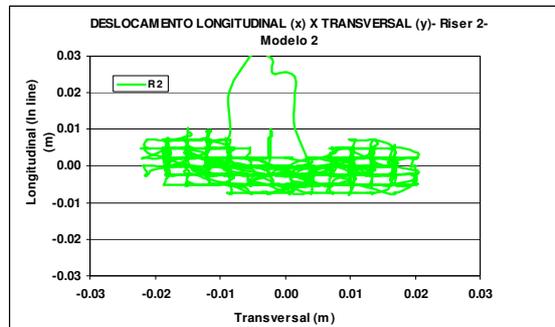


Figura C.66- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser* 2.

A Tabela C.58 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.58- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 7.8 \times 10^4$ (Modelo 2).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	52.312	20.243	40.792	30.642
Médio	19.860	5.572	1.681	0.473
Desvio Padrão	13.364	4.458	16.751	14.800
Mínimo	-11.554	-7.650	-37.008	-29.462

A Tabela C.59 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.59- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 7.8 \times 10^4$ (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.148	0.322

C.2.2.2.3.3 Modelo 3

A Figura C.67 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

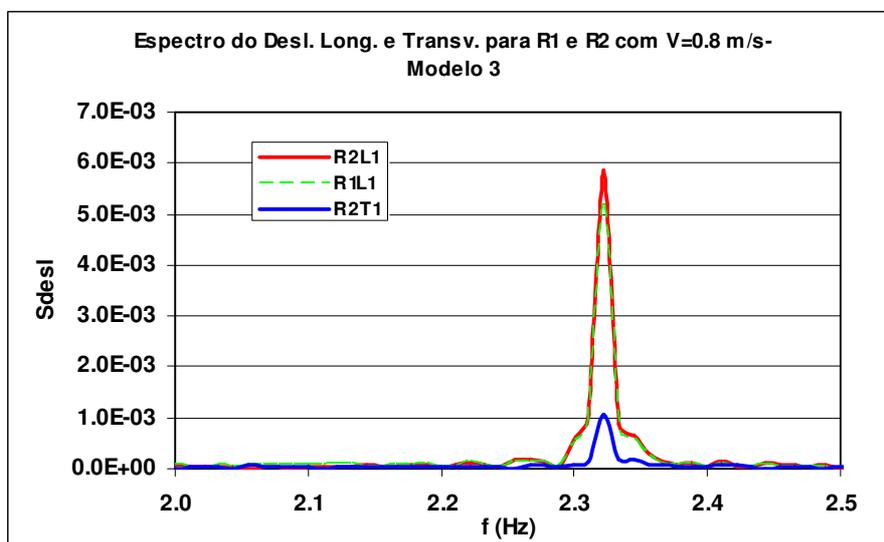
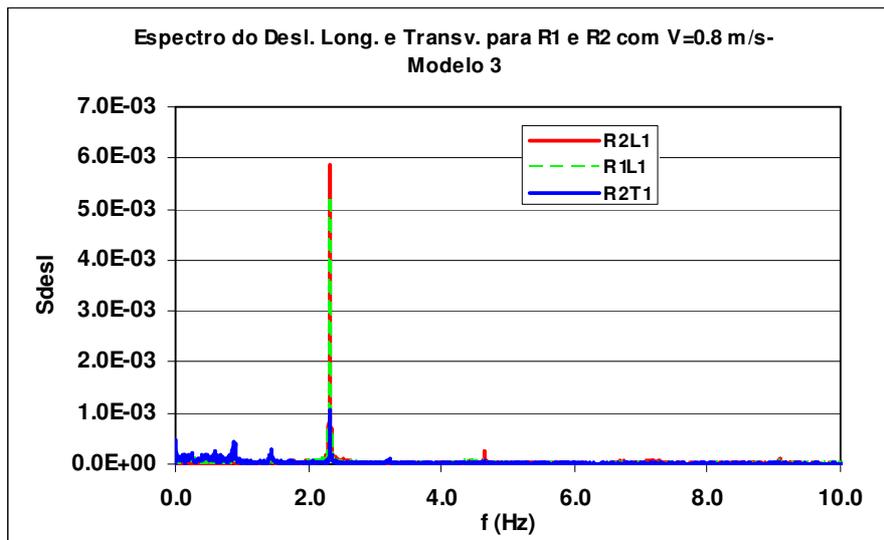


Figura C.67- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Freqüência de 2 a 2.5 Hz.do Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2* do modelo 3, pode-se observar que foi excitada uma freqüência em torno de 2.3 Hz na direção longitudinal de ambos os *risers*; quanto a direção transversal do *riser 2* não há quase energia de excitação, conforme mostrado no detalhe.

A Figura C.68 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.69 e C.70 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de freqüência de 0 a 2.5 Hz.

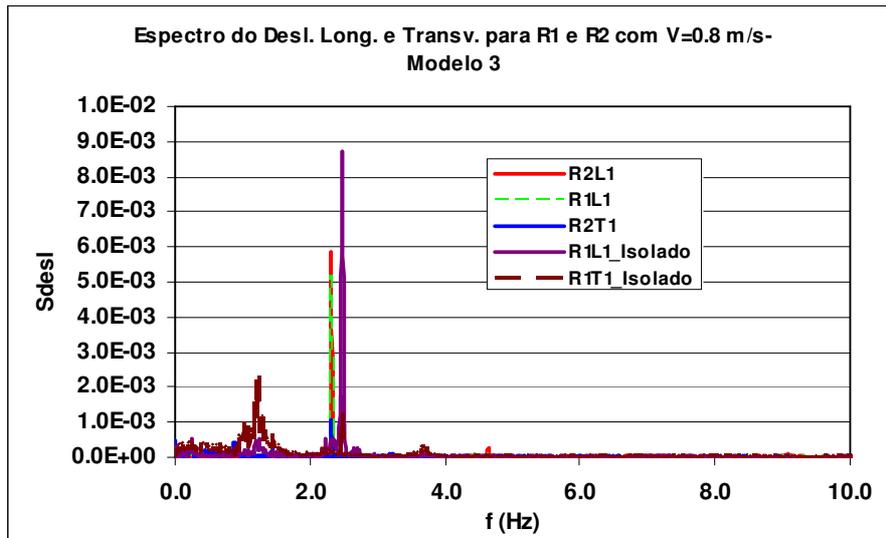


Figura C.68- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

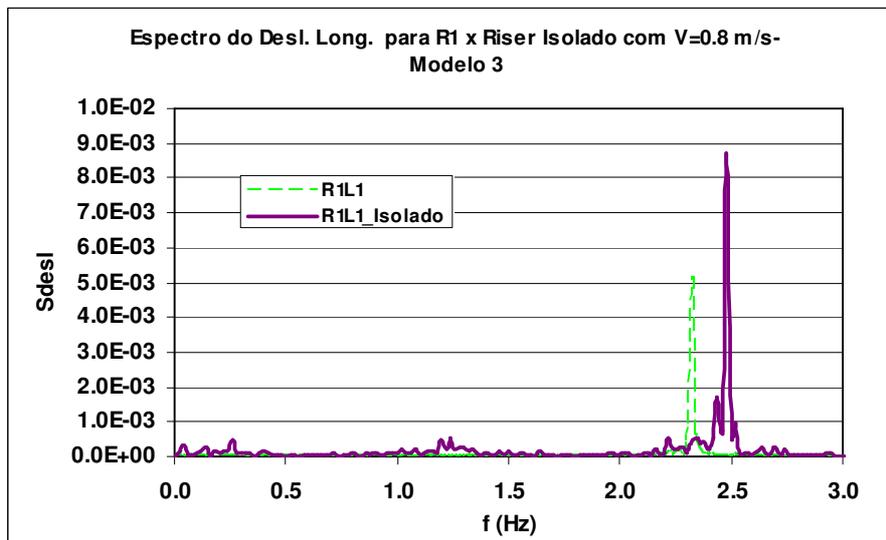


Figura C.69- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

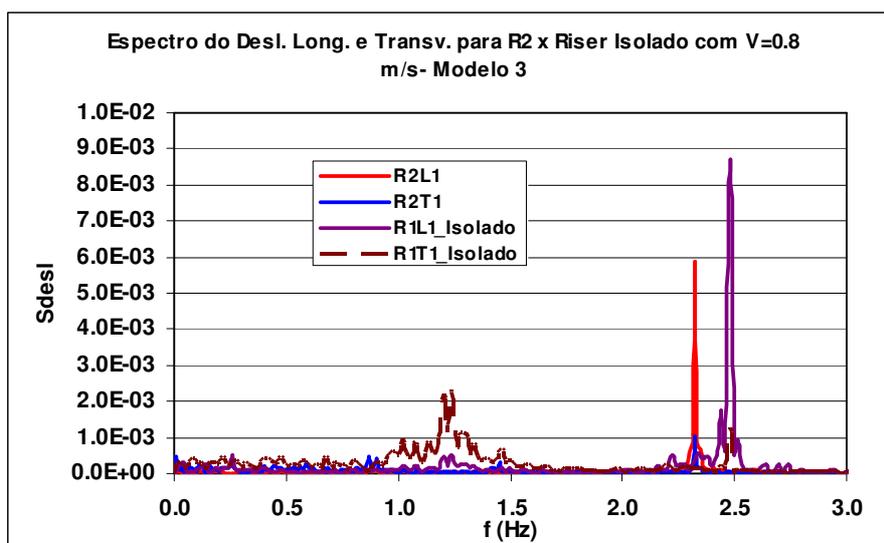


Figura C.70- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma redução da energia do deslocamento longitudinal de ambos os *risers*, quando comparado ao *riser* isolado;
- há uma mudança dos picos de frequência dos *risers* alinhados e espaçados de 3D quando comparado ao *riser* isolado;
- há uma pequena energia de vibração na direção transversal do *riser 2*, que está distribuída em uma larga faixa de frequências ao longo do espectro.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.60, mostram que o *riser 2* foi excitado com maior energia na direção longitudinal, já o *riser 1* foi excitado na direção longitudinal com amplitude o dobro da amplitude do *riser 2*.

Tabela C.60- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidos no ensaio para o Modelo 3.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.206	0.107		
L2	0.203	0.104		
L3				
L4				
T1				0.091
T2				0.087
T3				0.075

A Figura C.71 mostra que há deslocamento em ambas as direções do riser 2. Gerando uma trajetória atípica, aproximando-se da clássica figura em forma de oito.

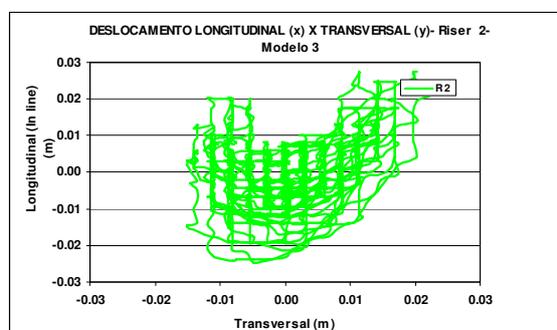


Figura C.71- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Riser 2.

A Tabela C.61 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.61- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 8.37 \times 10^4$ (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	44.794	33.803	18.969	24.576
Médio	11.721	3.799	-0.474	0.187
Desvio Padrão	17.977	9.946	7.777	9.808
Mínimo	-23.680	-23.248	-18.422	-21.756

A Tabela C.62 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.62- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 8.37 \times 10^4$. (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.757	0.246

C.2.2.2.4 Velocidade de 1.0 m/s

C.2.2.2.4.1 Modelo 2

A Figura C.72 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 2.

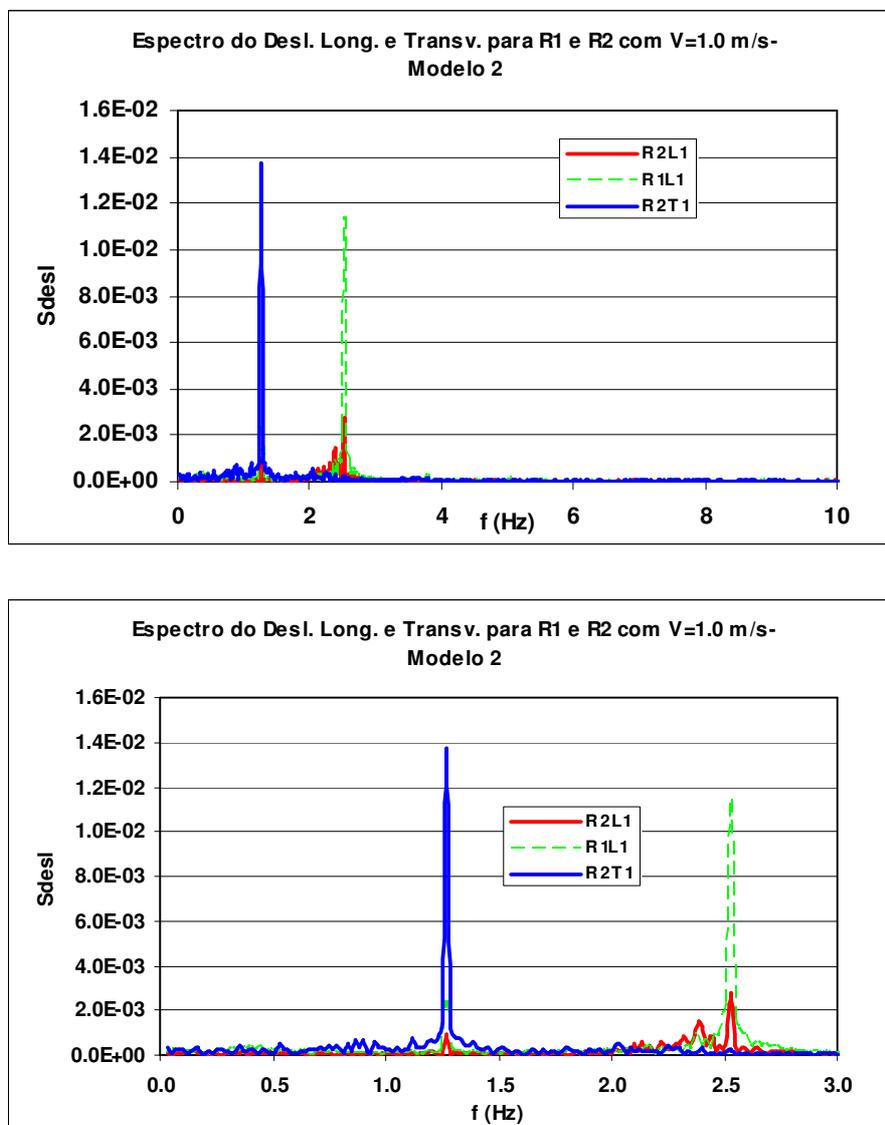


Figura C.72- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1 e 2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz para o Modelo 2.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.5 Hz na direção longitudinal do *riser* 1 (Curva verde tracejada), já na direção longitudinal do *riser* 2 foi excitada uma frequência em torno 2.5 Hz, com menor energia que a do *riser* 1 (Curva vermelha). Na direção transversal do *riser* 2, foi excitada uma frequência em torno de 1.30Hz, com maior energia que na direção longitudinal deste *riser*.

A Figura C.73 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.74 e C.75 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

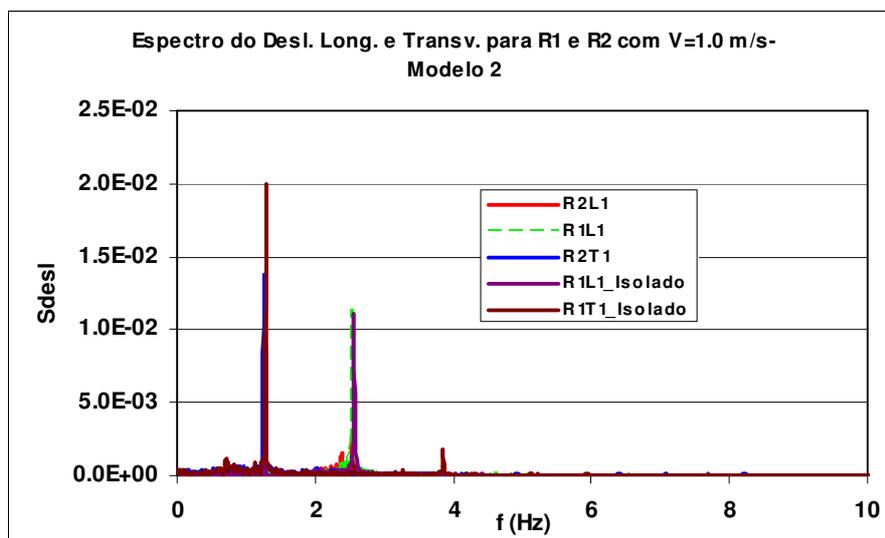


Figura C.73- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

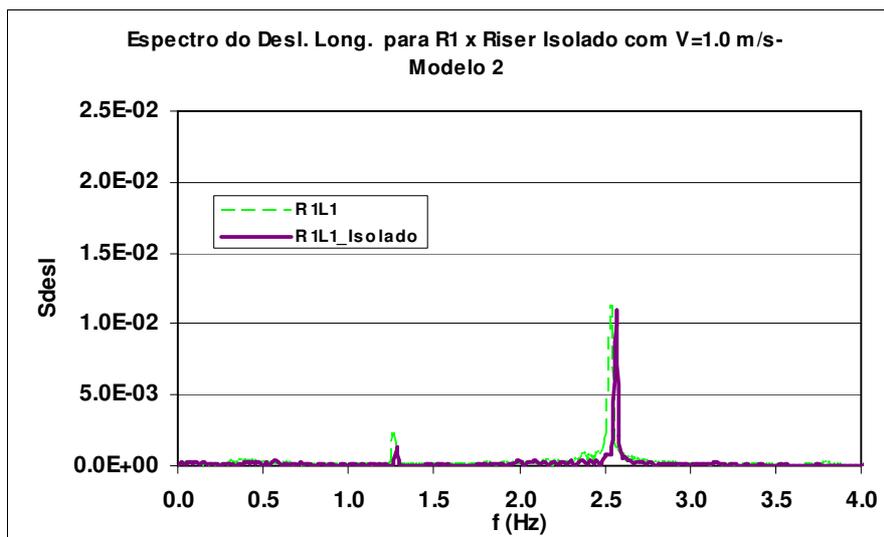


Figura C.74- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

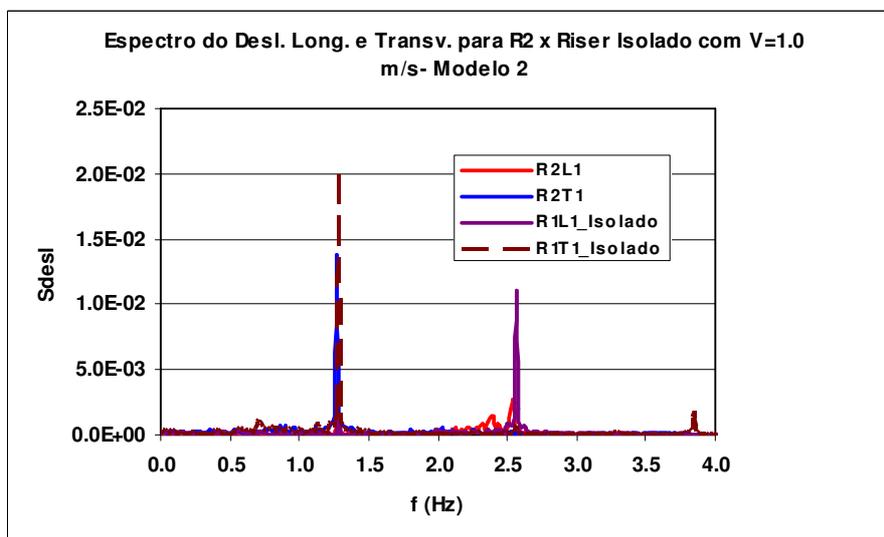


Figura C.75- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança das frequências de excitação longitudinal para ambos os *risers* e transversal para o *riser 2*;
- a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 1* (montante) é similar ao *riser* isolado;
- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal do *riser 2* (jusante);

- há uma redução da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 2;

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.63, mostram que o *riser* 2 foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela C.63- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio para o Modelo 2.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.2025	0.0761		
L2	0.2934	0.0705		
L3				
L4				
T1				0.2294
T2				0.2286
T3				0.2252

A Figura C.76 mostra que há deslocamento em ambas as direções do *riser* 2, com predominância das vibrações na direção transversal com uma trajetória aproximadamente achatada, aproximando-se clássica figura em forma de oito.

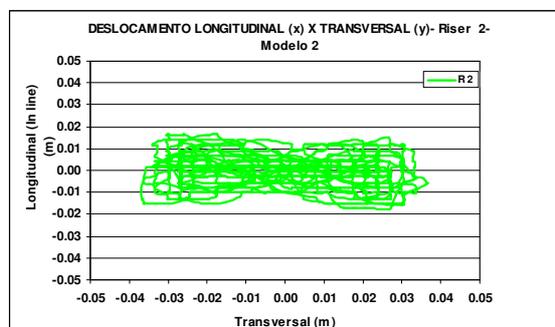


Figura C.76- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser* 2.

A Tabela C.64 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.64- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 9.69 \times 10^4$ (Modelo 2).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	85.139	29.054	60.820	49.568
Médio	31.397	5.720	-2.522	0.528
Desvio Padrão	23.847	8.341	33.201	26.487
Mínimo	-21.406	-20.571	-65.881	-48.581

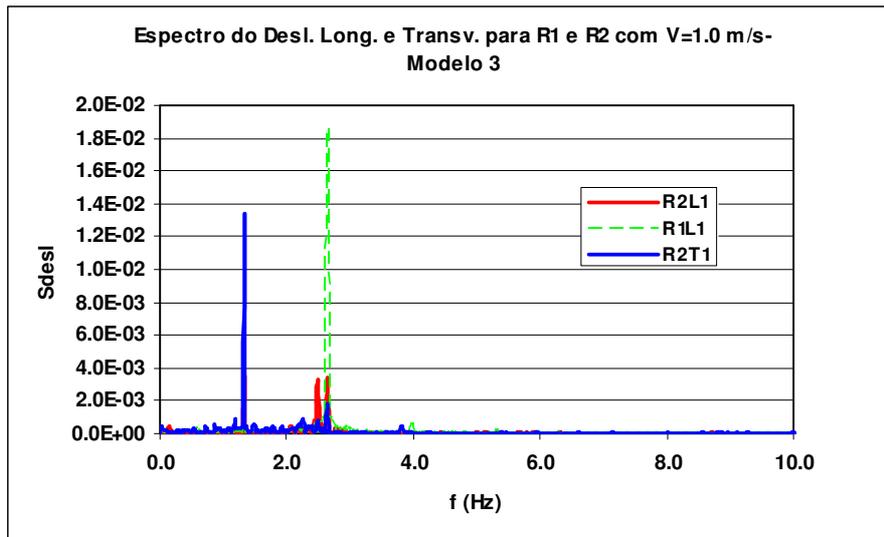
A Tabela C.65 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.65- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 9.69 \times 10^4$. (Modelo 2).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.298	0.236

C.2.2.2.4.2 Modelo 3

A Figura C.77 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.



