COPPE UFRJ
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES (VIV) EM RISERS DE PERFURAÇÃO

Aaron Amono Matala

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger
José Renato Mendes de Sousa

Rio de Janeiro
Novembro de 2018

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES (VIV) EM RISERS DE PERFURAÇÃO

Aaron Amono Matala

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

_____
Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

_____
Prof. José Renato Mendes de Sousa, D.Sc.

_____
Prof. Murilo Augusto Vaz, PhD.

_____
Dr. Thiago Angelo Gonçalves Lacerda, D.Sc.

_____
Dr. Ricardo Franciss, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO DE 2018

Aaron, Amono Matala.

Análise de Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) em Risers de Perfuração/Aaron Amono Matala. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIV, 96 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

José Renato Mendes de Sousa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p.69-74.

1. Riser rígido. 2. Vibrações induzidas por Vórtices. 3. Fadiga de um riser de perfuração. I. Ellwanger, Gilberto Bruno et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À minha amada esposa Thérèse BIPENDU, aos meus irmãos pelo apoio mesmo à distância e aos meus amados pais que me deram educação e acesso a tudo que lhes foi possível durante suas vidas.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus pelas oportunidades que tive em minha vida de crescimento pessoal e acadêmico.

Aos meus orientadores Gilberto Bruno Ellwanger e José Renato Mendes de Sousa por todo conhecimento compartilhado durante a elaboração dessa pesquisa e também pela paciência na arte de ensinar.

À Cristina Resende pela disponibilização do Pacote SESAN que tem o programa RIFLEX e por estar sempre disposta a nos auxiliar.

Aos professores da COPPE por todo o aprendizado adquirido.

Aos meus familiares por sempre torcerem por mim desde o início dessa caminhada.

A todos que eu amo e com quem, por muitas vezes, tive que estar um pouco ausente, obrigado pela compreensão e apoio.

Aos amigos do Laboratório de Confiabilidade em Estruturas Offshore (LACEO), Ricardo Nunes e Miguel Ibarra, pela convivência agradável, amizade construída e ensinamentos compartilhados.

Aos funcionários do laboratório pela amizade e auxílio em várias etapas dessa pesquisa.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

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

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES (VIV) EM RISERS DE PERFURAÇÃO

Aaron Amono Matala

Novembro/2018

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger
José Renato Mendes de Sousa

Programa: Engenharia Civil

Os *Risers* de perfuração *offshore*, estruturas tubulares de ligação entre os poços e a unidade flutuante, são afetados pelo aumento da lâmina d'água, tendo em vista a baixa relação entre os seus diâmetros e os seus comprimentos totais. A ocorrência de Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) nestas estruturas é um fenômeno que pode causar problemas no funcionamento, na produtividade e pode até ocasionar a ruptura da estrutura por fadiga. Durante a operação, os *Risers* são submetidos a elevados carregamentos estáticos e dinâmicos. Neste sentido, o presente trabalho apresenta resultados da contribuição de alguns parâmetros da análise de VIV na resistência à fadiga desses *Risers*, considerando toda a sua extensão. Busca-se, assim, a determinação do ponto crítico para predição da fadiga considerando o modelo *Riser*/*BOP*/Poço e compreender o comportamento dos modelos desenvolvidos e propor melhorias futuras.

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

ANALYSIS OF VORTEX-INDUCED VIBRATIONS (VIV) ON DRILLING RISERS

Aaron Amono Matala

November/2018

Advisors: Gilberto Bruno Ellwanger
José Renato Mendes de Sousa

Department: *Civil Engineering*

Offshore drilling risers, which are tubular connecting structures between wells and floating units, are affected by the increase in water depth due to the low relation between their diameters and total lengths. The occurrence of Vortex Induced Vibrations (VIV) in these structures is a phenomenon that can cause problems in their functioning and productivity and can even cause the fatigue rupture of these structures. During operation, these Risers are subjected to high static and dynamic loads. In this scenario, the present work presents results of the contribution of some parameters of the VIV analysis in the fatigue resistance of a drilling Riser, considering its whole length. Thus, the determination of the critical point for fatigue prediction considering the Riser / BOP / Well model as well as the understanding of the behavior of the developed models and are sought. Possible improvements of the model are also indicated.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS **V**

SUMÁRIO **VIII**

LISTA DE FIGURAS **X**

LISTA DE TABELA **XII**

LISTA DE ABREVIATURAS E GLOSSÁRIO **XIII**

Introdução **1**

1.1 Aspectos Gerais 1

1.2 Objetivo 2

1.3 Motivação 3

1.4 Escopo do Trabalho 3

Revisão Bibliográfica **4**

2.1. Vibrações Induzidas por Vórtices 5

2.1.1. Conceitos Básicos 5

2.1.2. Noções da Camada Limite 6

2.1.3. Número de Reynolds 6

2.1.4. Formação de Vórtices 8

2.1.5. Número de Strouhal ($\boldsymbol{St}$) 9

2.1.6. Frequência de Excitação 9

2.1.7. Frequência de Vibração e Fenômeno *Lock-in* 10

2.1.8. Velocidade Reduzida 10

2.1.9. Amplitude de vibração Adimensional 11

2.1.10. Supressores de Vórtices 11

2.2. Análise de VIV 11

2.3. Sistema de Perfuração/Produção Offshore 14

2.3.1 *Riser*s de Perfuração/completação/Produção 14

2.3.2 Poços 18

2.3.2.1 Classificação de Poços de Petróleo 19

2.3.3 O LMRP 20

2.3.4 BOP 21

2.3.5 Fluido de Perfuração 22

2.3.6 Sistema *Riser* de Perfuração. 23

2.4 O Sistema de Tracionamento 24

2.4.1 Tracionadores de Cabo de Aço 25
2.4.2 Tracionadores por Ação Direta 28
2.5 Carregamentos exercidos sobre o Sistema de Perfuração Offshore 29
2.5.1 Forças das Correntes marinhas 30
2.5.2 Interações Solo-Riser e as Curvas P-y, T-z e Q-z 31

