

ROSIANITA BALENA

**ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR  
VÓRTICES EM TRECHO VERTICAL DE *RISER* RÍGIDO, SUJEITO À  
VARIAÇÃO DE TRAÇÃO, E SUA INFLUÊNCIA NA FADIGA**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.

São Paulo

2010

ROSIANITA BALENA

**ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR  
VÓRTICES EM TRECHO VERTICAL DE *RISER* RÍGIDO, SUJEITO À  
VARIAÇÃO DE TRAÇÃO, E SUA INFLUÊNCIA NA FADIGA**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:  
Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra

São Paulo

2010

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo, 15 de junho de 2010.**

**Assinatura do autor** \_\_\_\_\_

*Rosiane Balena*

**Assinatura do orientador** \_\_\_\_\_

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Balena, Rosianita**

**Estudo analítico-numérico das vibrações induzidas por vórtices em trecho vertical de riser rígido, sujeito à variação de tração, e sua influência na fadiga / R. Balena. – ed.rev. – São Paulo, 2010.**

**162 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.**

**1. Vibrações 2. Vórtices dos líquidos 3. Fadiga dos materiais (Variação) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.**

À Solange, Darlei e Marcelo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. André Luís Condino Fajarra pelo paciente trabalho de orientação e pelo constante incentivo.

Aos professores e funcionários da Universidade de São Paulo pelo suporte técnico e científico fundamentais a este trabalho.

Aos colegas: Guilherme Feitosa, Fernanda Takafuji, Rafael Tanaka, Lauro da Silveira, Guilherme Franzini, Adriano Axel e Karen Siewert pelas discussões técnicas e suporte.

Aos colegas da Oceaneering pela disponibilização de tempo e recursos para realização desta pesquisa.

Aos meus familiares pelo amor, dedicação e compreensão incondicionais.

À FAPESP; pelo suporte financeiro ao Programa de Doutorado 03/14112-3.

E, finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

## RESUMO

A produção de petróleo em ambiente marítimo é feita através de plataformas, em geral flutuantes, conectadas aos reservatórios através de dutos, os chamados *risers*, responsáveis pelo transporte de petróleo bruto, gás ou água.

Do ponto de vista estrutural, estes *risers* podem ser rígidos ou flexíveis, porém, independente do tipo empregado, com o aumento da profundidade, aumentam-se os esforços de tração sobre essas estruturas. Em águas profundas, essa desvantagem pode ser diminuída com a utilização de configurações mais complexas, dentre as quais se destaca a *riser tower*, que é foco do presente estudo. Este sistema é composto por vários dutos unidos ao longo de um tubo vertical único, sustentado por uma bóia de subsuperfície. Um grande atrativo desta configuração é a redução da fadiga devido às ondas, uma vez que a bóia e parte significativa dos *risers* rígidos verticais não sofrem efeitos relevantes das ondas de superfície.

No entanto, dois problemas de interação fluido-estrutural persistem: um associado ao fenômeno de VIV – Vibração Induzida pela Emissão de Vórtices no *riser* vertical e outro relativo ao VIM - Movimento Induzido pela Emissão de Vórtices na bóia. Devido ao fato da correnteza ser quase permanente, bem como das altas frequências passíveis de excitação, tem-se um número de ciclos de tensão bastante elevado, associados à flexão, o que pode ser importante no estudo de fadiga do material que compõe as referidas estruturas.

De maneira mais completa, no que compete à fenomenologia das interações fluido-estruturais mencionadas, o presente trabalho propõe-se a estudar numérica e analiticamente a dinâmica transversal e longitudinal do conjunto formado pelo *riser* rígido e pela bóia de subsuperfície, particularmente focado nos efeitos da dinâmica sobre a vida útil do *riser* vertical.

**Palavras-chave:** Vibração induzida pela emissão de vórtices – VIV. *Riser* rígido vertical. Variação de tração. Fadiga.