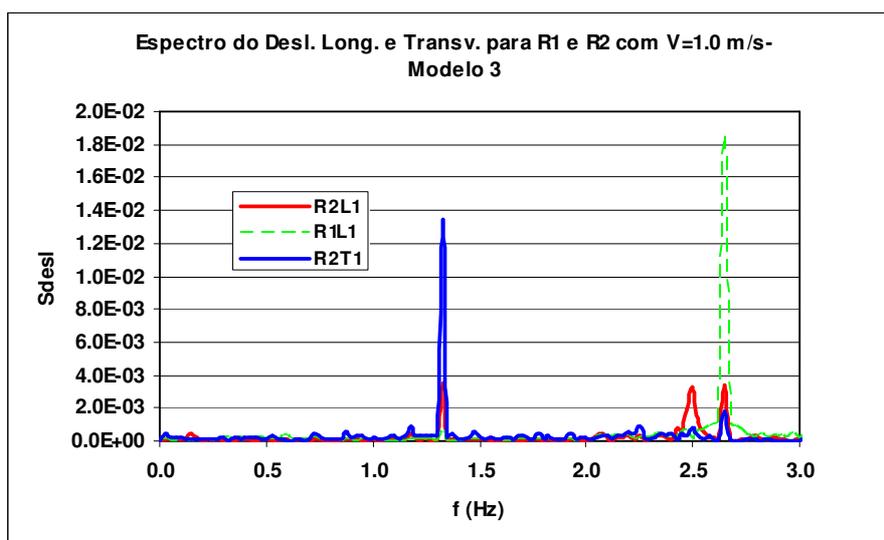


Figura C.77- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 3Hz para o Modelo 2.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada com maior energia uma frequência em torno de 2.65 Hz na direção longitudinal do *riser 1* (Curva verde tracejada), já para o *riser 2* na direção longitudinal foi excitada uma frequência em torno 1.35 Hz bastante reduzida quando comparado ao *riser 1* (Curva vermelha) e 2 harmônicos nas frequências de 2.5 e 2.65 Hz. Já na direção transversal, o *riser 2* foi excitado na frequência em torno de 1.35 Hz, com energia maior do que na direção longitudinal.

A Figura C.78 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.79 e C.80 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

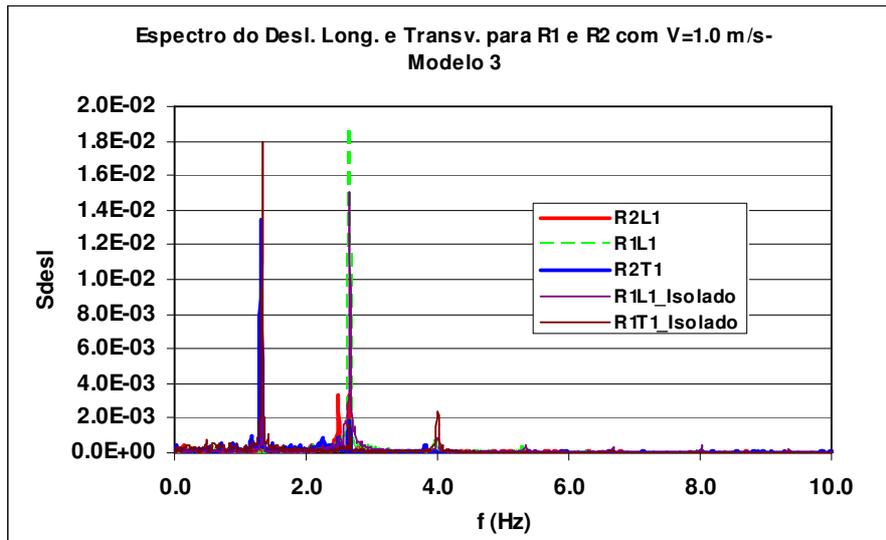


Figura C.78- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

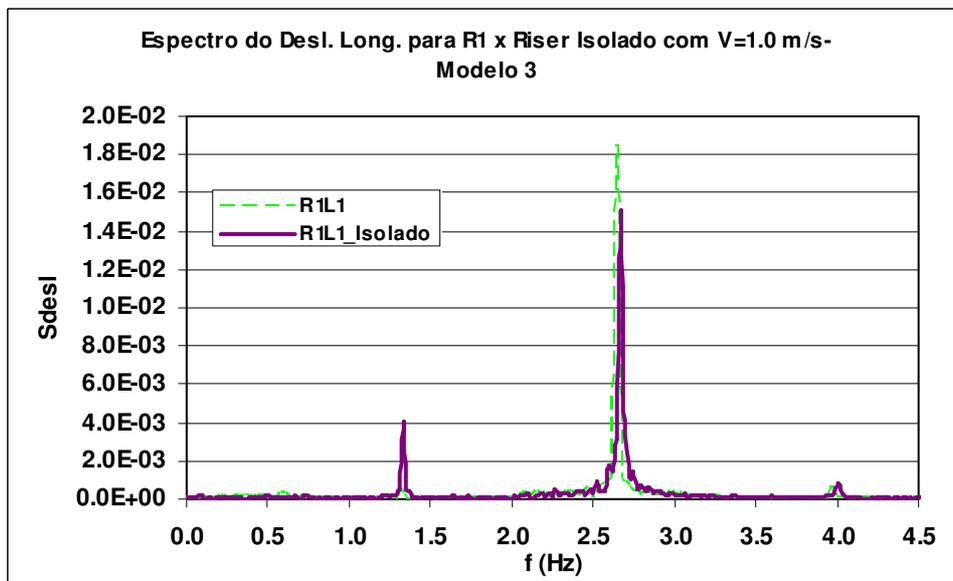


Figura C.79- Comparação dos espectros dos deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

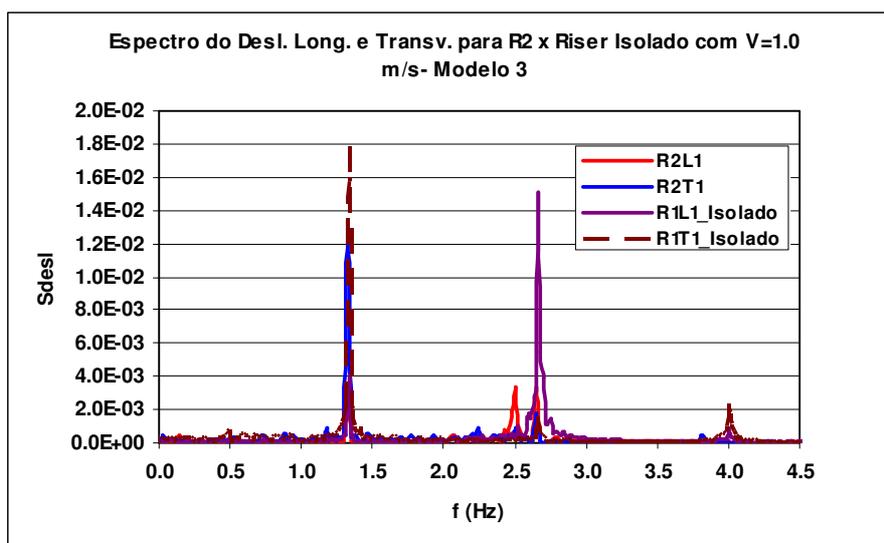


Figura C.80- Comparação dos espectros dos deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena variação dos picos das frequências de excitação longitudinal para ambos os *risers* e transversal para o *riser 1*;
- há um aumento da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 1* (montante);
- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal do *riser 2* (jusante);
- há uma redução da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 2*.

Os valores de *A/D* obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.66, mostram que o *riser 1* foi excitado na direção longitudinal, já o *riser 2* foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela C.66- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio para o Modelo 2.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.3328	0.1174		
L2	0.3323	0.1164		
L3				
L4				
T1				0.2454
T2				0.2381
T3				0.2007

A Figura C.81 mostra que para o riser 2 há deslocamento predominantemente na direção transversal, aproximando-se a trajetória da forma conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

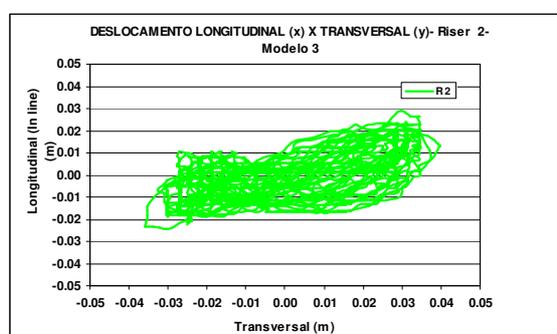


Figura C.81- Trajetória do Deslocamento Longitudinal x Transversal do Riser 2.

A Tabela C.67 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.67- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.05 \times 10^5$. (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	92.995	31.979	76.745	49.984
Médio	26.114	6.721	4.713	1.168
Desvio Padrão	32.572	9.008	32.850	25.782
Mínimo	-29.947	-18.102	-61.652	-48.176

A Tabela C.68 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.68- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 1.05 \times 10^5$. (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.080	0.278

C.2.2.2.4.3 Velocidade de 1.1 m/s

A Figura C.82 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 2.

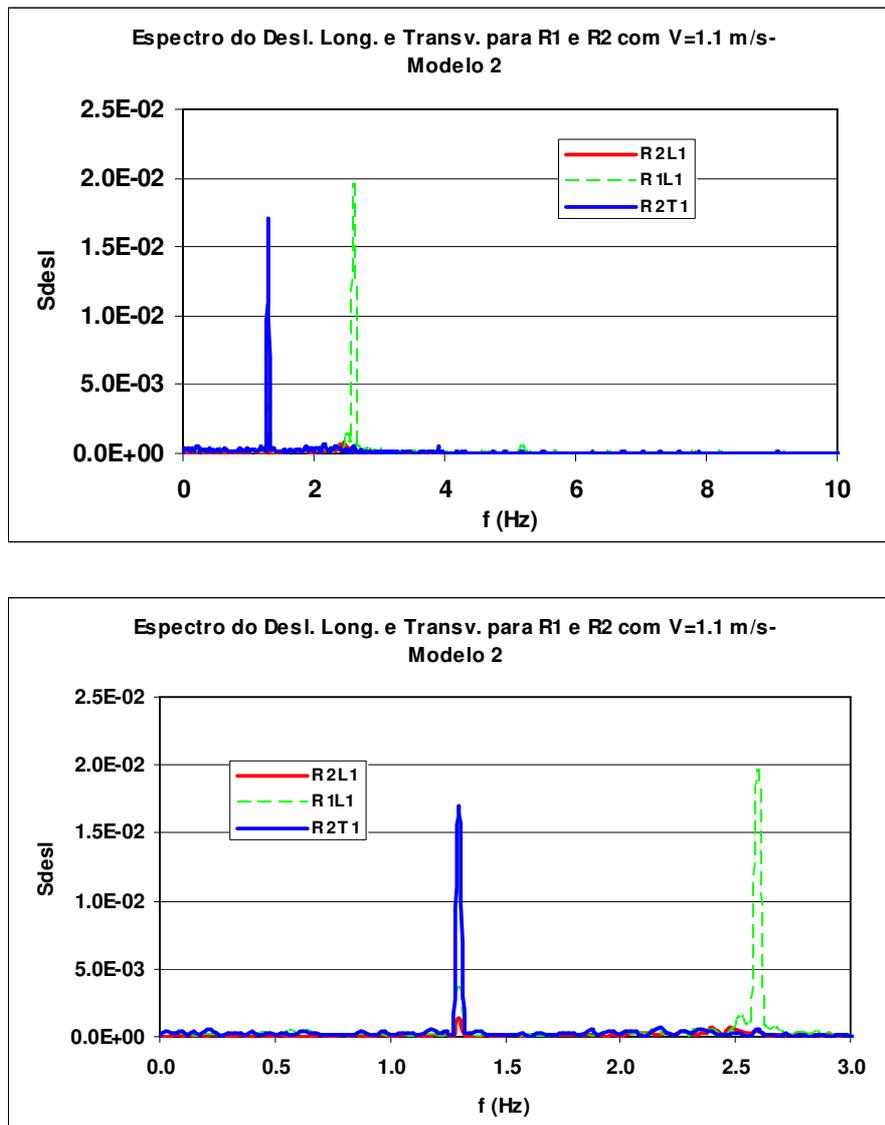


Figura C.82- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3Hz para o Modelo 2.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.6 Hz na direção longitudinal do *riser 1*; já na direção transversal o *riser 2* foi

excitado em uma frequência de 1.3Hz. A energia de excitação longitudinal do *riser 2* está bastante reduzida.

A Figura C.83 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.84 e C.85 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

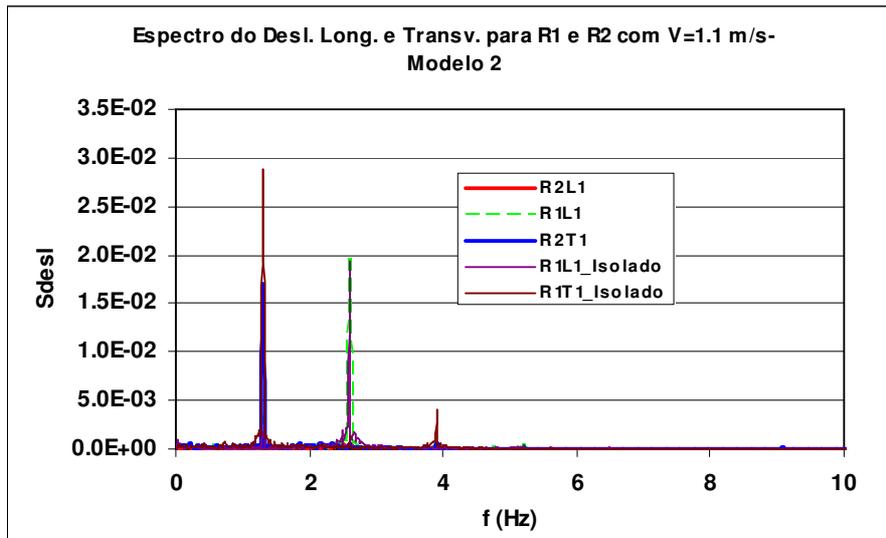


Figura C.83- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers 1 e 2* do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

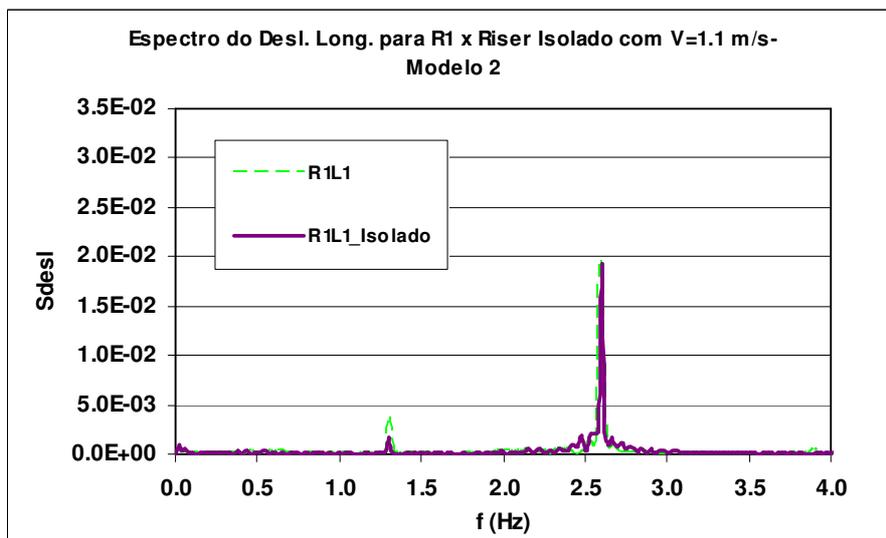


Figura C.84- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

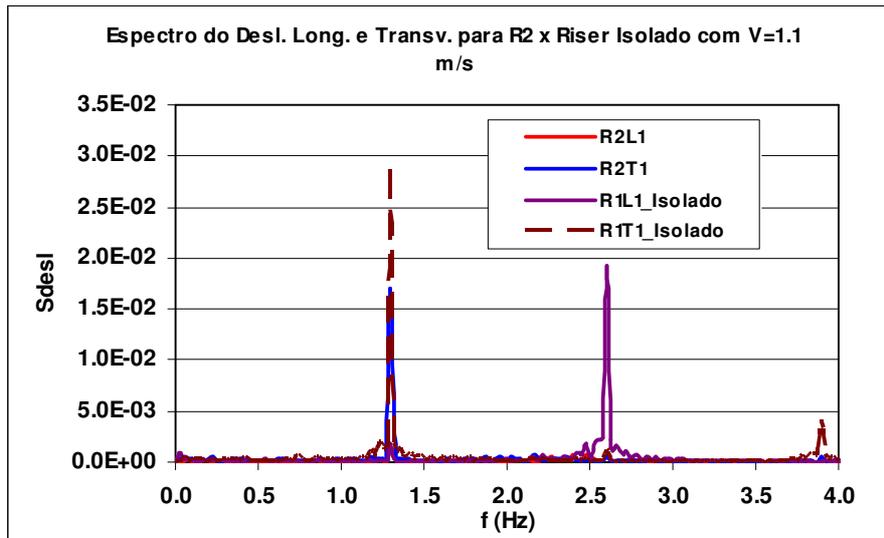


Figura C.85- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 2 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2, quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal para o *riser 2*;
- a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 1* é da mesma ordem de grandeza que a do *riser* isolado;
- a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 2* é reduzida. Isto nos mostra como o comportamento hidrodinâmico irá variar devido ao arranjo dos *risers*.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.69, mostram que o *riser 2* foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela C.69- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.3230	0.0420		
L2	0.3230	0.0410		
L3				
L4				
T1				0.2781
T2				0.2830
T3				0.2763

A Figura C.86 mostra que para o *riser 2* há deslocamento predominantemente na direção transversal obtendo-se uma trajetória achatada, aproximando-se da trajetória conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

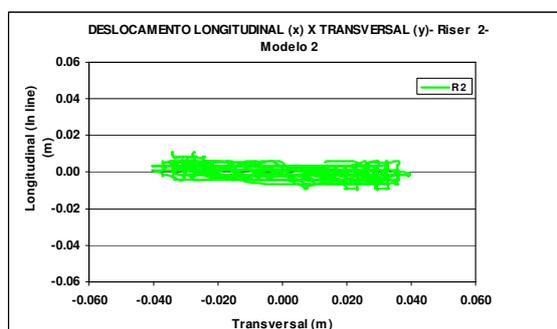


Figura C.86- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o *Riser 2*.

A Tabela C.70 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	117.128	25.334	90.072	58.750
Médio	41.078	8.617	-3.356	0.585
Desvio Padrão	38.520	4.157	53.364	32.292
Mínimo	-41.566	-2.907	-91.799	-55.273

Tabela C.70- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.07 \times 10^5$. (Modelo 2).

A Tabela C.71 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.71- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 1.07 \times 10^5$. (Modelo 2).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.256	0.263

C.2.2.2.4.4 Velocidade de 1.2 m/s

A Figura C.87 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

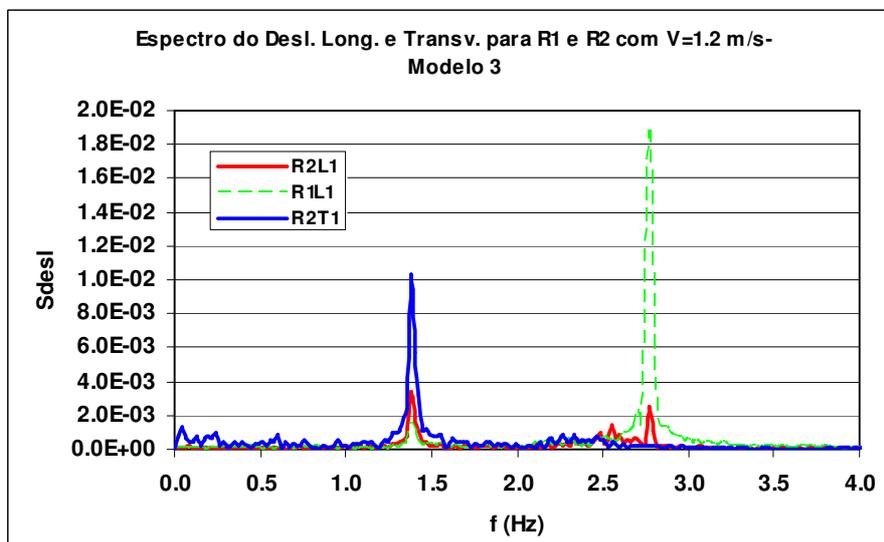
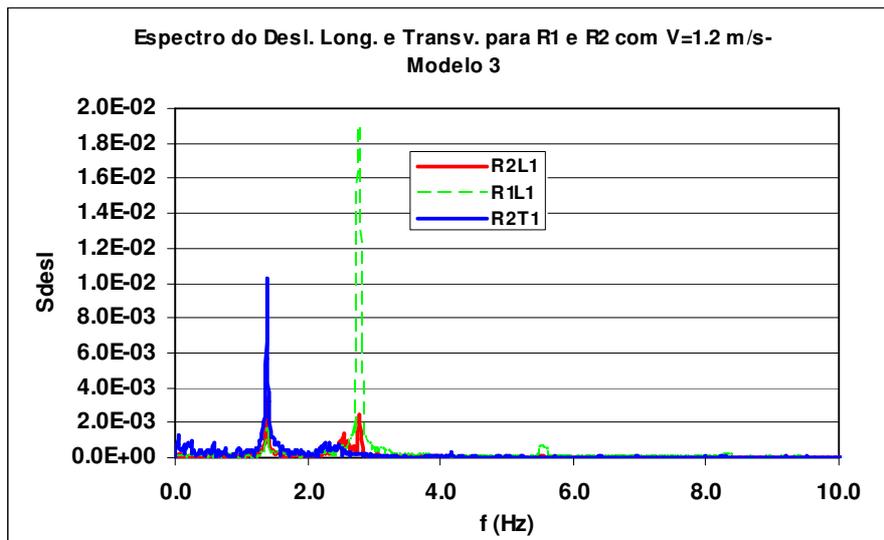


Figura C.87- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* para o Modelo 3 e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 4 Hz para o Modelo 3.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.8Hz na direção longitudinal para ambos os *risers*, sendo a energia de excitação do *riser 1* muito superior ao do *riser 2*. Na direção transversal, o *riser 2* foi excitado em uma frequência em torno de 1.4 Hz.

A Figura C.88 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 3D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.89 e C.90 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 3.5 Hz.

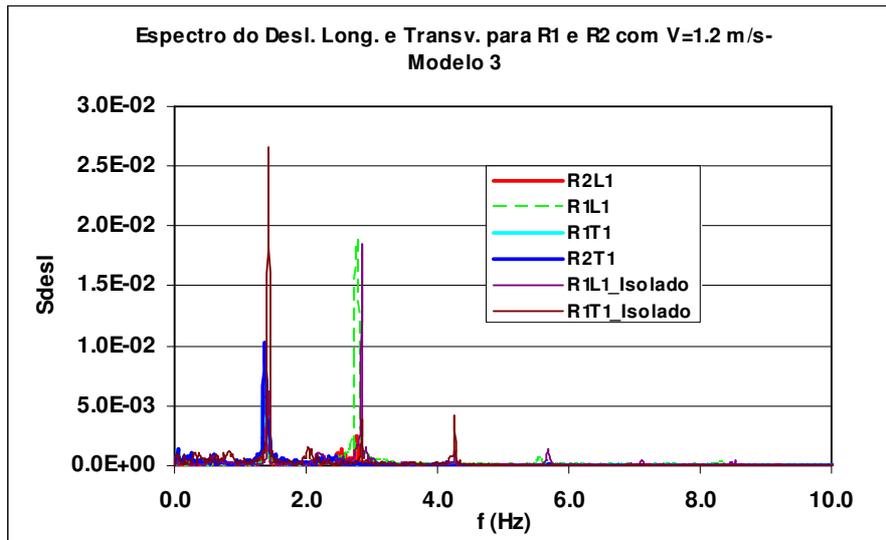


Figura C.88- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

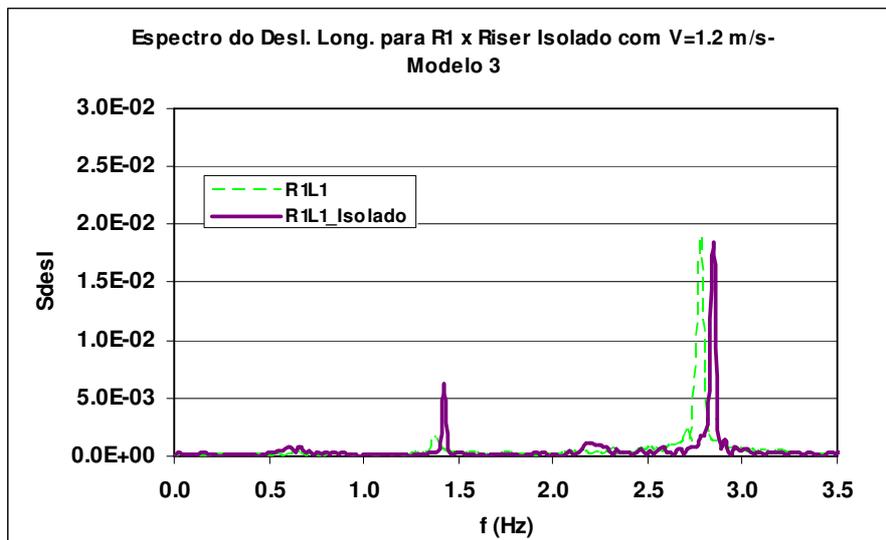


Figura C.89- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

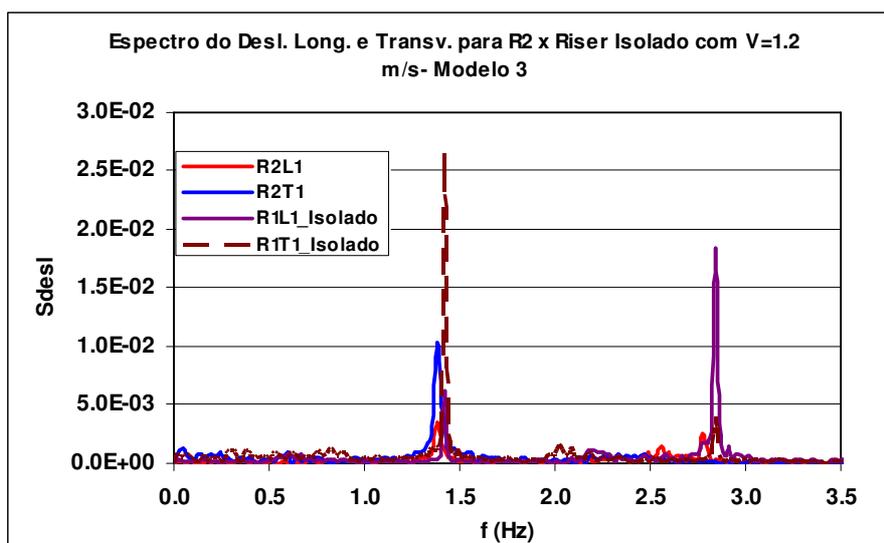


Figura C.90- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* do Modelo 3 com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico das frequências excitadas em ambas as direções;
- a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 1 é bastante similar a do *riser* isolado.
- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal para o *riser* 2;
- a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 2 está bastante reduzida.

Os valores de *A/D* obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.72, mostram que o *riser* 1 foi excitado na direção longitudinal, já o *riser* 2 foi excitado nas duas direções com predominância na direção transversal.

Tabela C.72- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.4013	0.1052		
L2	0.3997	0.1026		
L3				
L4				
T1				0.2404
T2				0.2310
T3				0.1944

A Figura C.91 mostra que o riser 2 desloca-se predominantemente na direção transversal. A trajetória de deslocamento do riser 2 é achatada, aproximando-se da figura conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

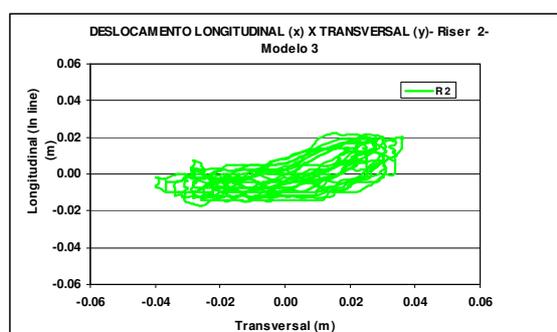


Figura C.91- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Riser 2.

A Tabela C.73 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.73- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.26 \times 10^5$. (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	107.812	39.891	70.376	58.776
Médio	34.854	14.793	-3.363	0.675
Desvio Padrão	35.024	7.138	47.963	29.775
Mínimo	-22.911	-8.640	-87.235	-52.994

A Tabela C.74 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.74- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 1.26 \times 10^5$. (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.000	0.425

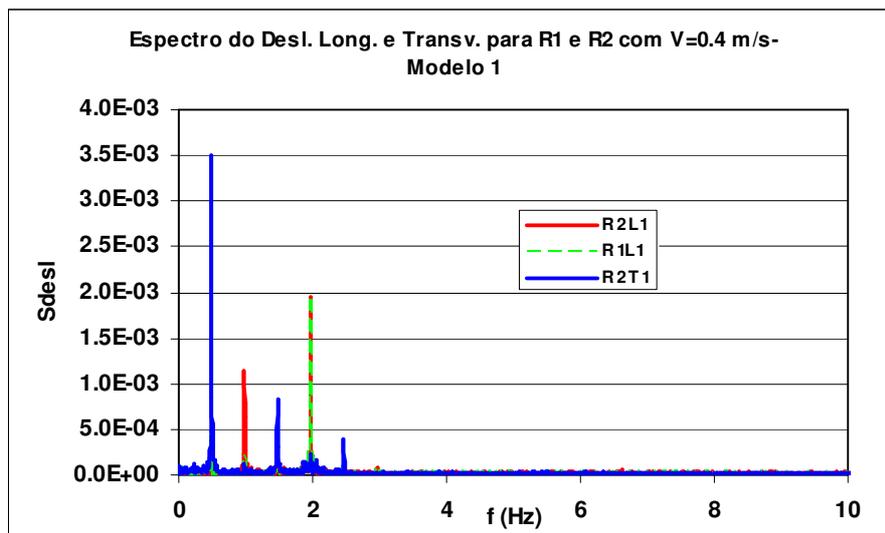
C.2.2.3 Espaçamento 4D

A seguir estão apresentados os seguintes resultados:

Modelo 1, com velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

C.2.2.3.1 Velocidade de 0.4 m/s

A Figura C.92 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.



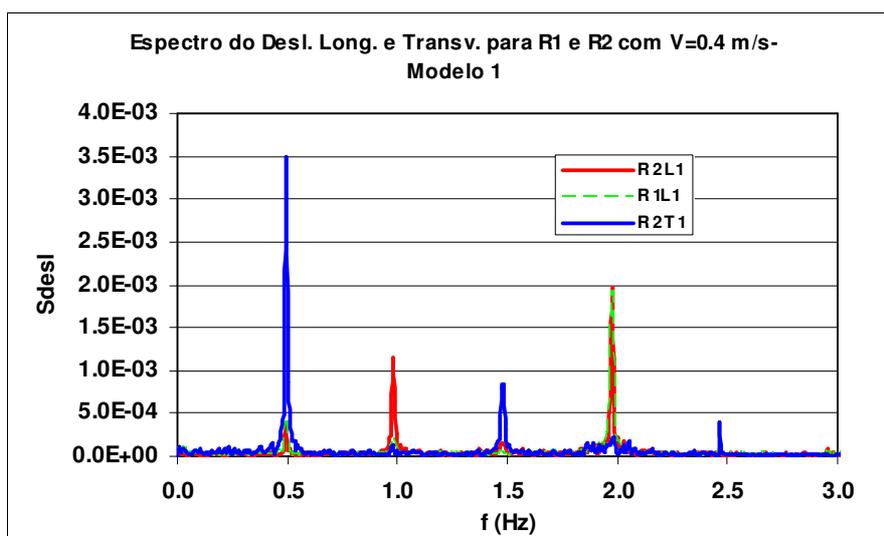


Figura C.92 - Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz..

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2Hz na direção longitudinal do *riser 1*(Curva verde tracejada) e do *riser 2* (Curva vermelha), estando este valor bem próximo da frequência natural do modelo. Pode-se, ainda, observar que há excitação de uma frequência de 0.5 Hz com grande energia na direção transversal do *riser 2* (Curva azul). Pode-se, também, observar que há um harmônico em uma frequência em torno de 1 Hz na direção longitudinal do *riser 2*. Também há dois harmônicos, o primeiro na frequência em torno de 1.5Hz e o segundo na frequência de 2.5 na direção transversal do *riser 2*.

A Figura C.93, apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 4D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.94 e C.95 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

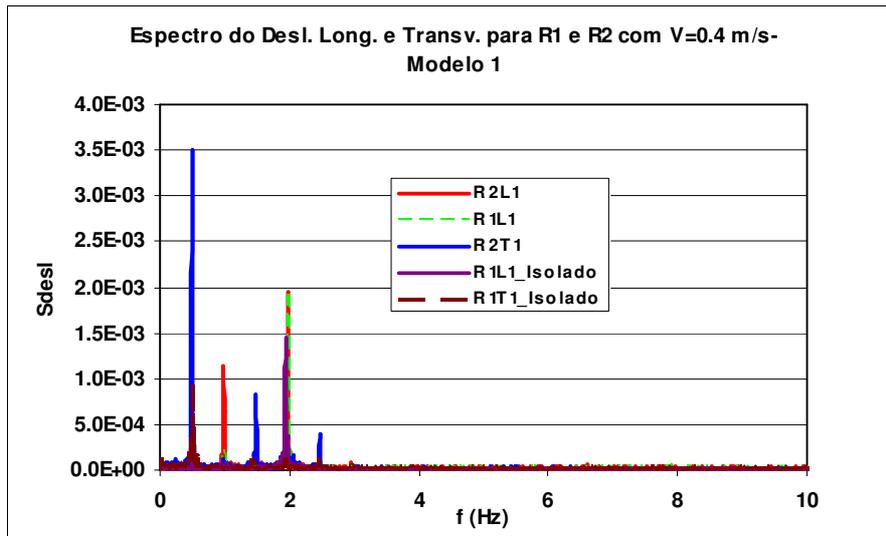


Figura C.93- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

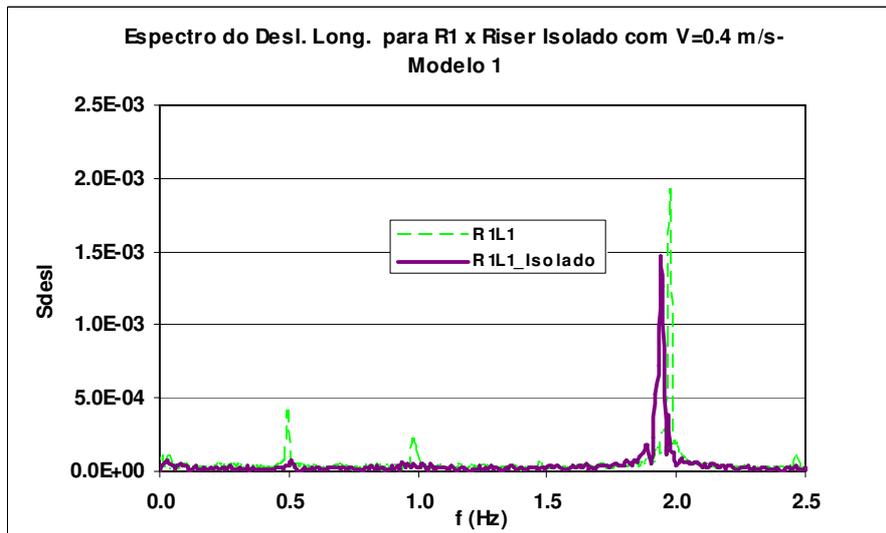


Figura C.94- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

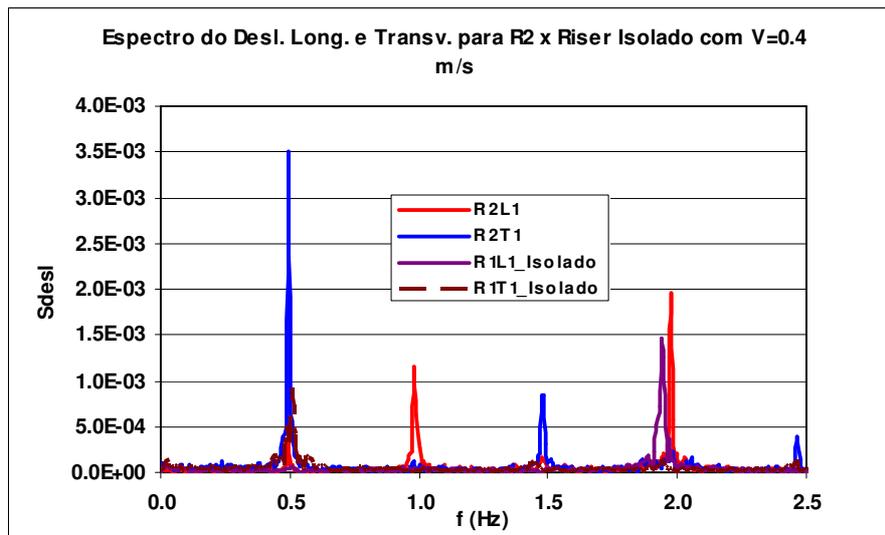


Figura C.95- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao riser isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada para os *risers* na direção longitudinal e transversal do *riser 2* no arranjo espaçado de 4D;
- há um aumento da energia das vibrações na direção transversal do *riser 2*;
- há um pequeno aumento da energia das vibrações na direção longitudinal para ambos os *risers*.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 1, apresentados na Tabela C.75, mostram que os *risers* foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.75- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.041	0.047		
L2	0.041	N.D		
L3				
L4				
T1				0.067
T2				0.067
T3				0.049

A Tabela C.76 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.76- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 3.88 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	14.625	10.091	7.516	10.667
Médio	5.977	1.583	0.412	0.042
Desvio Padrão	3.550	3.705	3.726	4.288
Mínimo	-2.374	-7.284	-6.814	-8.438

A Tabela C.77 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.77- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 3.88 \times 10^4$. (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.382	0.366

C.2.2.3.2 Velocidade de 0.6 m/s

A Figura C.96 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.

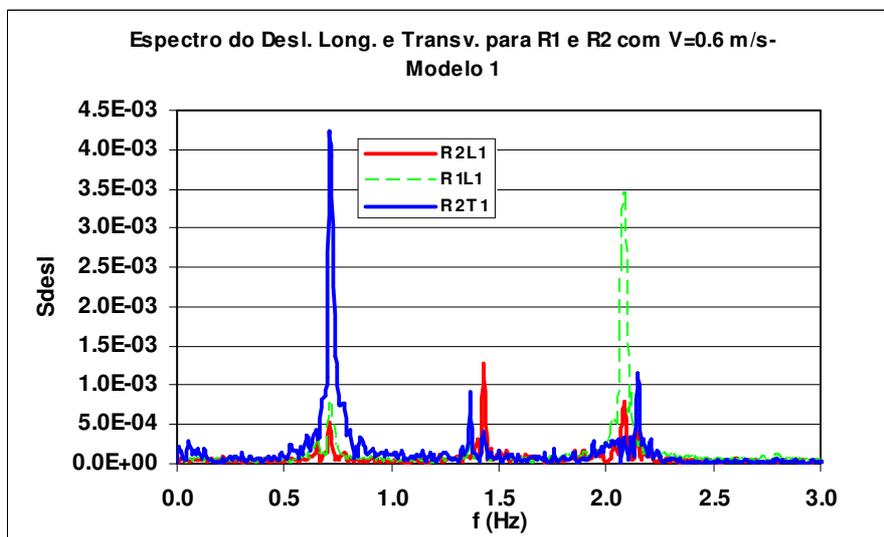
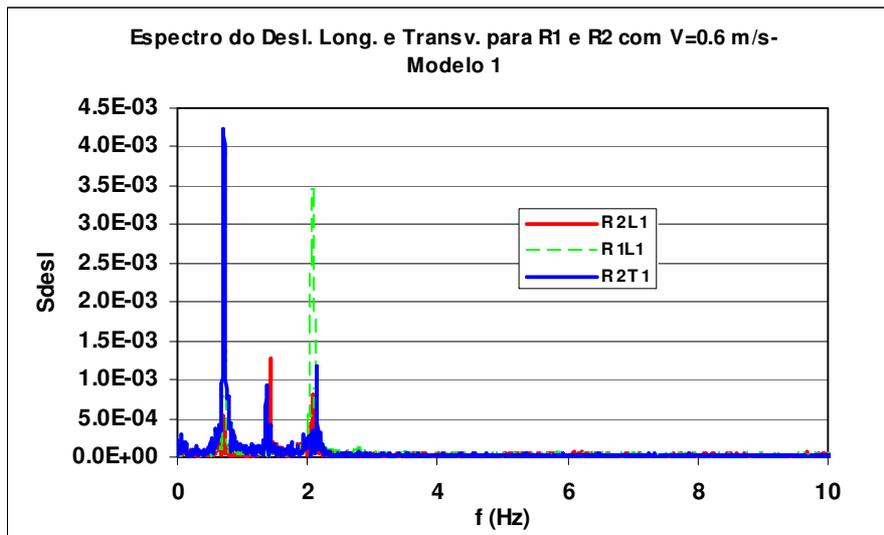


Figura C.96- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1 e 2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1 e 2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.1 Hz na direção longitudinal do *riser 1*, com considerável energia quando comparada a energia de excitação longitudinal do *riser 2*. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal há uma considerável energia de excitação para o *riser 2*, na frequência de aproximadamente 0.71Hz.

A Figura C.97 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 4D com um *riser* isolado. Nas Figuras D.98 e

D.99 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

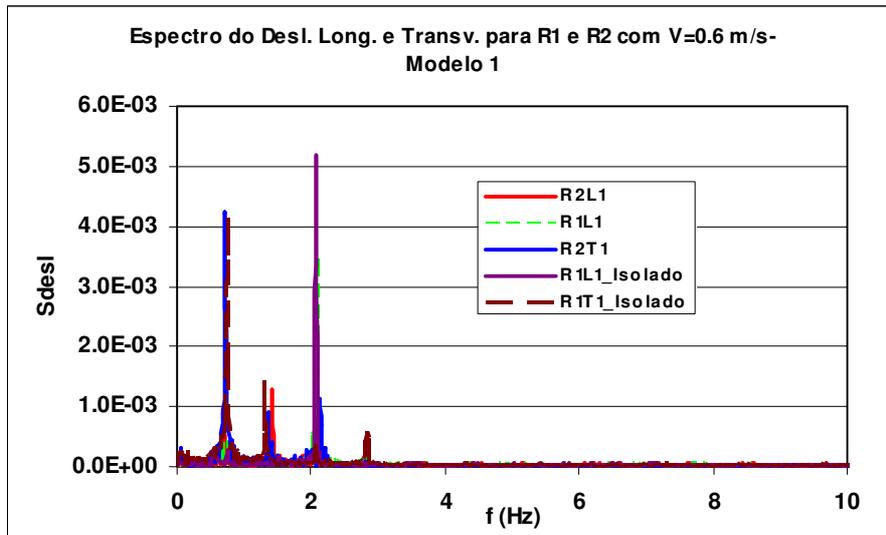


Figura C.97- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

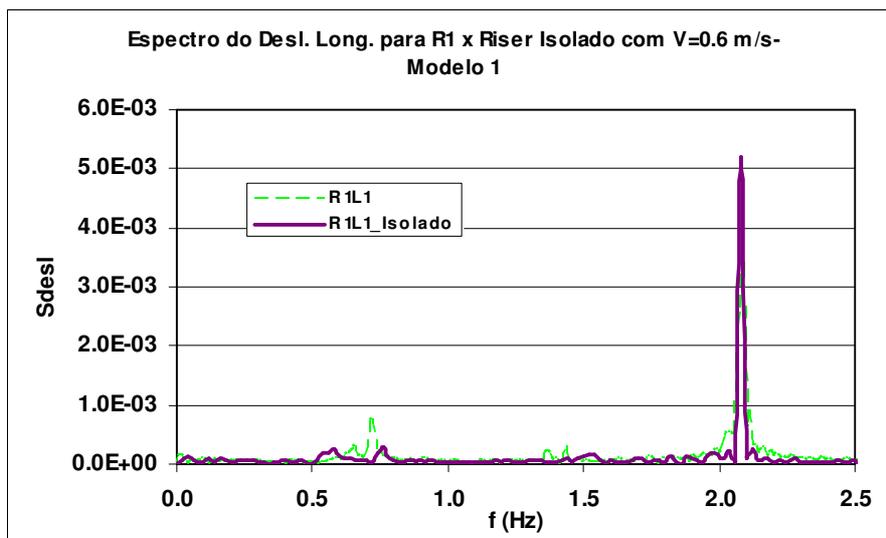


Figura C.98- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

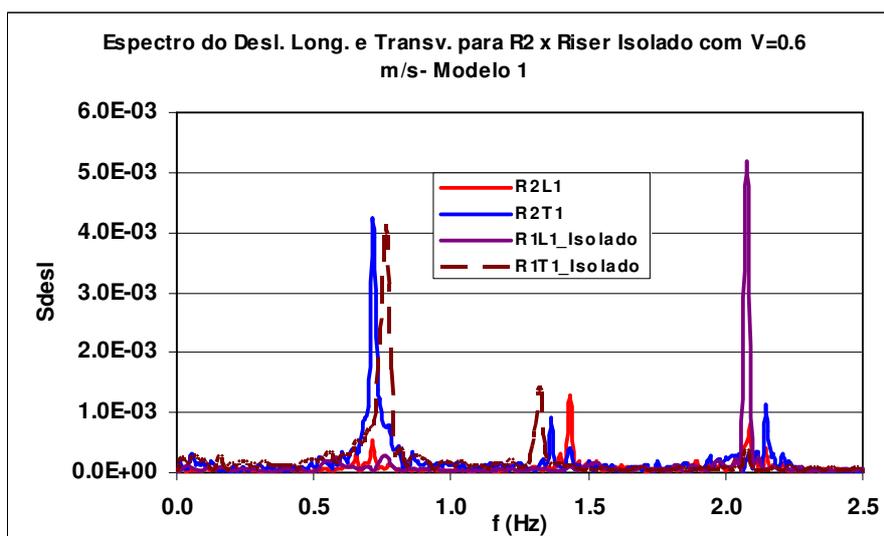


Figura C.99- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada na direção transversal do *riser 2*.
- há uma pequena redução da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 1*;
- a energia das vibrações na direção transversal do *riser 2* é similar ao do *riser* isolado;
- há uma redução da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 2*.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 1, apresentados na Tabela C.78 mostram que os *risers* foram excitados em ambas às direções com baixa energia; os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.78- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.084	0.038		
L2	0.083	0.041		
L3				
L4				
T1				0.113
T2				0.110
T3				0.091

A Tabela C.79 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.79- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 5.9 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	28.826	11.661	16.020	17.383
Médio	12.162	3.395	0.246	0.247
Desvio Padrão	7.309	2.783	7.333	6.945
Mínimo	-4.139	-4.668	-15.446	-15.406

A Tabela C.80 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.80- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 5.9 \times 10^4$. (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.250	0.349

C.2.2.3.3 Velocidade de 0.8 m/s

A Figura C.100 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.