## ABSTRACT

The offshore oil production is performed with platforms, floating in most cases, which are connected to the well through pipes. These pipes are called risers and are responsible for the transport of crude oil, gas and water from seabed to the platform and vice-versa.

From the structural standpoint, these risers can be rigid or flexible. However, independently of the type, the topside tension of these structures increases with the water depth. In deep water this disadvantage can be reduced by using more complex configurations, for example the riser tower, which is the focus of the current study. The riser tower is a system composed by pipes bundled around a central steel tube supported by a subsurface buoyancy tank. This configuration is attractive due to the reduction on waves fatigue since the buoy and most of the vertical risers' length is not impacted by the effects of the surface waves.

Nevertheless, two issues from the fluid-structural interaction still persist: one related to the VIV phenomena – vortex-induced vibration on the vertical riser and the other associated to the VIM – vortex induced motion on the buoyancy tank. Considering the almost permanent nature of the offshore currents associated to the high frequencies that can be excited, during the operational life, the riser is subjected to a large amount of stress cycles which are important for the evaluation of the structural integrity in terms of fatigue.

In a more complete sense, considering the phenomenology of the fluid-structure interactions, the purpose of the present work is studying numerical and analytically the inline and cross-flow dynamics of the riser tower system especially focused on the impact of the dynamics on the vertical riser operational life.

**Keywords:** Vortex-induced vibrations - VIV. Vertical rigid riser. Tension fluctuation. Fatigue.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1 CONTEXTO DA PRODUÇÃO OCEÂNICA DE PETRÓLEO ATUAL.....	23
1.2 DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA A PRODUÇÃO OCEÂNICA DE PETRÓLEO .....	24
1.3 IMPACTO DOS AGENTES AMBIENTAIS NA VIDA ÚTIL DO <i>RISER</i> .....	27
1.4 ESTRATÉGIAS PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	28
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>31</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>32</b>
3.1 O SISTEMA <i>RISER TOWER</i> .....	32
3.2 VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELA EMISSÃO DE VÓRTICES (VIV).....	35
3.2.1 <i>Cilindros rígidos</i> .....	40
3.2.2 <i>Cilindros flexíveis</i> .....	44
3.2.3 <i>Abordagem Analítica</i> .....	45
3.3 SUBSÍDIOS TEÓRICOS PARA AS ANÁLISES DE FADIGA .....	46
3.3.1 <i>Comparativo entre as metodologias SN e da/dN</i> .....	48
3.3.2 <i>Vida à fadiga de risers rígidos</i> .....	55
<b>4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....</b>	<b>60</b>
4.1.1 <i>O Modelo de VIV</i> .....	60
4.1.2 <i>O Modelo Estrutural</i> .....	65
4.1.3 <i>Análises nos domínios do tempo e da frequência</i> .....	67
<b>5. PRÉ-TESTES COM O MODELO NUMÉRICO-FENOMENOLÓGICO .....</b>	<b>70</b>
5.1 O EXPERIMENTO DE VIV UTILIZADO COMO ELEMENTO DE COMPARAÇÃO .....	70
5.2 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS PARA AS ANÁLISES NUMÉRICAS.....	74
5.3 COMPARAÇÕES EM TERMOS DE VIBRAÇÕES LIVRES.....	75
5.3.1 <i>Frequências naturais</i> .....	75
5.3.2 <i>Modos naturais</i> .....	76
5.4 COMPARAÇÃO MEDIANTE EXCITAÇÃO DE VIV .....	78
5.4.1 <i>Modos excitados</i> .....	78
5.4.2 <i>Coexistência de oscilações Inline e Cross-flow</i> .....	85
5.4.3 <i>Tração no topo</i> .....	87
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS COM BASE NOS PRÉ-TESTES .....	91
<b>6. APLICAÇÃO À <i>RISER TOWER</i> .....</b>	<b>93</b>
6.1 METODOLOGIA ADOTADA .....	93
6.1.1 <i>O modelo fenomenológico do OrcaFlex</i> .....	93
6.2 DETALHAMENTO DO PROBLEMA E ENCAMINHAMENTO VIA DOOLINES .....	95