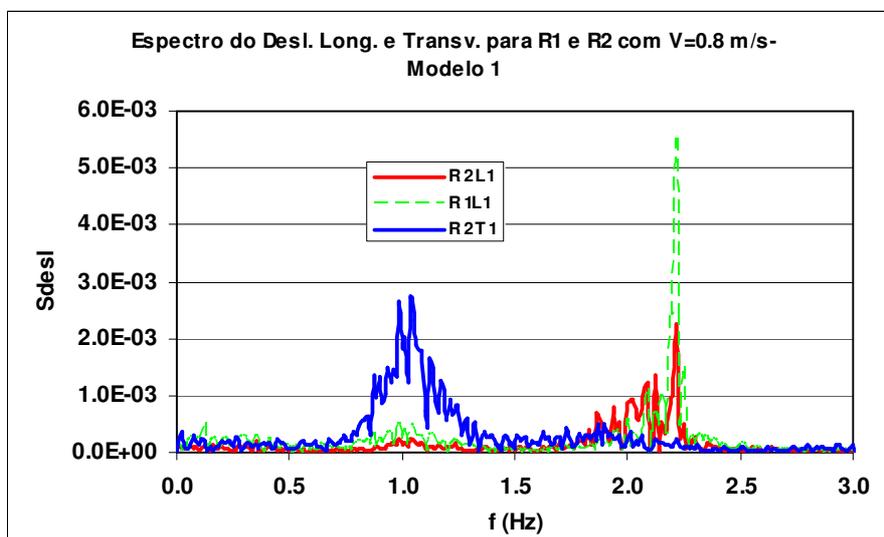
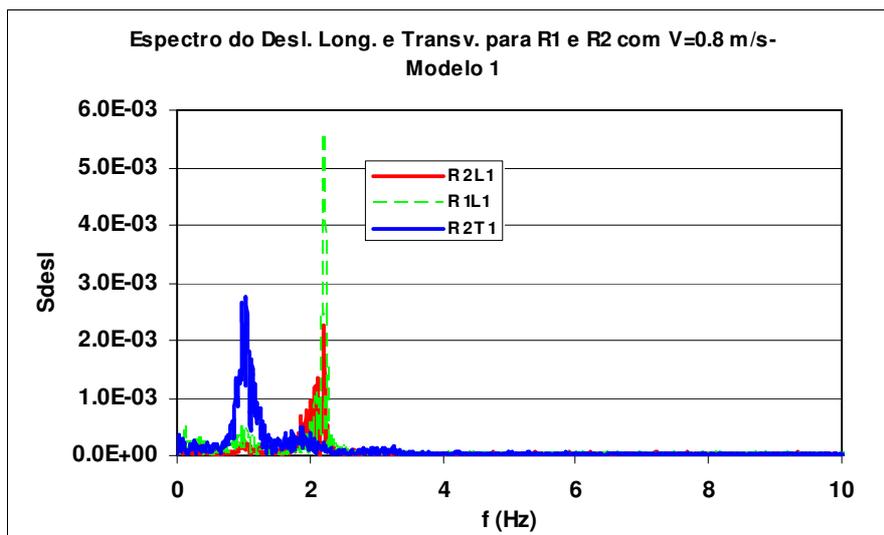


Figura C.100- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Frequência de 0 a 3 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.2Hz na direção longitudinal do *riser 1* com uma grande energia, já na direção longitudinal do *riser 2* foram excitadas várias frequências com uma distribuição da energia de excitação nestas frequências. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal o *riser 2* foi excitado em uma larga faixa de frequências, compreendida entre 0.6 e 1.5Hz.

A Figura C.101 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 4D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.102 e C.103 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

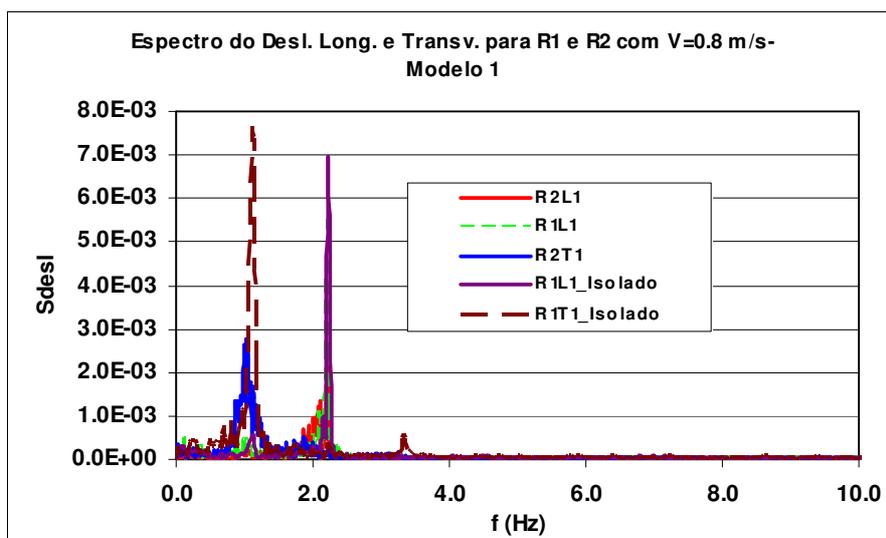


Figura C.101 Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

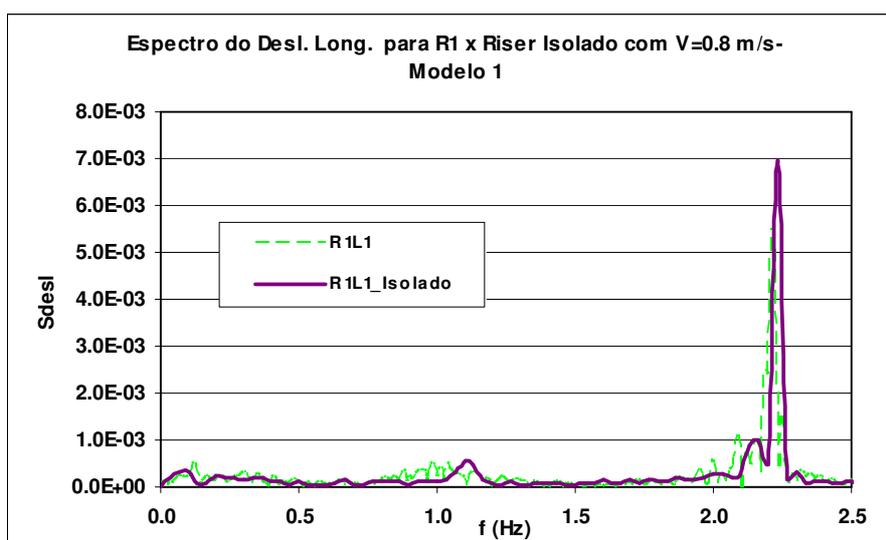


Figura C.102- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

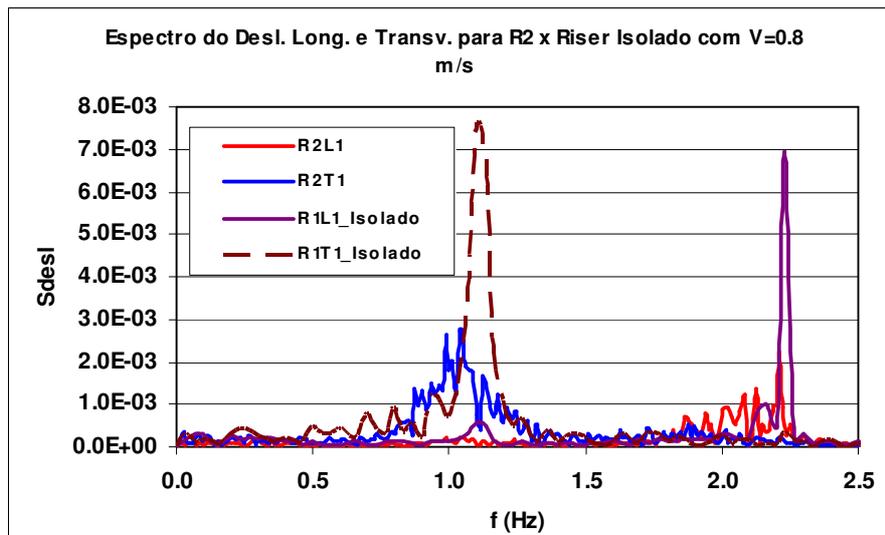


Figura C.103- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- a resposta estrutural em função das cargas hidrodinâmicas para os *risers* alinhados e espaçados de $4D$ é completamente diferente de um *riser* isolado. Conforme, pode-se observar na Figura C.103, o *riser 2* em ambas as direções a energia de vibração será distribuída em uma larga faixa de frequências; o *riser 1* na direção longitudinal irá responder em uma frequência similar ao *riser* isolado. Esta é uma importante constatação que mostra como o efeito hidrodinâmico gerado pelo esteira do *riser* de montante afeta o comportamento hidrodinâmico do *riser* de jusante.
- comportamento similar foi observado para o modelo 1 espaçado de $3D$ e submetido à mesma velocidade.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.81, mostram que o *riser 1* foi excitado na direção longitudinal, já o *riser 2* foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela C.81 - Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.129	0.076		
L2	0.1264	0.078		
L3				
L4				
T1				0.138
T2				0.136
T3				0.124

A Figura C.104 mostra que a trajetória do riser 2 se aproxima da figura denominada na literatura como *banana-shaped* [27].

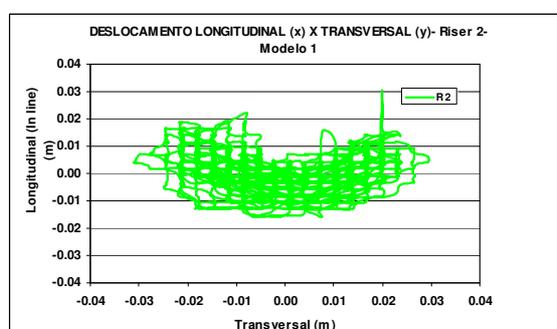


Figura C.104- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinais x Transversais do Riser 2.

A Tabela C.82 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.82- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 7.8 \times 10^4$ (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	47.212	24.502	32.454	27.872
Médio	-21.766	5.086	0.218	0.259
Desvio Padrão	11.282	6.518	13.021	11.362
Mínimo	-4.331	-11.119	-29.464	-26.320

A Tabela C.83 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.83- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 7.8 \times 10^4$. (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.258	0.294

C.2.2.4 Espaçamento 5D

A seguir estão apresentados os seguintes resultados:

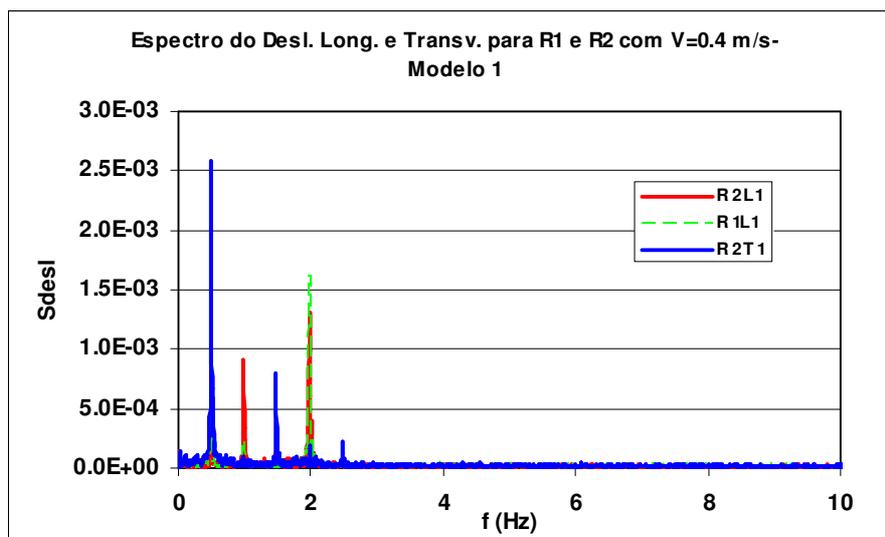
Modelo 1, com velocidades de 0.4, 0.6 e 0.8 m/s.

Modelo 3, com velocidades de 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 m/s.

C.2.2.4.1 Velocidade de 0.4 m/s

C.2.2.4.1.1 Modelo 1

A Figura C.105 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.



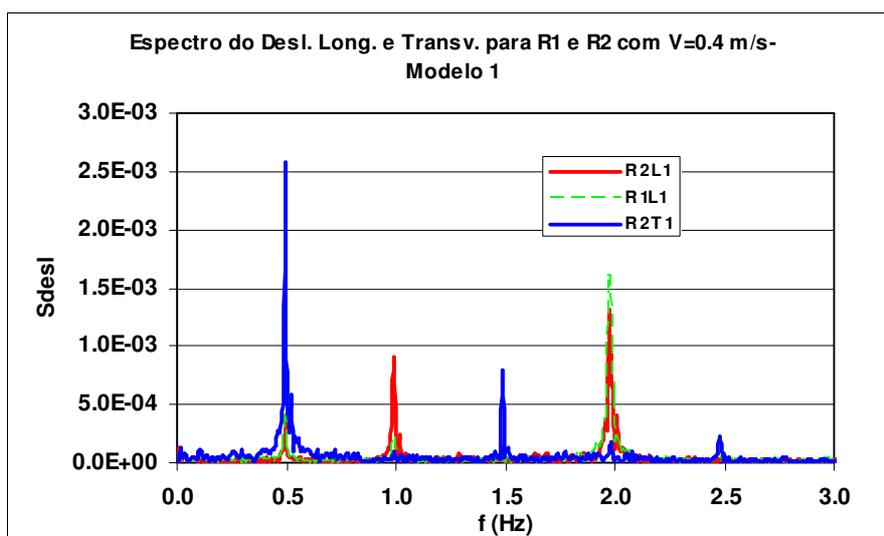


Figura C.105 - Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 3 Hz.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2Hz na direção longitudinal de ambos os *risers* (Curvas verde tracejada- R1L1 e vermelha- R2L1) com energia bastante similar, estando este valor bem próximo da frequência natural do modelo 1, que é igual 1.85 Hz. É importante salientar, que comportamento similar foi obtido para um espaçamento de 4D.

Pode-se, ainda, observar que há excitação de uma frequência de 0.5 Hz com grande energia na direção transversal do *riser 2* (Curva azul- R2T1). Pode-se, ainda, observar que há um harmônico em uma frequência em torno de 1Hz na direção longitudinal do *riser 2*. Também há dois harmônicos na direção transversal do *riser 2*, o primeiro deles na frequência de 1.5 Hz e o segundo, bastante reduzido, na frequência de 2.5 Hz.

A Figura C.106 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados e espaçados de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.107 e C.108 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x *Riser* isolado e R2 x *Riser* isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

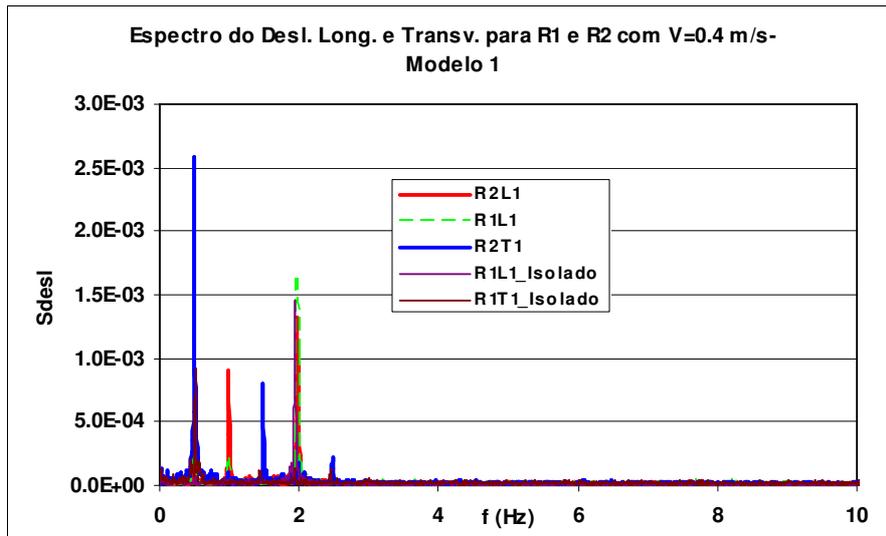


Figura C.106- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

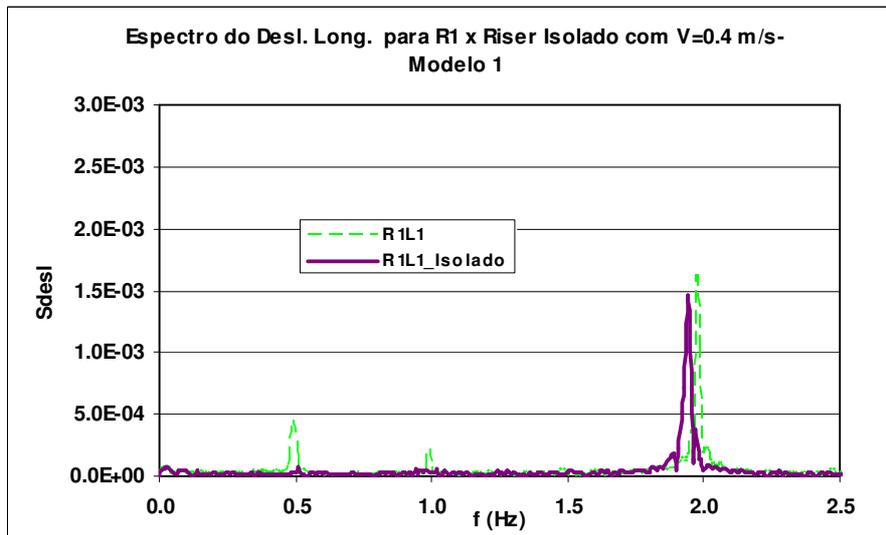


Figura C.107- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

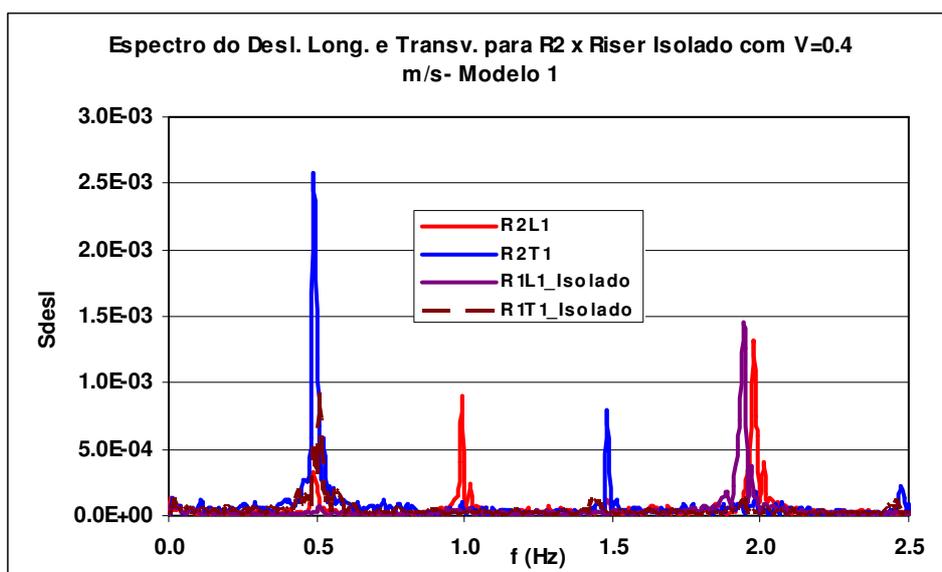


Figura C.108- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao riser isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada para o *riser* 1 na direção longitudinal no arranjo espaçado de 5D, quando comparado ao *riser* isolado. Esta situação ocorreu também no arranjo espaçado de 4D;
- há um pequeno aumento da energia de vibração na direção longitudinal do *riser* 1. Esta situação ocorreu também no arranjo espaçado de 4D;
- há um aumento da energia da vibração na direção transversal do *riser* 2 (Curva azul) quando comparado ao *riser* isolado, como está mostrado na Figura C.108. Esta situação ocorreu também no arranjo espaçado de 4D;
- há um pequeno aumento da energia de vibração na direção longitudinal do *riser* 2, quando comparado ao *riser* isolado e há na direção longitudinal a excitação de um harmônico, na frequência de aproximadamente 1Hz, que não havia para o *riser* isolado. Esta situação ocorreu também no arranjo espaçado de 4D.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers* do modelo 1, apresentados na Tabela C.84, mostram que os *risers* foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de

escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como *lock-in*.

Tabela C.84- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.038	0.037		
L2	0.038	0.038		
L3				
L4				
T1				0.055
T2				0.055
T3				0.037

A Tabela C.85 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.85- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 3.98 \times 10^4$. (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	14.216	8.398	6.079	10.379
Médio	7.391	0.930	-1.459	0.099
Desvio Padrão	3.397	2.827	3.575	3.827
Mínimo	-0.557	-7.582	-10.580	-8.944

A Tabela C.86 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.86- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 3.98 \times 10^4$. (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.709	0.215

C.2.2.4.1.2 Modelo 3

A Figura C.108 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o *riser* de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os *risers* (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

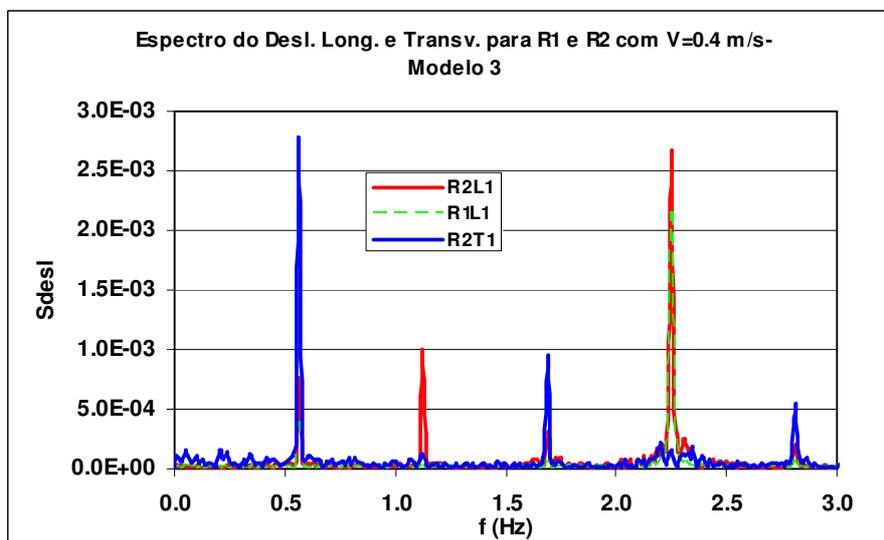
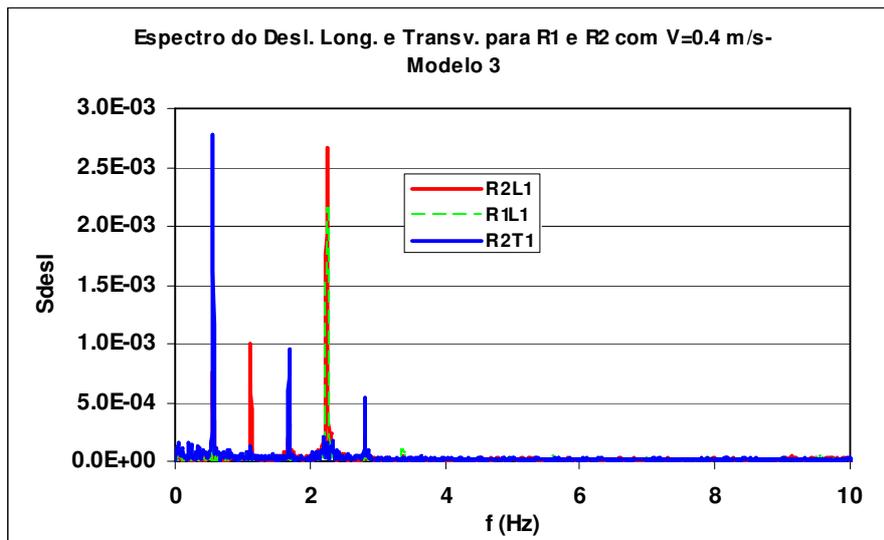


Figura C.108 - Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequências de 0 a 3 Hz.

Analisando o espectro dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.25 Hz na direção longitudinal do *riser 1* (Curva verde tracejada- R1L1) e do *riser 2* (Curva vermelha- R2L1) com energia bastante similar, estando este valor bem próximo da frequência natural do modelo 1, que é igual 2.31 Hz. É importante salientar que comportamento similar foi obtido para um espaçamento de 4D.

Pode-se, ainda, observar que há excitação de uma frequência em torno de 0.56 Hz, com grande energia na direção transversal do *riser 2* (Curva azul- R2T1). Pode-se, também, observar que há um harmônico em uma frequência em torno de 1.13 Hz na

direção longitudinal do *riser* 2. Também há dois harmônicos na direção transversal do *riser* 2, o primeiro deles na frequência de 1.7 Hz e o segundo, bastante reduzido, na frequência de 2.8 Hz.

A Figura C.109 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.110 e C.111 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

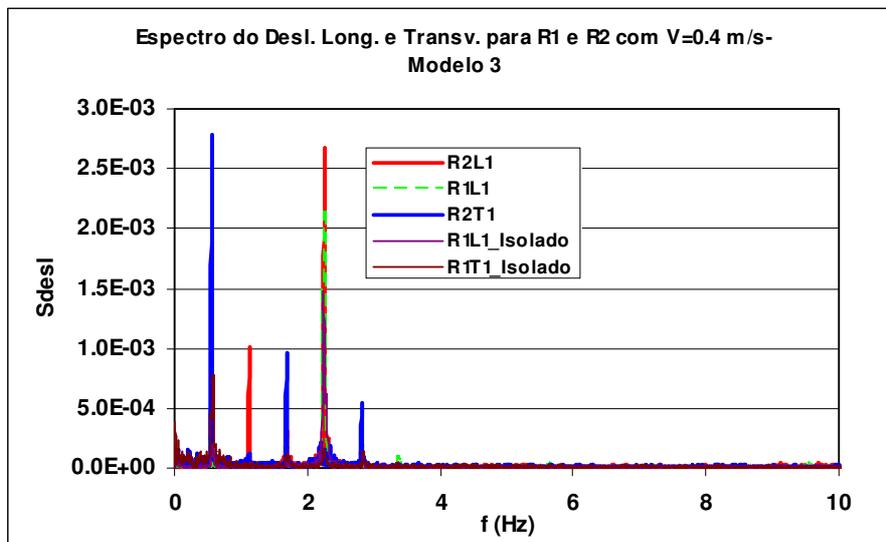


Figura C.109- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

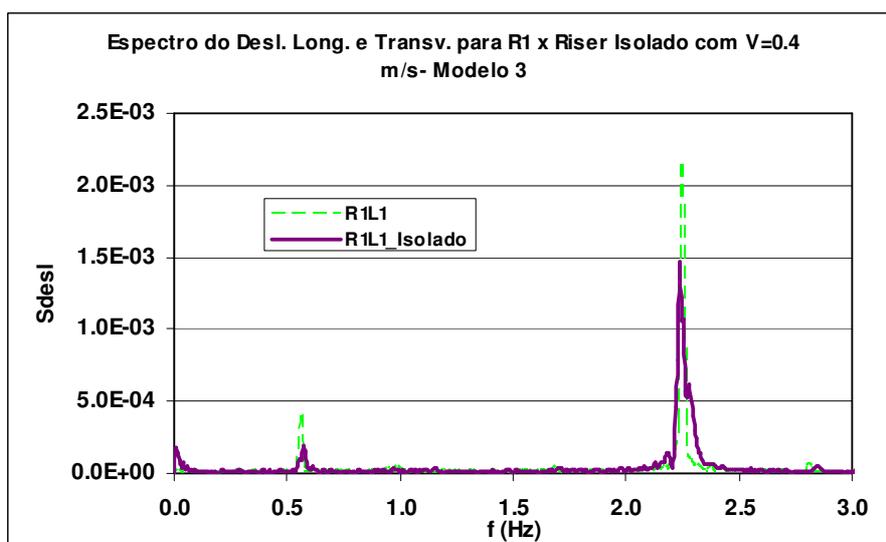


Figura C.110- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

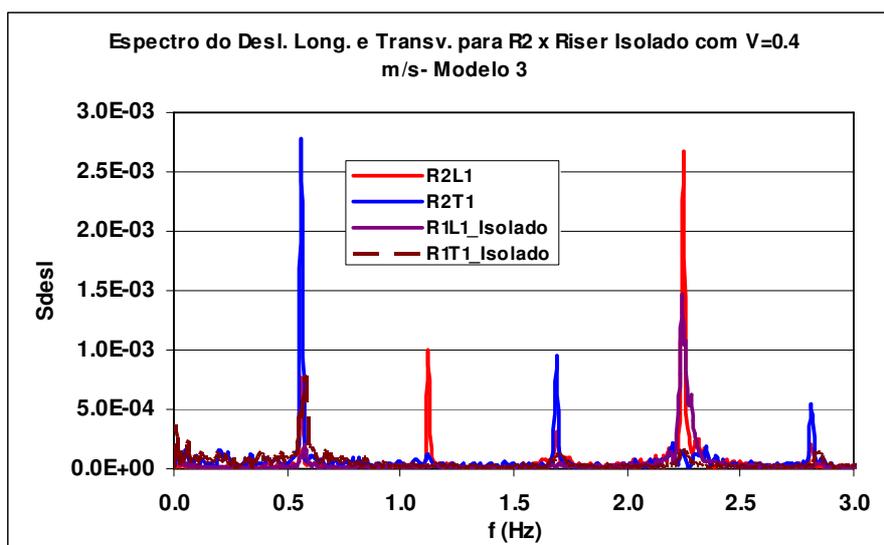


Figura C.111- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao riser isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada para o *riser 2* na direção transversal no arranjo espaçado de 5D;
- na direção longitudinal do riser 1, a frequência de resposta coincidiu com a do *riser* isolado;
- há uma amplificação expressiva da energia das vibrações na direção transversal do *riser 1* quando comparado ao *riser* isolado;
- há um aumento da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 1*, quando comparado ao *riser* isolado;
- há um aumento da energia das vibrações na direção transversal do *riser 2* (Curva azul), quando comparado ao *riser* isolado;
- há um aumento da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser 2*, quando comparado ao *riser* isolado e há na direção longitudinal a excitação de um harmônico, na frequência de aproximadamente 1Hz, que não havia para o *riser* isolado;
- é importante salientar, que as observações acima, também, ocorreram no arranjo espaçado de 4D e no modelo 1 apresentado no item anterior;

Os valores de A/D obtidos para os dois risers do modelo 1, apresentados na Tabela C.87, mostram que os risers foram excitados na direção longitudinal com baixa

energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o riser 2 na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como lock-in.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.0415	0.0569		
L2	0.0415	0.0553		
L3				
L4				
T1				0.0562
T2				0.0535
T3				0.0448

Tabela C.87- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

A Tabela C.88 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.88- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 4.19 \times 10^4$. (Modelo 3).

	F_x (kgf)		F_y (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	12.439	11.143	7.473	11.694
Médio	5.077	0.208	-0.312	0.167
Desvio Padrão	3.849	4.454	3.629	4.876
Mínimo	-10.800	-2.605	-6.808	-10.817

A Tabela C.89 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.89- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 4.19 \times 10^4$. (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.312	0.054

C.2.2.4.2 Velocidade de 0.6 m/s

C.2.2.4.2.1 Modelo 1

A Figura C.112 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 1.

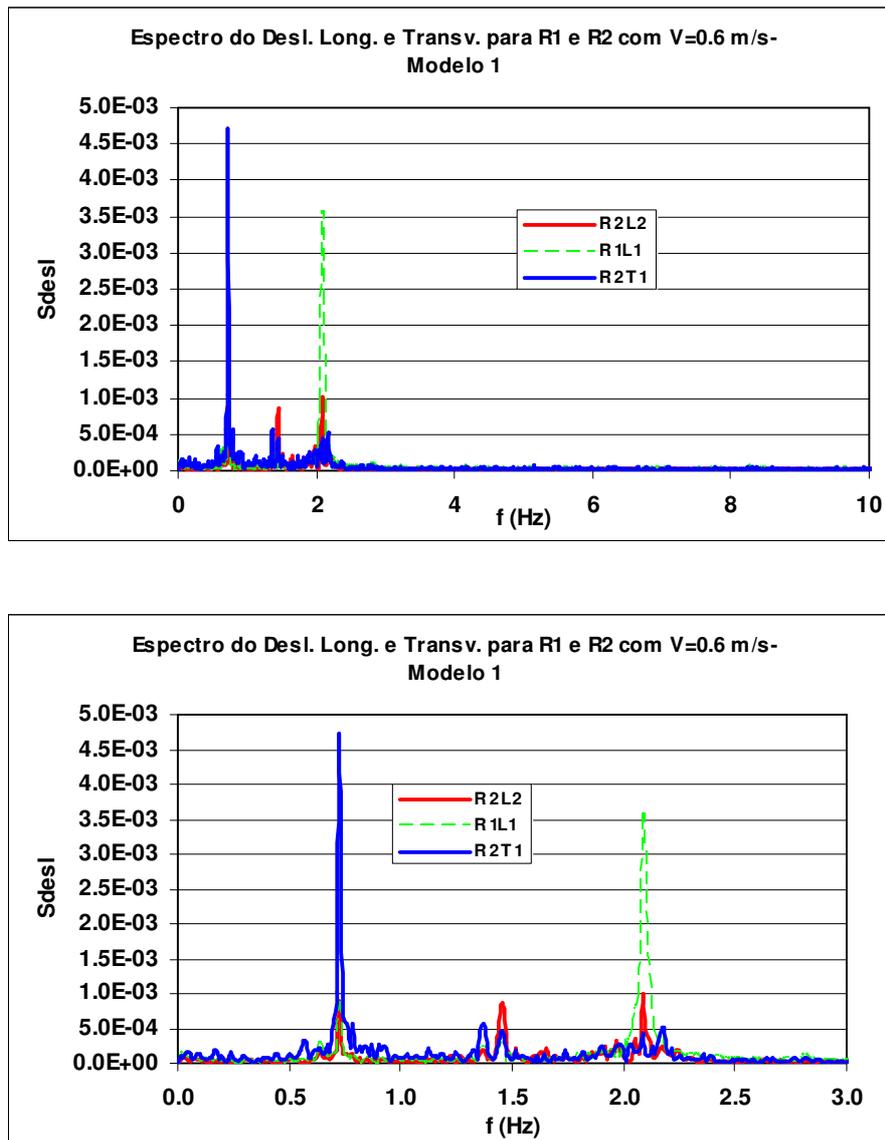


Figura C.112- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhes nas Faixas de Freqüências de 0 a 3 Hz, 0 a 1 Hz e 1.8 a 2.5 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma freqüência em torno de 2.1Hz na direção longitudinal do *riser 1*, este deslocamento longitudinal do *riser 1* apresenta considerável energia quando comparada a energia de excitação longitudinal

do riser 2. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal há uma considerável energia de excitação para o *riser* 2 na frequência de aproximadamente 0.73 Hz. É importante salientar que este comportamento também foi observado no arranjo espaçado de 4D.

A Figura C.113 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.114 e C.115, estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

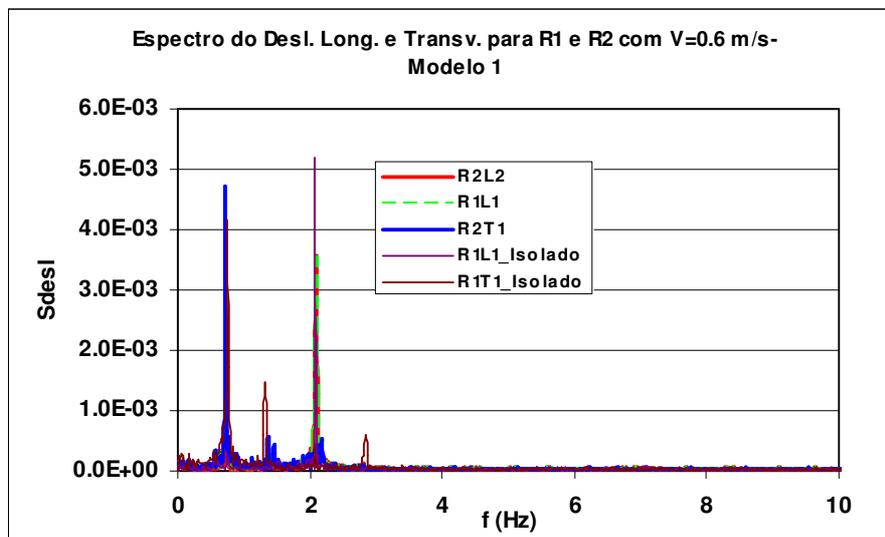


Figura C.113- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

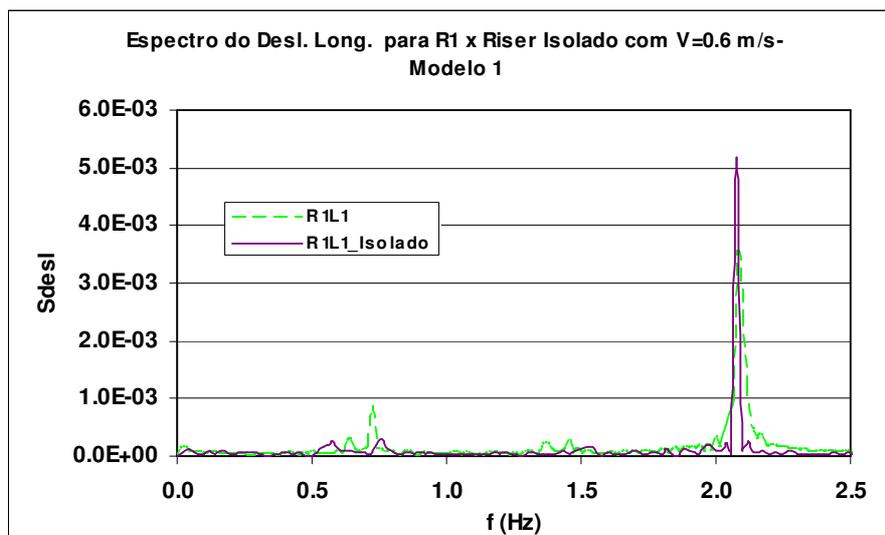


Figura C.114- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

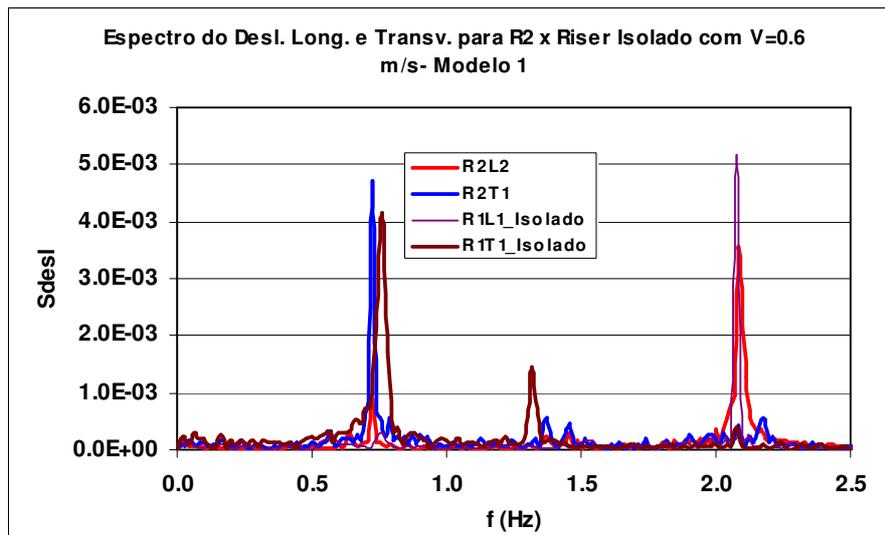


Figura C.115- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada na direção transversal do *riser 2*. É importante salientar que este comportamento também foi observado para um arranjo espaçado de 4D;
- há uma redução da energia de vibração na direção longitudinal do *riser 2*, quando comparado ao *riser* isolado. Contudo, esta diminuição não é tão expressiva como observada para o arranjo espaçado de 4D.

Os valores de A/D obtidos para os dois risers do modelo 1, apresentados na Tabela C.90, mostram que os risers foram excitados na direção longitudinal com baixa energia, já que os valores de amplitude obtidos são pequenos, mostrando que houve excitação de vibrações induzidas por vórtices para este arranjo e velocidade de escoamento, contudo para o *riser 2* na direção transversal as vibrações ficaram afastadas da condição conhecida na literatura como lock-in.

Tabela C.90- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.083	0.032		
L2	0.082	0.035		
L3				
L4				
T1				0.085
T2				0.084
T3				0.067

A Tabela C.91 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.91- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 5.81 \times 10^4$. (Modelo 1).

	F_x (kgf)		F_y (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	28.463	9.952	14.569	13.673
Médio	12.808	2.327	-1.203	-0.227
Desvio Padrão	7.573	2.516	7.276	6.067
Mínimo	-2.256	-5.679	-16.658	-14.902

A Tabela C.92 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.92- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 5.81 \times 10^4$. (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.316	0.239

C.2.2.4.2.2 Modelo 3

A Figura C.116 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

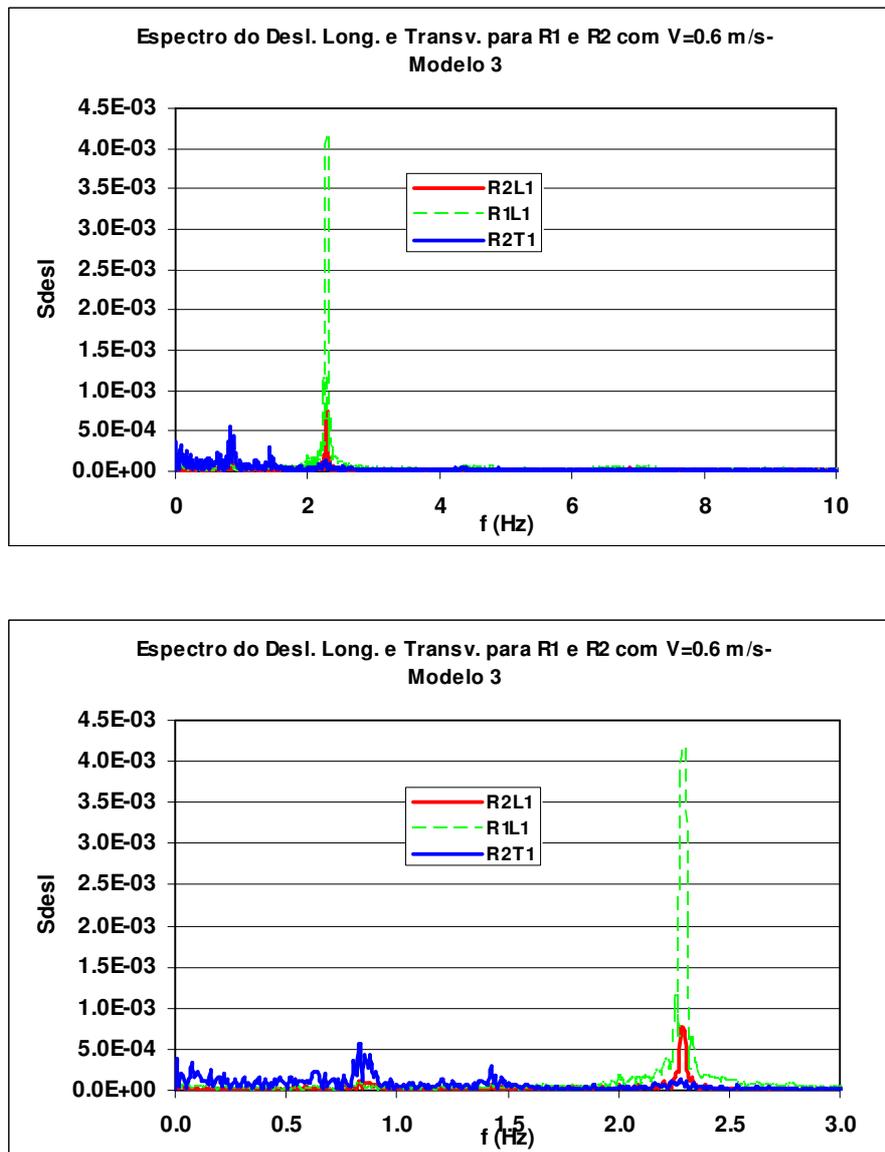


Figura C.116- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Freqüência de 0 a 3 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma freqüência em torno de 2.3 Hz na direção longitudinal do *riser 1* com predominância de energia, nesta mesma freqüência há uma pequena energia na direção longitudinal do *riser 2* e na direção transversal há uma pequena energia na freqüência de 0.8 Hz.

A Figura C.117 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.118 e C.119 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

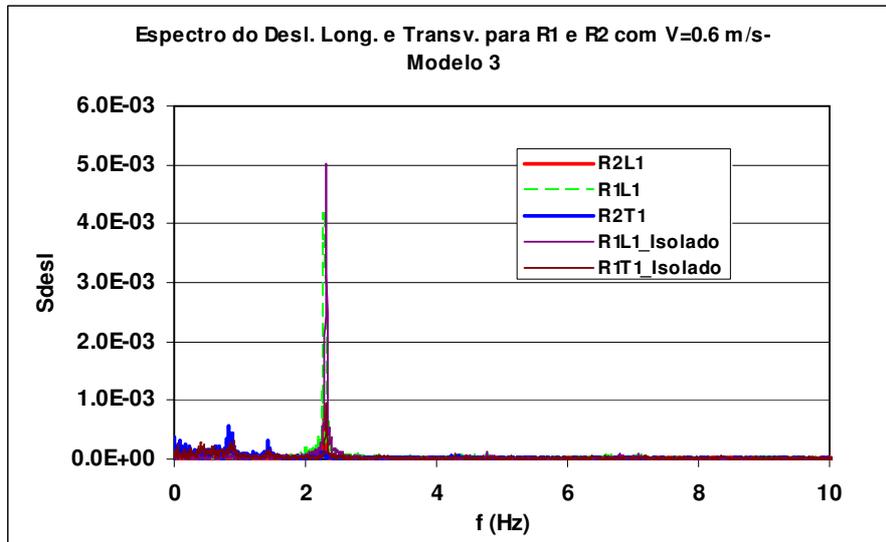


Figura C.117- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

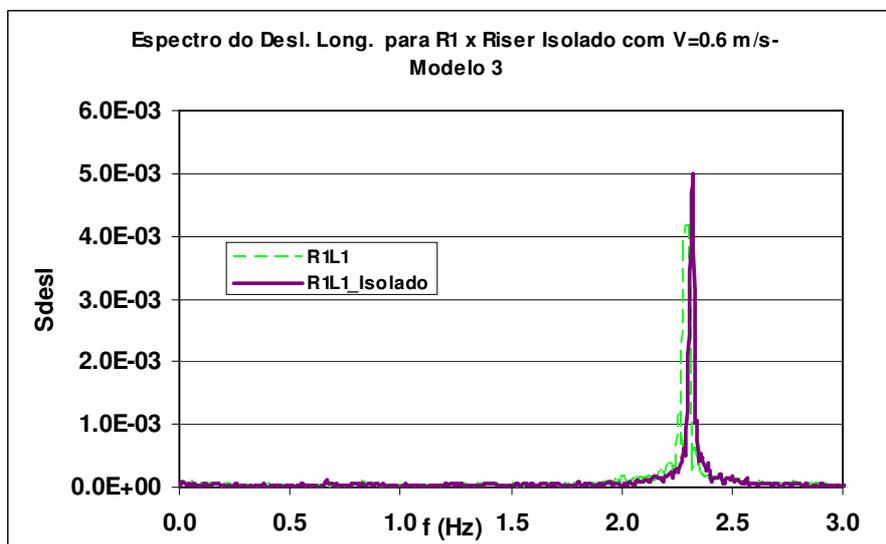


Figura C.118- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado e Detalhe na Frequência de 2 a 2.5 Hz.