6.3	FREQUÊNCIAS NATURAIS .....	98
6.3.1	<i>Modos naturais</i> .....	99
6.4	COMPARAÇÃO MEDIANTE EXCITAÇÃO DE VIV .....	101
<b>7.</b>	<b>ANÁLISES DE FADIGA .....</b>	<b>110</b>
7.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA .....	110
7.2	MODELO ADOTADO PARA AS ANÁLISES DA PESQUISA.....	110
7.3	MODELO ADOTADO NO ORCAFLEX.....	112
7.4	RESULTADOS PARA A <i>RISER TOWER</i> .....	113
<b>8.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>118</b>
<b>9.</b>	<b>PERSPECTIVAS .....</b>	<b>121</b>
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>122</b>
	<b>ANEXO A: RESULTADOS COMPLEMENTARES DOS PRÉ-TESTES.....</b>	<b>130</b>
A.1	RESULTADOS DO CASO 1 .....	131
A.2	RESULTADOS DO CASO 4 .....	139
A.3	RESULTADOS DO CASO 9 .....	147
A.4	RESULTADOS DO CASO 9 COM MOLA NA EXTREMIDADE SUPERIOR.....	155

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1.1: Riser Tower (Fonte: Adaptada de Stolt Offshore, 2006).</i>	26
<i>Figura 2.1: Riser Tower sujeita aos carregamentos ambientais.</i>	31
<i>Figura 3.1: Detalhe do arranjo submarino do campo de Girassol (Fonte: WU et al., 2008).</i>	33
<i>Figura 3.2: Detalhes das conexões e da cobertura do riser tower (Fonte: Dixon; Bursaux, 2005).</i>	34
<i>Figura 3.3: Esquema das VIV em um trecho de riser, (a) vista em perspectiva e (b) vista de topo (Fonte: Adaptada de Le Cunff et al., 2002 e Facchinetti; De Langre; Biolley, 2003).</i>	38
<i>Figura 3.4: Frequência de resposta adimensional x velocidade adimensional (Fonte: Adaptada de Khalak e Williamson, 1997).</i>	41
<i>Figura 3.5: Variação da Amplitude com o Coeficiente de Massa-Amortecimento Reduzido (Fonte: Adaptada de Williamson e Govardhan, 2004).</i>	42
<i>Figura 3.6: Curva SN padrão (Fonte: Lemos, 2005).</i>	49
<i>Figura 3.7: Esquema típico da curva de propagação de trincas (Fonte: Castro e Meggiolaro, 1999).</i>	51
<i>Figura 4.1: Esquema do sistema de coordenadas do duto (Fonte: Adaptada de Furnes e Sorensen, 2007).</i>	60
<i>Figura 4.2: Esquema das classes para consideração dos carregamentos ambientais.</i>	66
<i>Figura 5.1: Arranjo experimental (Fonte: Adaptada de Chaplin et al., 2005a).</i>	71
<i>Figura 5.2: Envoltória de deslocamento adimensionalizado para a simulação de vibração livre no primeiro modo inline, direção do escoamento.</i>	77
<i>Figura 5.3: Envoltória de deslocamento adimensionalizado para simulação de vibração livre no terceiro modo, direção do escoamento.</i>	77
<i>Figura 5.4: Envoltórias de deslocamento transversal – Caso 1 ou 0,16 m/s. (a) Resultados numéricos. (b) Resultados experimentais.</i>	79
<i>Figura 5.5: Envoltórias de deslocamento longitudinal ao redor da posição média – Caso 1 ou 0,16 m/s. (a) Resultados numéricos. (b) Resultados experimentais.</i>	79
<i>Figura 5.6: Deslocamento médio na direção longitudinal – Caso 1 ou 0,16 m/s. (a) Resultados numéricos. (b) Resultados experimentais.</i>	80

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