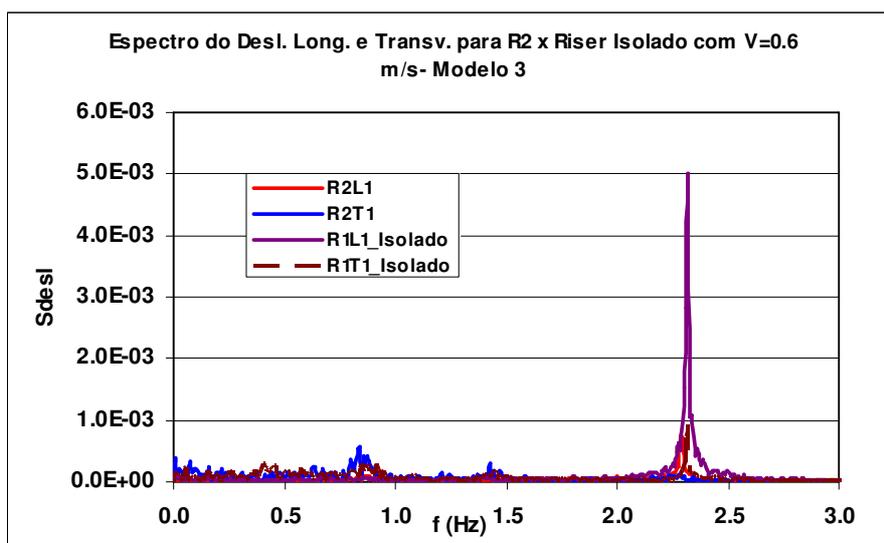


Figura C.119- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado e Detalhe na Frequência de 2 a 2.5 Hz.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico da frequência excitada na direção longitudinal do *riser* 1, ver Figura C.118.
- há uma redução da energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 1.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.93, mostram que a maior energia de vibração ocorre na direção longitudinal do *riser* 1.

Tabela C.93- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.1132	0.0249		
L2	0.1117	0.0236		
L3				
L4				
T1				0.0345
T2				0.0323
T3				0.0303

A Tabela C.94 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.94- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 6.28 \times 10^4$. (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	23.933	7.261	7.567	8.356
Médio	6.930	3.051	-1.567	0.234
Desvio Padrão	9.784	1.977	2.674	2.669
Mínimo	-9.526	-2.290	-10.349	-8.396

A Tabela C.95 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

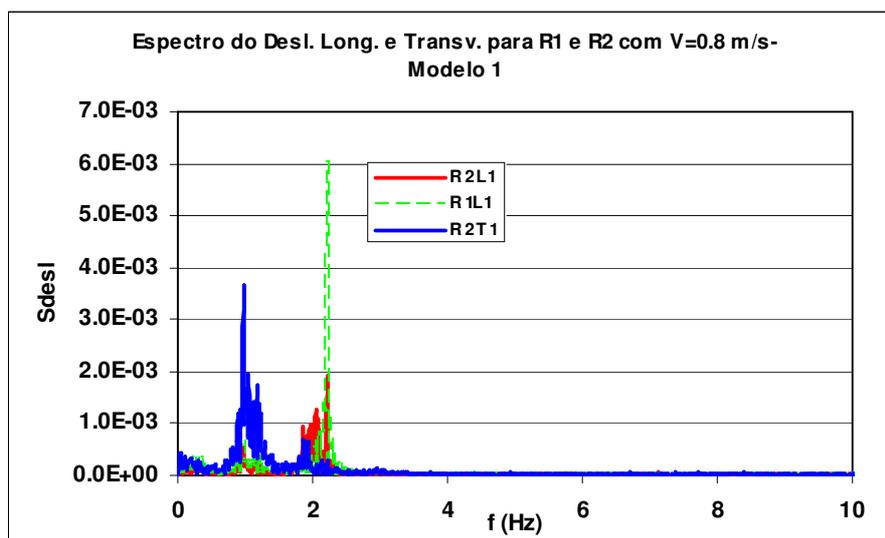
Tabela C.95- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 6.28 \times 10^4$. (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.796	0.350

C.2.2.4.3 Velocidade de 0.8 m/s

C.2.2.4.3.1 Modelo 1

A Figura C.120 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.



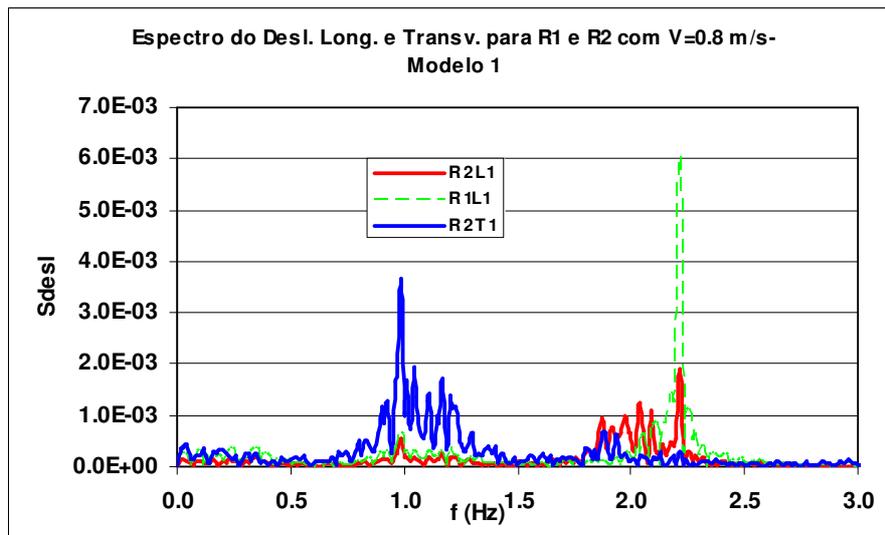


Figura C.120 - Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz..

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.2Hz na direção longitudinal do *riser 1* com uma grande energia, já para o *riser 2* foram excitadas várias frequências com uma distribuição da energia de excitação na faixa de frequências de 1.8 a 2.2Hz. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal o *riser 2* foi excitado na faixa de frequências de 0.7 a 1.5 Hz.

A Figura C.121 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.122 e C.123 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

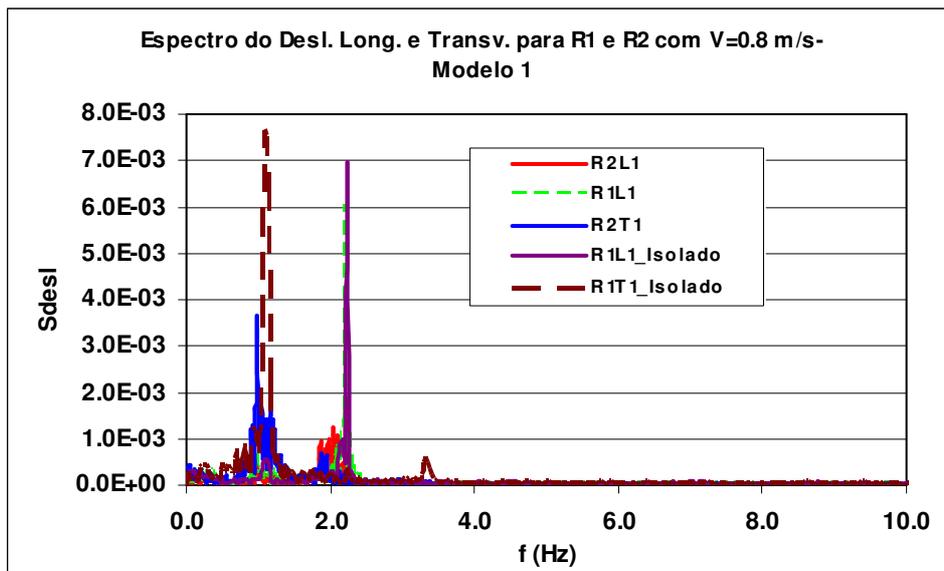


Figura C.121- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

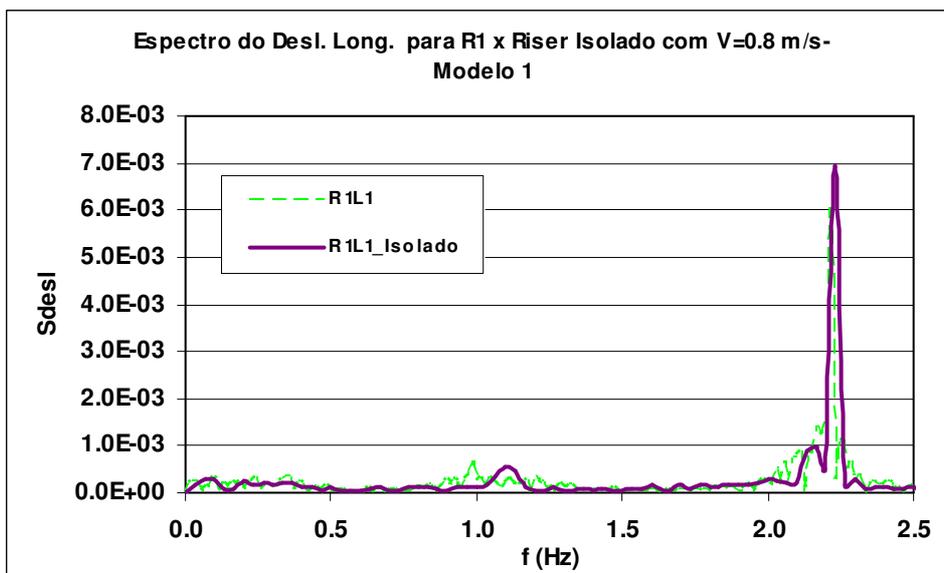


Figura C.122- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

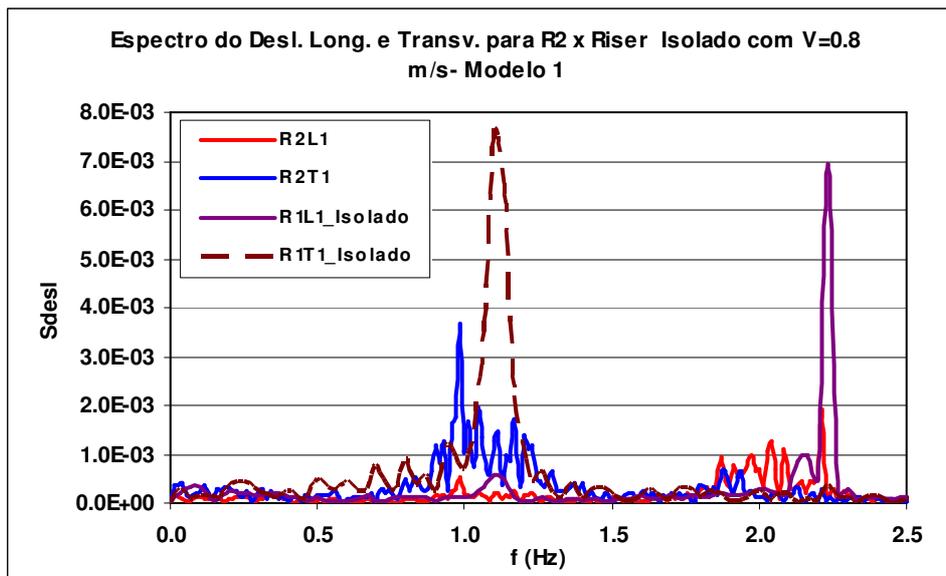


Figura C.123- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- a resposta estrutural em função das cargas hidrodinâmicas para os *risers* alinhados e espaçados de $5D$ é completamente diferente de um *riser* isolado. Conforme, pode-se observar nas Figuras C.122 e C.123, para o *riser 2* em ambas as direções, a energia de vibração será distribuída em uma larga faixa de frequências; somente o *riser 1* na direção longitudinal irá responder em uma frequência similar ao *riser* isolado. Esta é uma importante constatação que mostra como o efeito hidrodinâmico gerado pelo esteira do *riser* de montante irá afetar o comportamento de ambos.
- é importante salientar, que comportamento similar foi observado para o modelo 1, quando espaçado de 3 e 4D e submetido à mesma velocidade.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, isto é, amplitude adimensionalizada pelo diâmetro, apresentados na Tabela C.96, mostram que o *riser 1* foi excitado na direção longitudinal, já o *riser 2* foi excitado predominantemente na direção transversal.

Tabela C.96- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.118	0.064		
L2	0.118	0.065		
L3				
L4				
T1				0.117
T2				0.114
T3				0.093

A Figura C.124 mostra que para o riser 2 a trajetória se aproxima da figura denominada na literatura como *banana-shaped* [27].

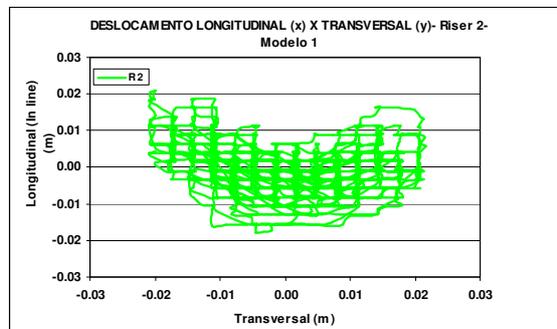


Figura C.124- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Riser 2.

A Tabela C.97 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.97- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 7.75 \times 10^4$. (Modelo 1).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	49.660	23.630	26.411	26.710
Médio	22.925	5.382	-1.342	0.005
Desvio Padrão	10.921	5.191	11.807	9.610
Mínimo	-1.397	-12.688	-31.625	-23.924

A Tabela C.98 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.98- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 7.75 \times 10^4$. (Modelo 1).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.325	0.311

C.2.2.4.3.2 Modelo 3

A Figura C.125 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

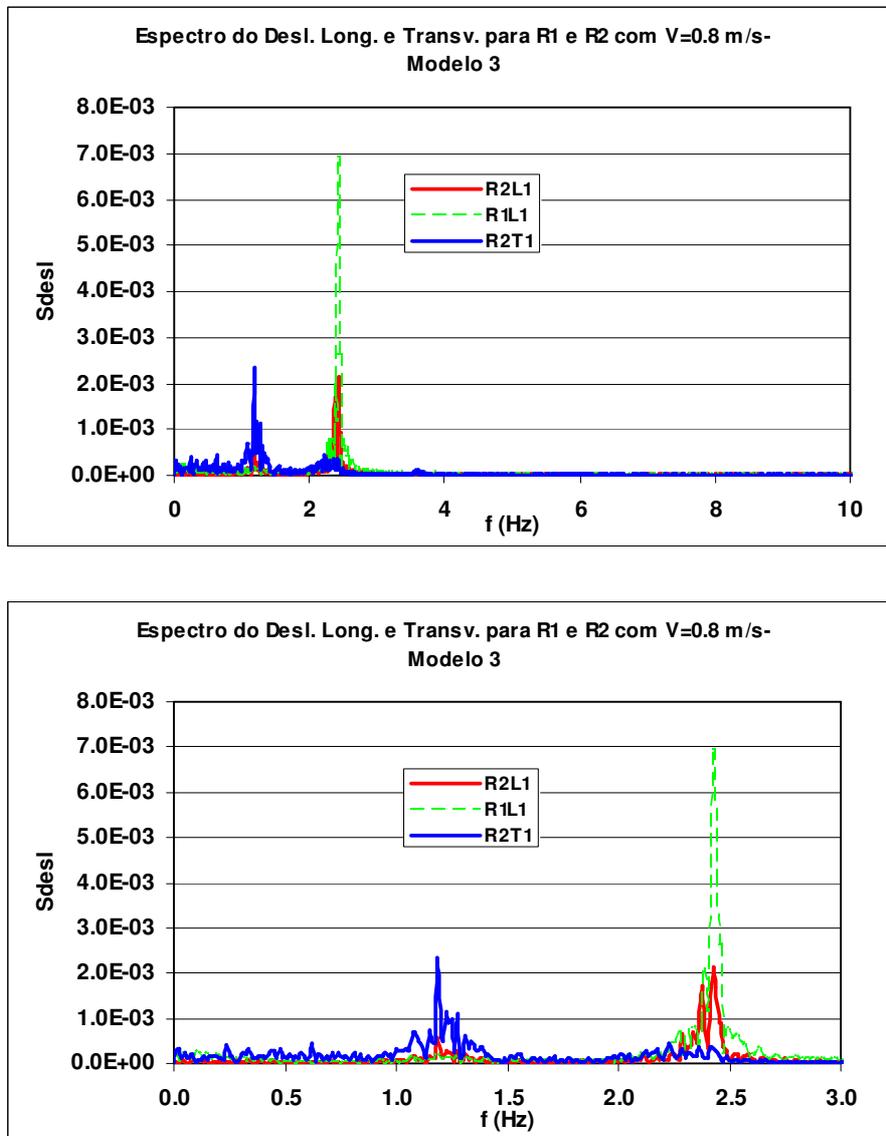


Figura C.125- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1 e 2* e Detalhe na Faixa de Frequência de 0 a 3 Hz..

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.4Hz na direção longitudinal do *riser 1* com uma grande energia, já o *riser 2* foi excitado também nesta frequência, com energia de excitação reduzida quando comparada ao *riser 1*. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal o *riser 2* foi excitado na faixa de frequências de 0.9 a 1.5 Hz.

A Figura C.126 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.127 e C.128 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

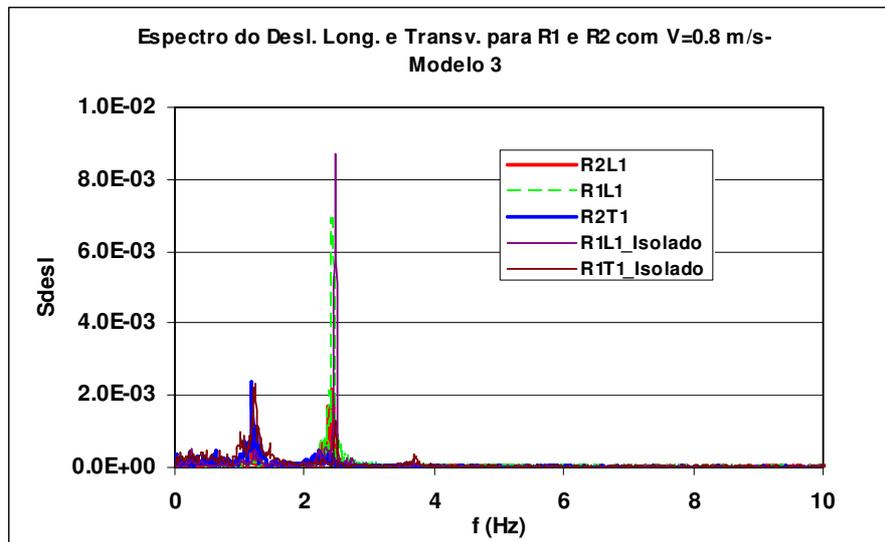


Figura C.126- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers 1* e *2* com o *Riser* Isolado.

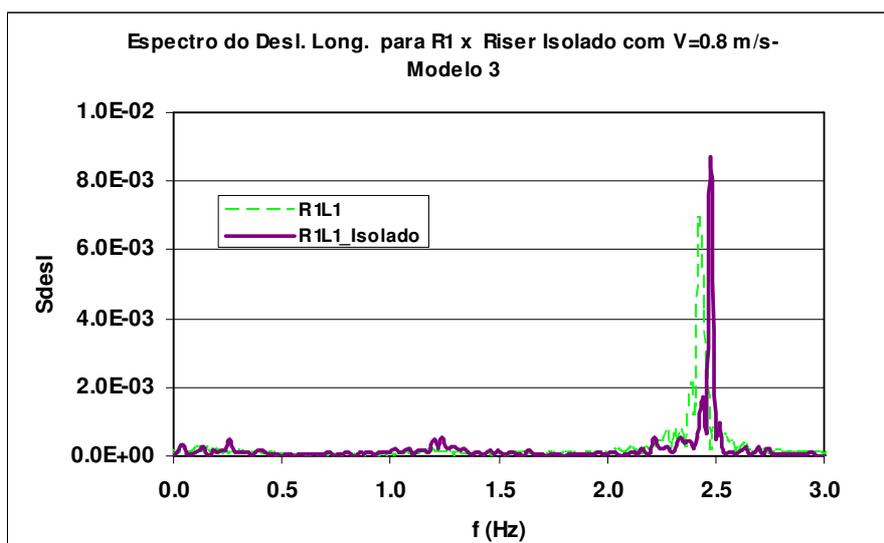


Figura C.127- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* com o *Riser* Isolado.

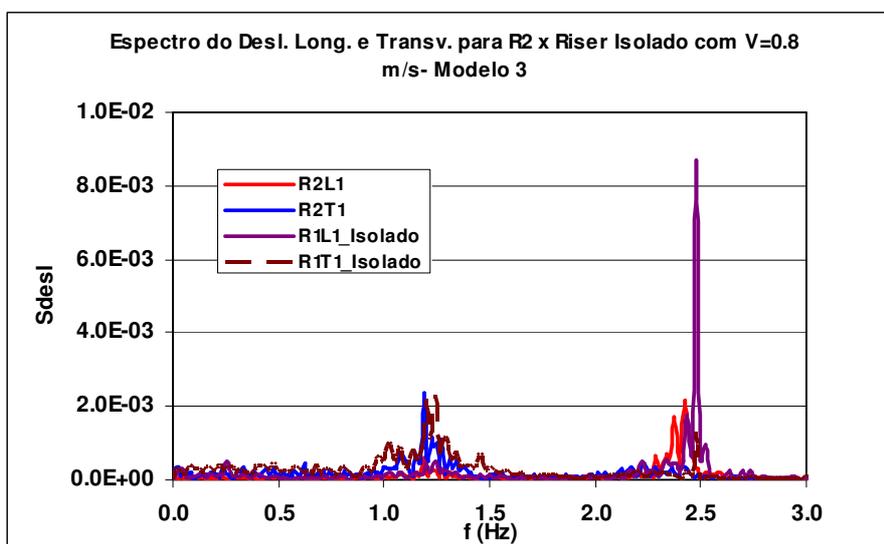


Figura C.128- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser* Isolado.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma pequena mudança no pico de frequência excitada na direção longitudinal do *riser* 1;
- há uma redução da energia das vibrações excitadas na direção longitudinal do *riser* 1;
- o comportamento hidrodinâmico do *riser* 2 (jusante) é completamente diferente do *riser* isolado, conforme está mostrado na Figura C.128; há uma redução da energia de excitação longitudinal;

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.99, mostram que o *riser 1* foi excitado na direção longitudinal. Já o *riser 2* foi excitado com energia similar em ambas as direções.

Tabela C.99- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.1743	0.0774		
L2	0.1724	0.0767		
L3				
L4				
T1				0.0803
T2				0.0786
T3				0.0663

A Figura C.129 mostra que o *riser 2* desloca-se em ambas as direções. A trajetória é atípica, aproximando-se de uma trajetória circular.

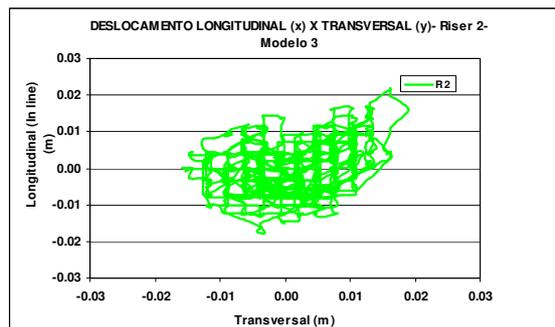


Figura C.129- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinais x Transversais do Riser 2.

A Tabela C.100 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.100- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 8.37 \times 10^4$. (Modelo 3).

	F_x (kgf)		F_y (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	43.869	27.956	19.516	22.018
Médio	13.465	4.505	-1.970	0.152
Desvio Padrão	15.311	7.034	8.500	7.690
Mínimo	-19.418	-16.962	-31.377	-20.387

A Tabela C.101 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.101- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 8.37 \times 10^4$. (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	0.870	0.291

C.2.2.4.4 Velocidade de 1 m/s

A Figura C.130 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.

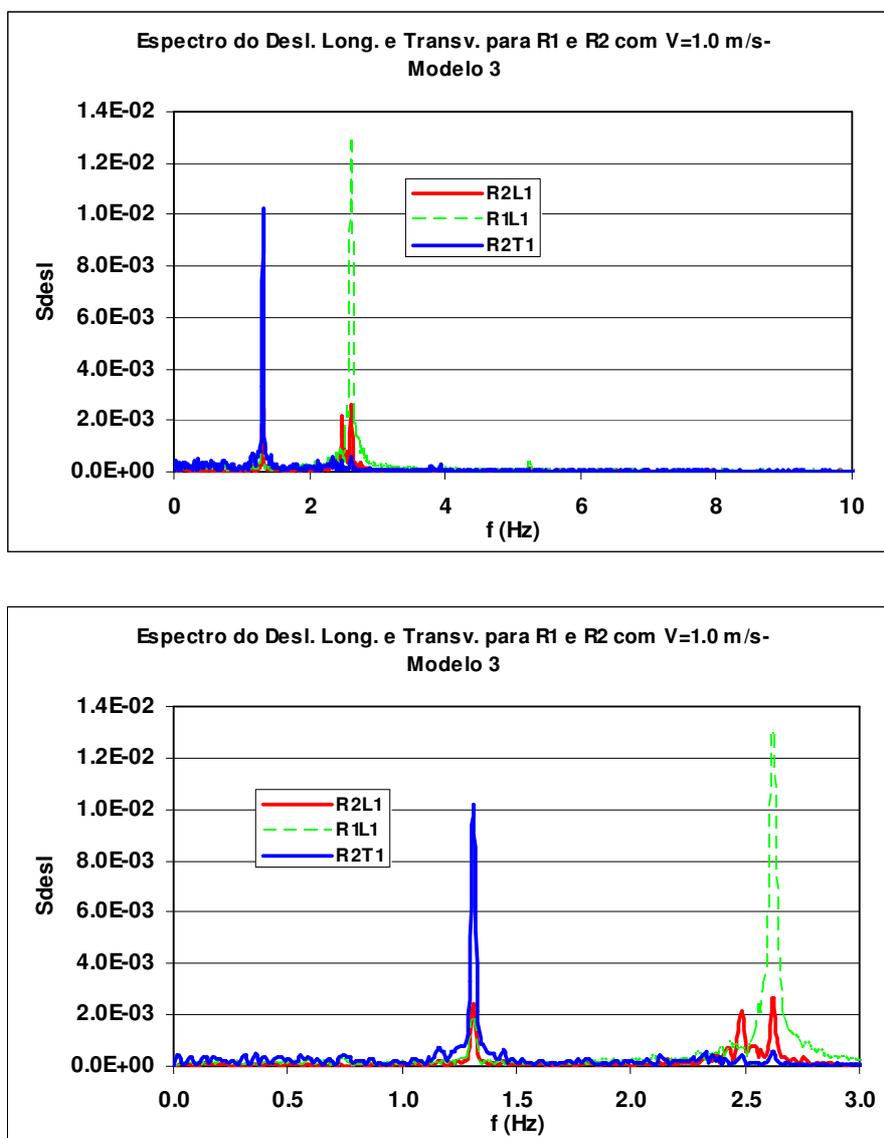


Figura C.130 - Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe nas Faixas de Frequências de 0 a 3 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser* 2 e longitudinal dos *risers* 1 e 2, pode-se observar que foi excitada uma frequência em torno de 2.6Hz na direção longitudinal do *riser* 1 com uma grande energia, estando este valor próximo da frequência natural do modelo 3, que é igual a 2.31Hz, já para o *riser* 2 na direção longitudinal foram excitadas várias frequências com uma distribuição da energia de excitação na faixa de 2.4 a 2.7 Hz. Contudo, com energia reduzida quando comparada ao *riser* 1. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal o *riser* 2 foi excitado em torno da frequência de 1.3 Hz.

A Figura C.131 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.132 e C.133 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de frequência de 0 a 2.5 Hz.

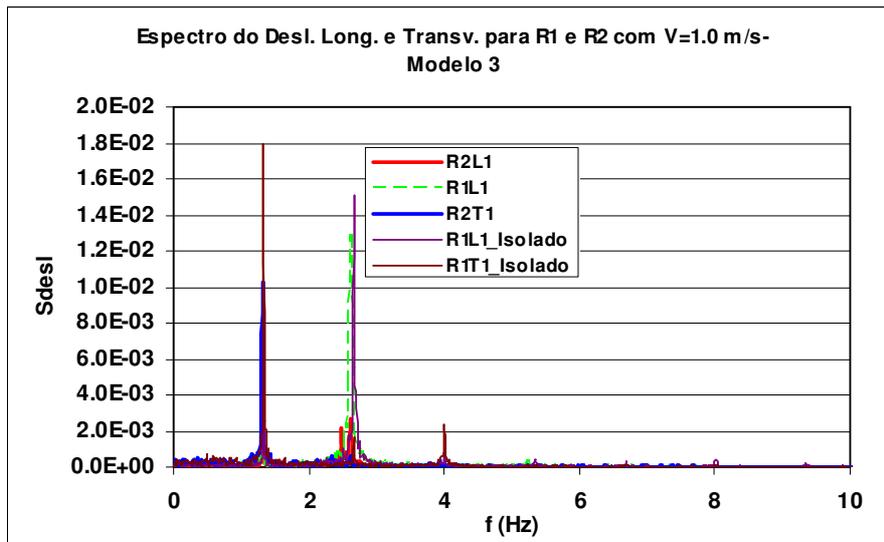


Figura C.131- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

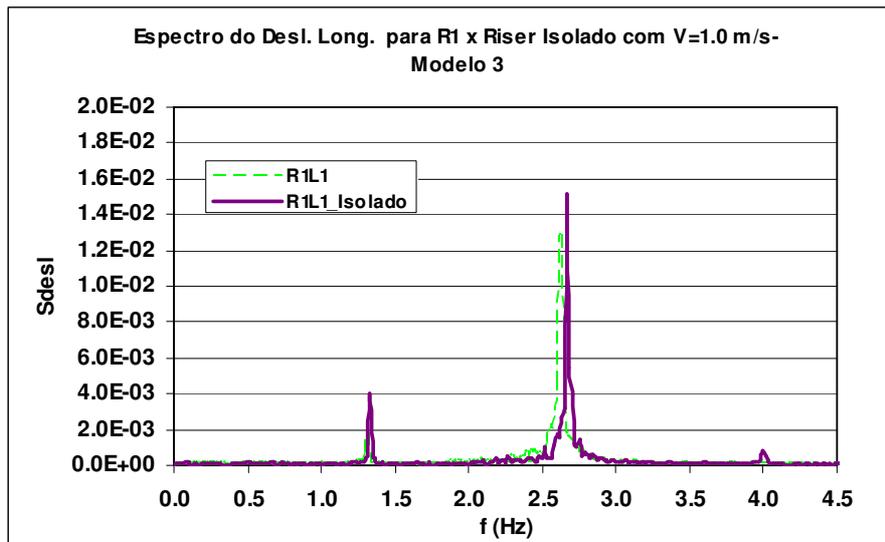


Figura C.132- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser 1* com o *Riser Isolado*.

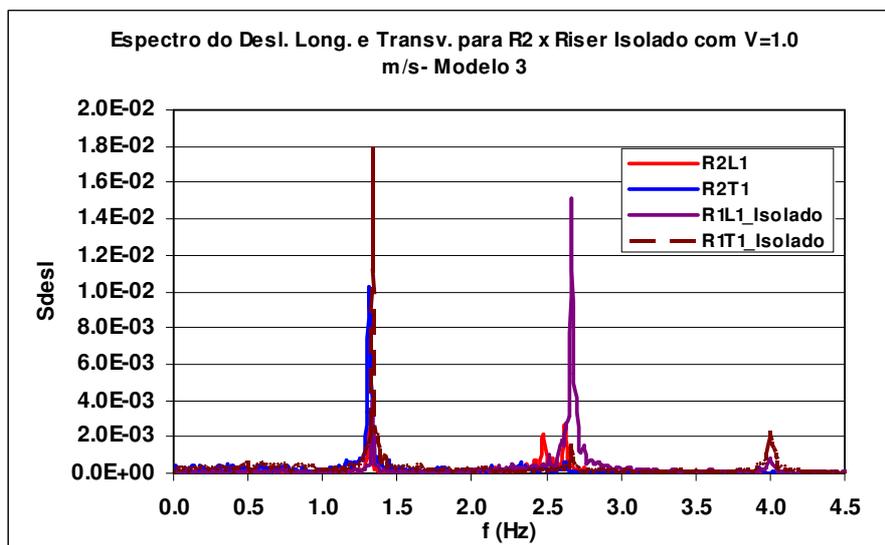


Figura C.133- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma redução da energia de vibração na direção transversal para o *riser* 2;
- há uma pequena mudança das frequências de excitação longitudinal do *riser* 1;
- a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 1 (montante) sofrem uma pequena redução;
- há uma redução da energia de vibração na direção longitudinal do *riser* 2.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.102, mostram que o *riser 1* foi excitado na direção longitudinal. Já o *riser 2* foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela C.102- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois *risers* medidas no ensaio.

	$(A_x/D)_{sig}$		$(A_y/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.3701	0.1035		
L2	0.3656	0.1014		
L3				
L4				
T1				0.2071
T2				0.1998
T3				0.1689

A Figura C.134 mostra que o *riser 2* descreve uma trajetória próxima a clássica figura em forma de oito.

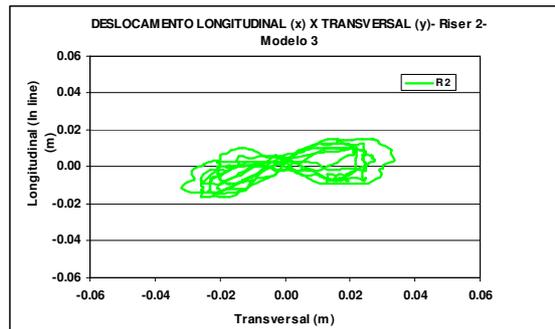


Figura C.134- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinais x Transversais do Riser 2.

A Tabela C.103 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os *risers*.

Tabela C.103- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.15 \times 10^5$. (Modelo 3).

	F_x (kgf)		F_y (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	94.841	30.197	55.541	41.027
Médio	27.169	6.082	-4.256	-0.075
Desvio Padrão	31.988	8.668	31.971	21.599
Mínimo	-33.807	-19.367	-60.525	-42.212

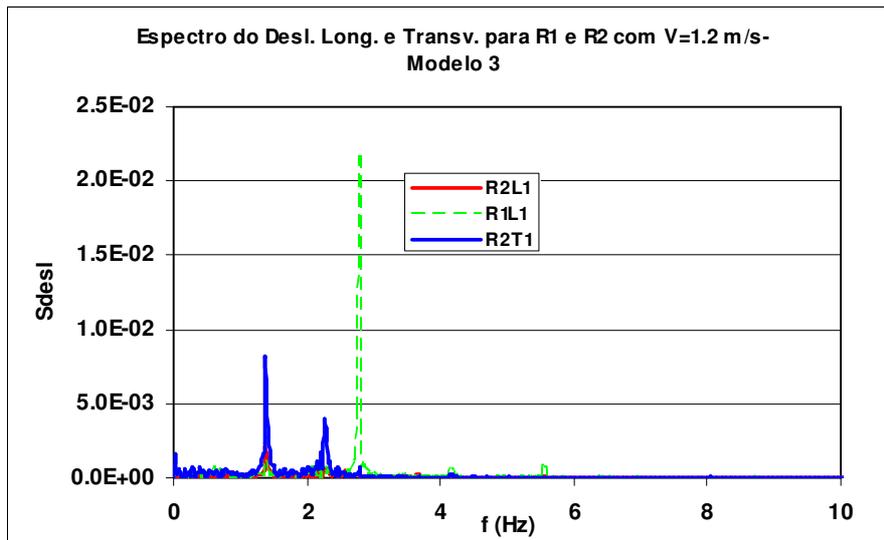
A Tabela C.104 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.104- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 1.15 \times 10^5$. (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.124	0.252

C.2.2.4.5 Velocidade de 1.2 m/s

A Figura C.135 apresenta os espectros do deslocamento transversal para o riser de jusante (R2), marcação R2T1, e longitudinal para ambos os risers (R1 e R2), marcações R1L1 e R2L1 do modelo 3.



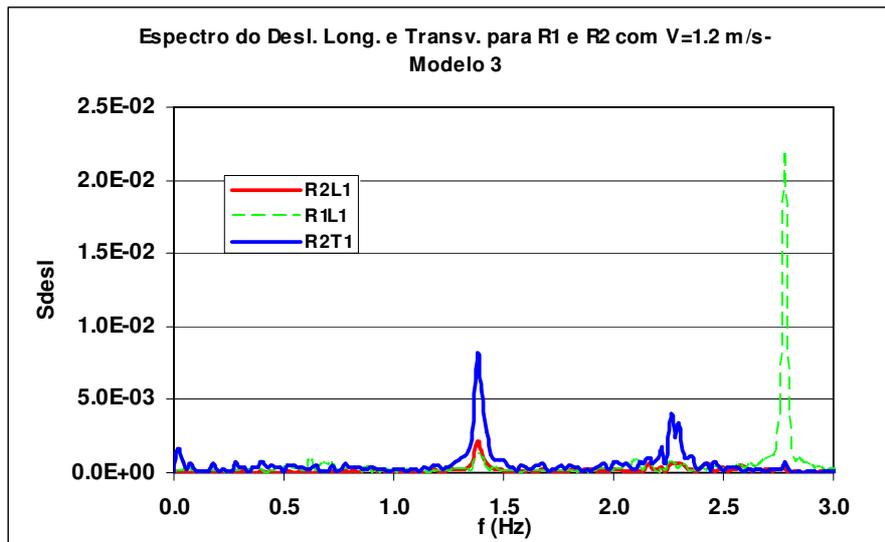


Figura C.135- Espectro do Deslocamento Transversal para o *Riser 2* e Longitudinal para os *Risers 1* e *2* e Detalhe na Faixa de Freqüências de 0 a 3 Hz.

Analisando-se os espectros dos deslocamentos transversal do *riser 2* e longitudinal dos *risers 1* e *2*, pode-se observar que foi excitada uma freqüência em torno de 2.8 Hz na direção longitudinal do *riser 1* com uma grande energia, estando este valor próximo da freqüência natural do modelo 3, que é igual a 2.31Hz; já para o *riser 2* não há energia de excitação expressiva na direção longitudinal. Pode-se, ainda, observar que na direção transversal, o *riser 2* foi excitado em uma freqüência em torno de 1.4 Hz.

A Figura C.136 apresenta uma comparação dos espectros de deslocamentos dos dois *risers* alinhados com espaçamento de 5D com um *riser* isolado. Nas Figuras C.137 e C.138 estão apresentados os mesmos espectros, separando R1 x Riser isolado e R2 x Riser isolado, na faixa de freqüência de 0 a 2.5 Hz.

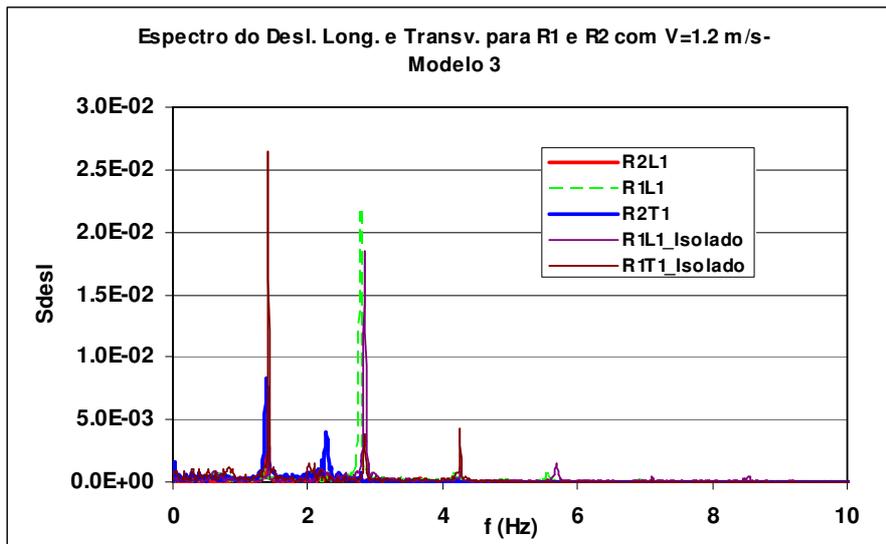


Figura C.136- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal dos *Risers* 1 e 2 com o *Riser* Isolado.

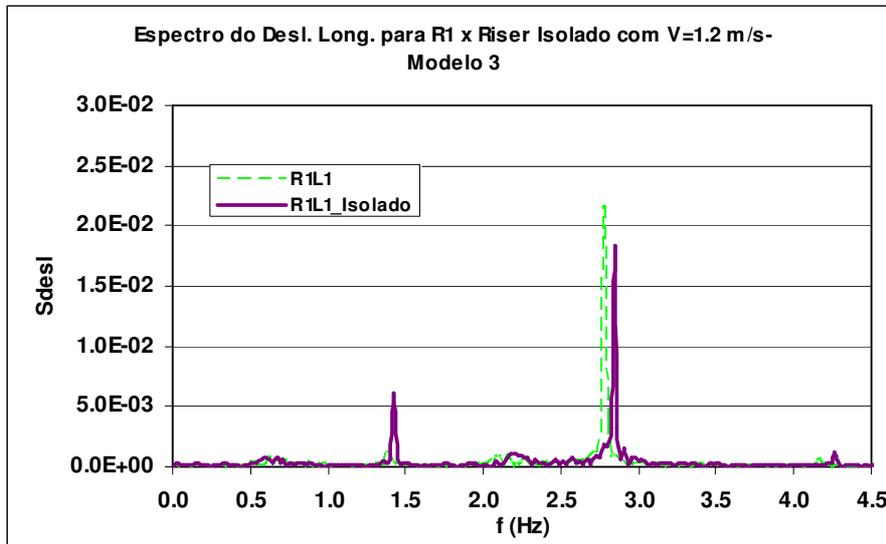


Figura C.137- Comparação dos espectros de deslocamentos longitudinais do *Riser* 1 com o *Riser* Isolado.

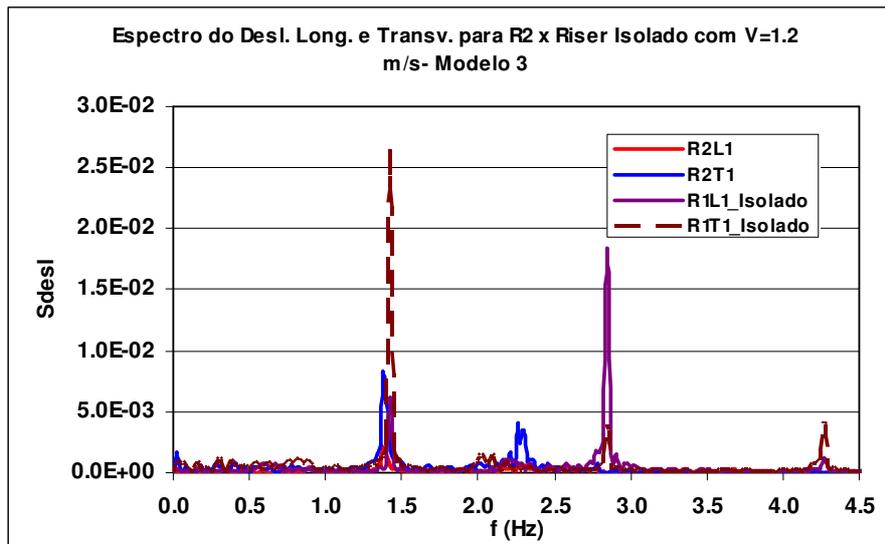


Figura C.138- Comparação dos espectros de deslocamentos transversal e longitudinal do *Riser 2* com o *Riser Isolado*.

Analisando os espectros dos *risers* 1 e 2 quando comparado ao *riser* isolado, pode-se observar que:

- há uma redução da energia das vibrações na direção transversal do *riser* 2;
- há uma mudança das frequências das vibrações na direção longitudinal para ambos os *risers* e na direção transversal para o *riser* 2;
- a energia das vibrações na direção longitudinal do *riser* 1 (montante) sofre um pequeno aumento;
- há uma redução das vibrações na direção longitudinal do *riser* 2.

Os valores de A/D obtidos para os dois *risers*, apresentados na Tabela C.105, mostram que o *riser* 1 foi excitado na direção longitudinal. Já o *riser* 2 foi excitado com maior energia na direção transversal.

Tabela C.105- Amplitude dos deslocamentos transversais e longitudinais para os dois risers medidas no ensaio.

	$(Ax/D)_{sig}$		$(Ay/D)_{sig}$	
	R1	R2	R1	R2
L1	0.4067	0.0672		
L2	0.4017	0.0663		
L3				
L4				
T1				0.2379
T2				0.2299
T3				0.1943

A Figura C.139 mostra que para o riser 2 descreve uma trajetória achatada, aproximando-se da forma conhecida na literatura como *banana-shaped* [27].

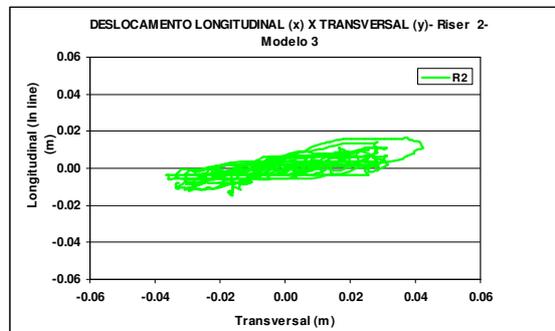


Figura C.139- Trajetória dos Deslocamentos Longitudinal x Transversal para o Riser 2.

A Tabela C.106 mostra as forças hidrodinâmicas nas direções transversal e longitudinal para ambos os risers.

Tabela C.106- Forças Hidrodinâmicas para $Re = 1.26 \times 10^5$. (Modelo 3).

	Fx (kgf)		Fy (kgf)	
	R1	R2	R1	R2
Máximo	124.810	27.447	71.265	59.707
Médio	40.687	14.090	-4.923	0.713
Desvio Padrão	35.995	3.826	47.871	26.46
Mínimo	-20.957	-0.433	-92.318	-63.319

A Tabela C.107 mostra os coeficientes de arrasto médios, obtidos a partir das forças de arrasto médias.

Tabela C.107- Coeficientes de Arrasto Médios para $Re = 1.26 \times 10^5$ (Modelo 3).

	CD	
	R1	R2
Médio	1.169	0.405

ANEXO D

ARQUIVO DE ENTRADA E SAÍDA DE DADOS DO PROGRAMA SHEAR 7

Este anexo apresenta os arquivos de entrada e saída de dados do modelo 3, para a velocidade de *lock in*, isto é, velocidade de 1.6m/s.

Arquivo de Entrada de Dados

```
*** BLOCK 1. unit system ***
  flag for units:      0

*** BLOCK 2. structural and hidrodynamic data ***
  flag for structural model:      1
  total length of the structure (m):      4.000
  number of spatial segments:      32
  modulus of elasticity (N/m**2): 0.3080E+10
  volume weight of the fluid (kg/m**3): 1000.000
  kinematic viscosity of the fluid (m**2/s): 0.1111E-05
  structural damping coefficient: 0.00630
  effective tension at origin (N):      98.0
  no. of zones to define sectional property:      1

  start and end point of each zone in x/L: 0.0000      1.0000
  hydrodynamic, strength OD, inside diameter(m): 0.114      0.114      0.100
  inertia (m**4) 0.3382E-05 mass (kg/m) 11.147 sbmg wt (N/m) 0.000
  Ca: 1.000 St code: 0.162 CL reduction factor: 1.00 LiftCoefData: 2
  hydrodynamic damping factors: 0.200      0.180      0.200

*** BLOCK 3. current data ***
  profile data pts: 3 probability: 0.100E+01 profile ID: 100
  location (x/L) and velocity (m/s): 0.000      1.6320
  location (x/L) and velocity (m/s): 0.050      1.6320
  location (x/L) and velocity (m/s): 1.000      1.6320

*** BLOCK 4. s-n and scf data ***
  no. of S-N curve segments: 1
  cut-off stress range (N/m**2): 0.0000
  stress range (N/m**2), cycles to failure: 0.1000E+09      0.2000E+07
  stress range (N/m**2), cycles to failure: 0.2000E+09      0.1000E+06
```

global stress concentration factor: 1.000
no. of local stress concentration positions: 0

*** BLOCK 5. computation/output option ***

calculation option: 2
response location definition: 0.0000 1.0000 0.1000
no. of user selected modes 0
input gravitational acceleration (m/sec**2): 0.000
two-sided bandwidth & multi-mode bandwidth: 0.2000 0.2000
cutoff to eliminate modes: 0.0500
flag for importing nodal tension & mass: 0
flag for MATLAB animation data output: 0
number of types of CL data to read: 4

*** BLOCK 6. supplemental data ***

Lift Coefficient Data

Data Set No.: 1

Number of frequencies: 1

ratio-ndFreq	aCL0	aCLmax	CLmax	CL0	CLfloor
0.10000E+01	0.11000E+01	0.30000E+00	0.70000E+00	0.30000E+00	-0.10000E+01

Data Set No.: 2

Number of frequencies: 26

ratio-ndFreq	aCL0	aCLmax	CLmax	CL0	CLfloor
0.70000E+00	0.14900E+00	0.10000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.73000E+00	0.26600E+00	0.20000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.74000E+00	0.40000E+00	0.21400E+00	0.10000E+00	0.16000E-01	-0.10000E+01
0.76000E+00	0.45100E+00	0.23500E+00	0.10000E+00	0.40000E-01	-0.10000E+01
0.78000E+00	0.50500E+00	0.27000E+00	0.10000E+00	0.80000E-01	-0.10000E+01
0.81000E+00	0.53000E+00	0.35000E+00	0.14000E+00	0.11000E+00	-0.10000E+01
0.87000E+00	0.58800E+00	0.45000E+00	0.20000E+00	0.18000E+00	-0.10000E+01
0.93000E+00	0.65800E+00	0.50000E+00	0.35000E+00	0.24000E+00	-0.10000E+01
0.96000E+00	0.74600E+00	0.50000E+00	0.50000E+00	0.30000E+00	-0.10000E+01
0.98000E+00	0.89000E+00	0.46000E+00	0.78000E+00	0.35000E+00	-0.10000E+01
0.10000E+01	0.90000E+00	0.43000E+00	0.80000E+00	0.40000E+00	-0.10000E+01
0.10200E+01	0.83700E+00	0.40000E+00	0.70000E+00	0.20000E+00	-0.10000E+01
0.10500E+01	0.76100E+00	0.40000E+00	0.40000E+00	0.10000E+00	-0.10000E+01
0.10800E+01	0.70600E+00	0.40000E+00	0.30000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.11000E+01	0.66600E+00	0.40000E+00	0.20000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.11600E+01	0.61500E+00	0.38000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.12200E+01	0.59200E+00	0.35000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.12800E+01	0.57500E+00	0.31300E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.13400E+01	0.53900E+00	0.27500E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01

0.14000E+01	0.50400E+00	0.23800E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.14500E+01	0.42000E+00	0.20000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.15700E+01	0.31200E+00	0.16000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.16300E+01	0.24700E+00	0.14000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.16900E+01	0.18600E+00	0.12000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.17400E+01	0.16000E+00	0.10000E+00	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01
0.18000E+01	0.13600E+00	0.90000E-01	0.10000E+00	0.00000E+00	-0.10000E+01

Data Set No.: 3

Number of frequencies: 1

ratio-ndFreq	aCL0	aCLmax	CLmax	CL0	CLfloor
0.10000E+01	0.30000E+00	0.15000E+00	0.20000E+00	0.10000E+00	-0.10000E+01

Data Set No.: 4

Number of frequencies: 1

ratio-ndFreq	aCL0	aCLmax	CLmax	CL0	CLfloor
0.10000E+01	0.30000E+00	0.15000E+00	0.20000E+00	0.10000E+00	-0.10000E+01

Arquivo de Saída

1. You have selected the following options:

1.1 Importing modes to analyze VIV.

If you selected to use modes generated from other sources, you should make sure that the units are consistent. The mode shape defined in SHEAR7 is normalized: the maximum one along the structure is unity.

1.2 The SI unit system

1.3 The following damping factors are used:

1	0.200	0.180	0.200
---	-------	-------	-------

2. Structural dynamic behavior.

2.1 String or beam?

$$Tk^2/EIk^4 = 0.144E-01$$

When the above value is less than 30

you should use the beam model.

2.2 Modes in excitation bandwidth, natural frequency,
and preliminary modal power ratio:

F = force; L = length; T = time.

mode no.	frequency (Hz)	force (F)	damping (F*T/L)	modal power (F*L/T)	power ratio to max
1	2.3600	0.25E+03	0.79E+01	0.41E+04	1.00000
2	8.8881	0.00E+00	0.19E+03	0.00E+00	0.00000
3	19.7792	0.00E+00	0.34E+03	0.00E+00	0.00000
4	35.0935	0.00E+00	0.53E+03	0.00E+00	0.00000

No. of potentially excited modes: 4

Based on the cutoff value of: 0.050
the number of modes above cutoff is: 1
These modes are:

1

Lowest And Highest Excited Mode Number
Nmmin= 1 Nmmax= 1

Pleas note that when there are many
modes above cutoff, and the number of
nodes is not large enough, some of the
modes that are above cutoff may not
get any input power region, and therefore

they may also be dropped out. These modes
are insignificant to fluid input power.

2.3 Ratio of change of vel to average vel: 0.00

The number of excited modes and the velocity ratio together
provide insight as to the likelihood of lock-in.

2.4 Finite or infinite system behavior?

11. Modal Displacement Amplitude

Mode No.	Amplitude (ft or m)
1	0.11127

12. Modal excitation region.

Mode No.	No. of Nodes	Length Ratio
1	33	1.000

Portion of the structure which is subject to flow is from 0.0000 L to 1.0000 L.

13. Lift coefficient for each mode.

In the following, the lift coefficient is the amplitude and not RMS value. Iteration, change in Reynolds number, and user input Cl reduction in suppression zone are taken into account.

mode number: 1

node number	Cl	Fn/Fvo
1	0.2237	1.0176
2	0.4345	1.0176
3	0.5849	1.0176
4	0.6759	1.0176
5	0.7111	1.0176
6	0.6922	1.0176
7	0.6207	1.0176
8	0.5070	1.0176
9	0.3627	1.0176
10	0.2002	1.0176
11	0.0320	1.0176
12	-0.1302	1.0176

13	-0.2753	1.0176
14	-0.3942	1.0176
15	-0.4794	1.0176
16	-0.5258	1.0176
17	-0.5307	1.0176
18	-0.4942	1.0176
19	-0.4185	1.0176
20	-0.3086	1.0176
21	-0.1716	1.0176
22	-0.0160	1.0176
23	0.1478	1.0176
24	0.3088	1.0176
25	0.4559	1.0176
26	0.5781	1.0176
27	0.6651	1.0176
28	0.7084	1.0176
29	0.7030	1.0176
30	0.6518	1.0176
31	0.5539	1.0176
32	0.4101	1.0176
33	0.2237	1.0176

14. RMS response and damage rate at specified locations.

Modes used in mode superposition calculation are from mode 1 to mode 4.

SI units: displacement = meters;
acceleration=m/s²; stress=N/m².

RMS A/D is RMS displ /local hydro diameter

14.1	x/L	RMS displ	RMS A/D	RMS acc	RMS stress	damage(1/years)
	0.000	0.000	0.000	0.000E+00	0.134E+09	0.278E+05
	0.094	0.023	0.206	0.516E+01	0.137E+09	0.303E+05
	0.188	0.045	0.393	0.985E+01	0.144E+09	0.376E+05
	0.281	0.062	0.544	0.136E+02	0.130E+09	0.245E+05
	0.375	0.074	0.646	0.162E+02	0.561E+08	0.637E+03
	0.469	0.079	0.689	0.173E+02	0.870E+07	0.203E+00
	0.562	0.077	0.671	0.168E+02	0.324E+08	0.595E+02

0.656	0.068	0.595	0.149E+02	0.118E+09	0.157E+05
0.750	0.053	0.467	0.117E+02	0.145E+09	0.390E+05
0.844	0.035	0.304	0.762E+01	0.143E+09	0.360E+05
0.938	0.014	0.122	0.305E+01	0.141E+09	0.339E+05

14.2 Maximum damage rate & its position for each excited mode

Mode No.	Location (x/L)	damage rate	upcrossing frequency (Hz)
1	0.781	0.392E+05	2.36004

14.3 The Overall Maximum RMS displacement (OMRD) is 0.079 m
OMRD occurs at x/L= 0.500

14.4 The Overall Maximum RMS Stress (OMRS) is 0.1454E+09 N/m**2
OMRS occurs at x/L= 0.781

14.5 The Overall Maximum Fatigue Damage (OMFD) is 0.392E+05
OMFD occurs at x/L= 0.781

15. Re, St, and drag amplification factor

x/L	T (N)	V (m/s)	Re	St	Cf
0.000	98.0	1.6320	167459.9	0.162	1.000
0.094	98.0	1.6320	167459.9	0.162	1.586
0.188	98.0	1.6320	167459.9	0.162	1.892
0.281	98.0	1.6320	167459.9	0.162	2.102
0.375	98.0	1.6320	167459.9	0.162	2.232
0.469	98.0	1.6320	167459.9	0.162	2.285
0.562	98.0	1.6320	167459.9	0.162	2.263
0.656	98.0	1.6320	167459.9	0.162	2.167
0.750	98.0	1.6320	167459.9	0.162	1.998
0.844	98.0	1.6320	167459.9	0.162	1.755
0.938	98.0	1.6320	167459.9	0.162	1.416

In the table, Cf is the drag amplification factor due to VIV response. The product of Cf and drag coefficient gives VIV amplified drag coefficient. T is effective tension.

16. Computational resolution.

The user-input number of spatial segments: 32

The first program-suggested number of spatial segments: 20

The above value is defined as below.

It is assumed that the minimum wavelength equals twice of the structure length divided by the maximum mode number. It is also assumed that in each wavelength, 10 segments would be sufficient.

The second program-suggested number of spatial segments: 4

The above value is defined as below.

There are at least 4 segments in the shortest structural zone.

The user-input number of spatial segments should be greater than or at least equal to the larger of the two program-suggested values.

However, to adequately model the lift force distribution, the user-input number should not be too small.

When the number of segments is small, the results can be sensitive to it.

ANEXO E

DESCRIÇÃO RESUMIDA DO PROGRAMA ANSYS- CFX

E.1 Introdução

O programa ANSYS-CFX foi usado ao longo desta tese, para obter os coeficientes hidrodinâmicos para um *riser* e para dois *risers* com diferentes arranjos, conforme está descrito no capítulo 4. Neste anexo, é apresentada uma breve descrição deste programa.

E.2 Aspectos Numéricos

O programa ANSYS CFX é baseado no Método de Volumes Finitos Baseado em Elemento (EbFVm), ver referência [45], que permite o tratamento de malhas não-estruturadas em coordenadas cartesianas mantendo o caráter conservativo do método de volumes finitos.

O programa consiste de 5 módulos, conforme está mostrado na Figura E-1.

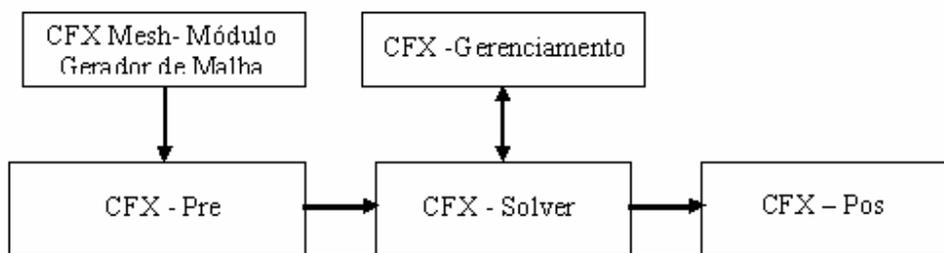


Figura E-1- Módulos do Programa CFX [46].

Com o programa CFX pode-se estudar:

- Escoamento no regime permanente e transiente;
- Escoamento laminar e turbulento;
- Escoamento subsônico, trans-sônico e supersônico;
- Transferência de calor e radiação térmica;
- Escoamento de fluido não Newtoniano;
- Escoamento multifásico etc.

O algoritmo de solução do sistema de equações lineares, proveniente da discretização, é resolvido de forma acoplada e totalmente implícita no domínio do tempo.

Para a discretização do domínio fluido, podemos usar os tipos de elementos, como mostrado na Figura E-2:

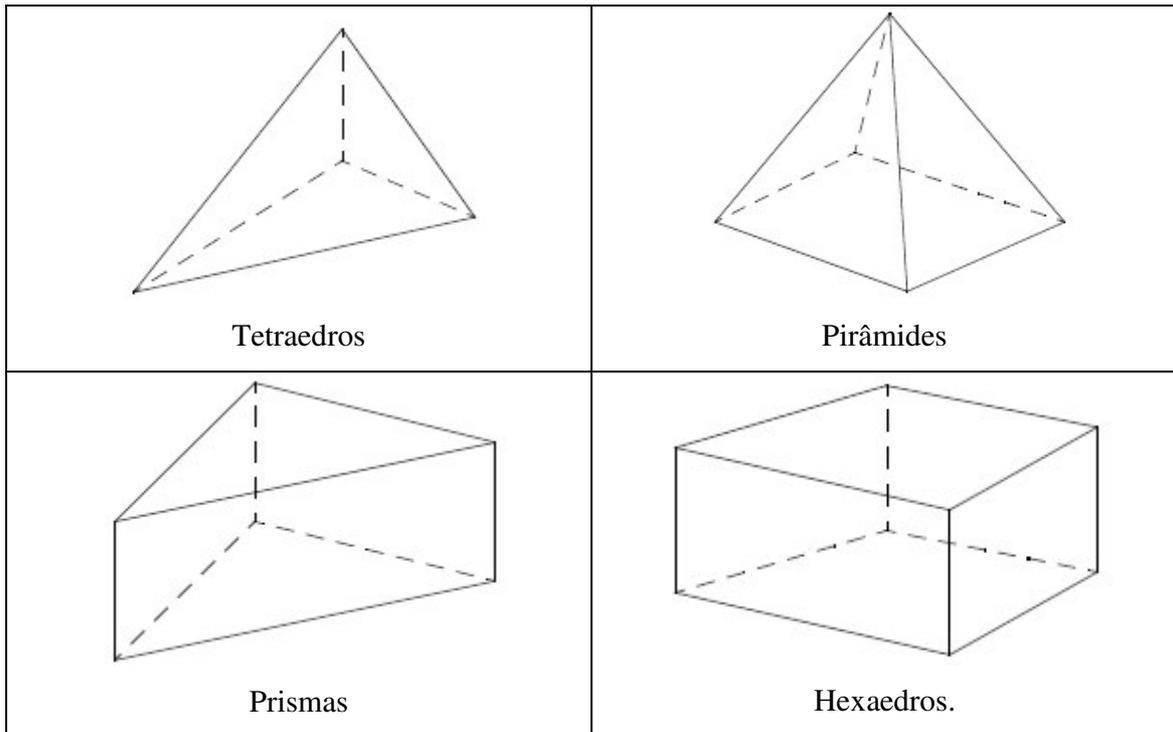


Figura E-2- Tipos de Elementos Usados para Construção do Modelo [47].

O domínio fluido, mostrado na Figura 4.1, foi construído usando os 4 tipos de elementos mostrados na Figura E-2.

ANEXO F

ESTUDO DA TURBULÊNCIA.

F.1 Introdução

De acordo com a referência [33], o conceito de turbulência está associado a variações não-lineares no tempo e no espaço do campo de velocidades e de pressão do escoamento, conforme está mostrado na Figura F-1, obtida na referência [44].

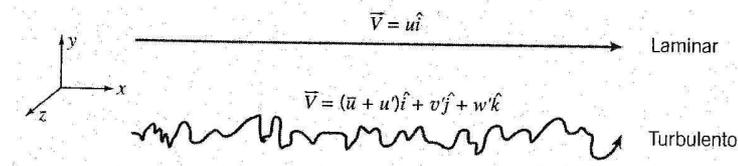


Figura F-1- Comparação da Trajetória de uma Partícula para Escoamento Unidimensional Laminar e Turbulento.

Conforme mencionado no Capítulo 3 deste trabalho, o escoamento da corrente marinha em torno dos *risers* recai em números de Reynolds na faixa de 10^4 a 10^6 . Neste mesmo capítulo, a Tabela 3.1 mostra que para número de Reynolds superiores a 2×10^5 , a camada limite torna-se turbulenta; como este limite é fortemente influenciado pela rugosidade superficial do *riser*, podemos concluir que há necessidade de tratarmos a camada limite como turbulenta nas simulações numéricas usando o método da dinâmica dos fluidos computacional. Além disto, a esteira formada a jusante do *riser* de montante, conforme está mostrado na Figura 1.10, para número de Reynolds maiores que 150 se torna turbulenta.

Visando obter uma solução numérica da equação de Navier-Stokes, com uma representação mais realística do fenômeno físico do escoamento turbulento sem um elevado custo computacional, foram desenvolvidos e estão disponíveis no programa CFX da Ansys vários modelos de turbulência, conforme pode ser visto nas referências [33] e [34].

A solução numérica da equação de Navier-Stokes por si só, seria capaz de reproduzir o comportamento físico real, mesmo para um escoamento com elevada intensidade de turbulência, desde que usássemos o método chamado de SND (Simulação

Numérica Direta). Contudo, este método implica em uma malha extremamente refinada capaz de capturar todas as frequências de vórtices (tamanhos).

Conforme mencionado no capítulo 4 deste trabalho, foi usado o modelo de turbulência denominado de SST (*Shear Stress Transport*). Este modelo, disponível na versão 10 do programa CFX, ver referências [34] e [35], é um modelo desenvolvido por Mentor que combina a formulação de um modelo $k-\omega$ perto da parede, com um modelo $k-\varepsilon$ no núcleo do escoamento turbulento.

F.2 Descrição do Modelo de Turbulência SST

A partir da equação de Navier-Stokes e da equação da continuidade, apresentadas no anexo B, temos.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{B.2})$$

Lembrando que a viscosidade cinemática (ν) é dada por $\nu = \mu / \rho$, temos:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{F.1})$$

Reescrevendo-se a equação D.1 nas direções x, y e z, temos:

Direção x:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{F.2})$$

Direção y:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{F.3})$$

Direção z:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{F.4})$$

Aplicando a decomposição de Reynolds sobre as variáveis do problema:

$$u = \bar{U} + u' \quad (\text{F.5})$$

$$v = \bar{V} + v' \quad (\text{F.6})$$

$$w = \bar{W} + w' \quad (\text{F.7})$$

$$p = \bar{P} + p' \quad (\text{F.8})$$

Manuseando somente a equação na direção x, isto é, substituindo na equação (F.2) as expressões (D.5), (D.6), (D.7) e (D.8), temos:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial(\bar{U} + u')}{\partial t} + \rho((\bar{U} + u') \frac{\partial(\bar{U} + u')}{\partial x} + (\bar{V} + v') \frac{\partial(\bar{U} + u')}{\partial y} + \\ & + (\bar{W} + w') \frac{\partial(\bar{U} + u')}{\partial z}) = -\frac{\partial(\bar{P} + p')}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2(\bar{U} + u')}{\partial x^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2(\bar{U} + u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{U} + u')}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{F.9})$$

Aplicando-se o conceito de média no tempo e no espaço na equação (F.9), ver referência [38], obtemos a equação de Navier-Stokes com média de Reynolds:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial(\bar{U})}{\partial t} + \rho \left(\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \frac{\partial(\overline{u'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{F.10})$$

Comparando-se a equação de Navier-Stokes com média de Reynolds (F.10), com a equação original de Navier-Stokes (D.2), pode-se observar que há 3 termos devidos à consideração da flutuação no campo das velocidades e pressões devida a turbulência.

Reescrevendo-se a equação (D.10), temos:

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial(\bar{U})}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} \right) - \\ & - \rho \left(\frac{\partial(\overline{u'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (\text{F.11})$$

O último termo do lado direito da equação (F.11), pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}(-\overline{\rho u' u'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{\rho u' v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\overline{\rho u' w'}) \right) \quad (\text{F.12})$$

A partir da equação (D.12), temos a componente na direção x do tensor de Reynolds, dada por:

$$\tau_x = -\left(\overline{\rho u' u'} + \overline{\rho u' v'} + \overline{\rho u' w'} \right) \quad (\text{F.13})$$

Por analogia temos as componentes nas direções y e z do tensor de Reynolds:

$$\tau_y = -\left(\overline{\rho u' v'} + \overline{\rho v' v'} + \overline{\rho v' w'} \right) \quad (\text{F.14})$$

$$\tau_z = -\left(\overline{\rho u' w'} + \overline{\rho v' w'} + \overline{\rho w' w'} \right) \quad (\text{F.15})$$

O tensor de Reynolds é dado pelo produto tensorial do vetor \vec{V} , apresentado a seguir, por ele mesmo:

$$\vec{V} = \overline{u'} \vec{i} + \overline{v'} \vec{j} + \overline{w'} \vec{k} \quad (\text{F.16})$$

$$\text{Temos, portanto: } \vec{\tau} = -\overline{\rho \vec{V} \otimes \vec{V}} \quad (\text{F.17})$$

Os modelos de turbulência visam proporcionar o fechamento, isto é, obter a solução da equação de Navier-Stokes com média de Reynolds. E dentre estes modelos, temos o SST, usado para a realização das simulações numéricas, cujos resultados estão apresentados no capítulo 4.

O modelo SST (*Shear Stress Transport*), de acordo com a referência [32], está agrupado nos modelos denominados em inglês de *Eddy Viscosity Turbulence*.

$$-\overline{\rho \vec{V} \otimes \vec{V}} = -\frac{2}{3} \rho \kappa \delta - \frac{2}{3} \mu_T \nabla \cdot \vec{V} \delta + \mu_T (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T) \quad (\text{F.18})$$

Onde:

κ : Energia cinética turbulenta;

δ : Matriz identidade ou função delta de Kronecker;

μ_T : Viscosidade turbulenta ou *Eddy Viscosity*.

A viscosidade turbulenta no modelo SST é dada pela expressão:

$$\mu_T = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (\text{F.19})$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (\text{F.20})$$

Onde:

$$\arg_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{CD_{kw} \sigma_{\omega 2} y^2}\right) \quad (\text{F.21})$$

$$CD_{kw} = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega, 10^{-10}\right) \quad (\text{F.22})$$

Onde:

y : É à distância nas proximidades da parede.

β' : Coeficiente empírico, tomado igual a 0.09

$\sigma_{\omega 2}$: Coeficiente empírico, tomado igual a 1/0.856.

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (\text{F.23})$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right) \quad (\text{F.24})$$

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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