Fadiga 32
3.1 Conceitos Básicos 32
3.2 Carregamentos 32
3.2.1 Carregamento com Amplitude Constante 33
3.2.2 Carregamento com Amplitude Variável 34
3.3. Curvas S-N 34
3.4. Dano por Fadiga e Regra de Palmgren-Miner 36

Estudo de caso 37
4.1 Caso do *Riser* Rígido de Perfuração 37
4.1.1 Configurações do *Riser* de Perfuração 39
4.1.2 Dados de Entrada (INPMOD) 39
4.1.3 Resultados do Modelo 43

Conclusão 64
5.1. Conclusões 64
5.2 Propostas para Trabalhos Futuros 67

Referências Bibliográficas 69

Anexo I 75

Anexo II 80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Relação entre nº de Reynolds e Formação da esteira de vórtices 7
Figura 2. 2 – Escoamento ao longo de um Cilindro Fonte: (LOPES, 2006) 8
Figura 2. 3 – Par de vórtice simétricos Fonte: (LOPES, 2006) 8
Figura 2. 4 – Intervalo da região de Lock-in. Fonte: (BLEVINS, 1994) 10
Figura 2. 5 – Seis possíveis perfis de corrente (FRANCISS, 1999) 12
Figura 2. 6 – Configuração em *Lazy-Wave e* Configuração em *Lazy-S* Fonte: (TAKAFUJI, 2010). 15
Figura 2. 7 – Configuração em *Steep-Wave*e Configuração em *Steep-S* Fonte: (TAKAFUJI, 2010). 15
Figura 2. 8 – Configuração em catenária e Configuração híbrida Fonte: (TAKAFUJI, 2010) 15
Figura 2. 9 – *Riser* com Configuração Vertical Fonte: (TAKAFUJI, 2010). 16
Figura 2. 10 – *Riser* rígido Fonte: (RUBIN, 2006) 16
Figura 2. 11 – *Riser* flexível Fonte: (RUBIN, 2006) 17
Figura 2. 12 – O poço de extração de petróleo. Fonte: Petrobras 18
Figura 2. 13 – Classificação de poços quanto ao percurso 20
Figura 2. 14 – O *LMRP* Fonte: Petrobras 21
Figura 2. 15 – O *BOP* (Blowout Preventer) Fonte: Petrobras 22
Figura 2. 16 – O *Riser* de perfuração com flutuadores. Fonte: Petrobras 24
Figura 2. 17 – Arranjo de tracionadores compondo um sistema de tracionamento acoplado a um *riser* de perfuração Fonte: (DYNGVOLD,2011) 24
Figura 2. 18 – Tracionador de cabo de aço com acumulador ar/óleo de alta pressão 26
Figura 2. 19 – Tracionador de cabo de aço com acumulador ar/óleo de baixa pressão e ar no circuito de alta pressão (usado com permissão da *Retsco Internacional*) 26
Figura 2. 20 – Tracionador de cabo de aço com acumulador ar/óleo de alta e de baixa pressão 27
Figura 2. 21 – Tracionador de cabo de ação direta 28
Figura 2. 22 – Carregamento sobre o sistema de perfuração. 29

Figura 3. 1 – Exemplo de um carregamento com amplitude constante (BRANCO, 1986) 33
A partir do valor do parâmetro R, podemos classificar as solicitações conforme Figura 3. 2. 34
Figura 3. 2 – Classificação de solicitações segundo o valor de R (BRANCO, 1986) 34
Figura 3. 3 – Exemplo de um carregamento com amplitude variável (BRANCO, 1986)
Erro! Indicador não definido.

Figura 4. 1 – Descrição esquemática dos segmentos do *Riser* 38
Figura 4. 2 – Modelos sem o Condutor 48
Figura 4. 3 – Modelos com Condutor e sem Molas 50
Figura 4. 4 – Modelos com condutor e com as molas 51
Figura 4. 5 – Relação parâmetro de excitação com a Frequência Adimensional 54
Figura 4. 6 – Amplitude da resposta do modo dominante para CF caso 1 57

LISTA DE TABELA

Tabela 4. 1 Dados de entrada do *Riser* 40

Tabela 4. 2: Dados da corrente 40

Tabela 4. 3: Descrição dos Tracionadores 41

Tabela 4. 4: Dados para a modelagem do corpo do *Riser* 42

Tabela 4.5: Propriedades das Seções transversais dos segmentos 43

Tabela 4.6: As frequências naturais do *Riser* estudado pelo *RIFLEX* 45

Tabela 4.7: Resultados das Frequências (em s) e Períodos naturais (em s) 46

Tabela 4. 8: Resultados das Frequências (em s) e Períodos naturais (em s) corrigidos 47

Tabela 4. 9: Frequências (em s) e Períodos Naturais (em s) do *Riser* sem condutor 49

Tabela 4. 10: Períodos naturais (em s) com Condutor e sem molas 50

Tabela 4. 11 Períodos Naturais (em s) do *Riser* 51

Tabela 4. 12: Características numéricas das linhas 52

Tabela 4. 13: As Condições de Contorno do *Riser* 53

Tabela 4. 14: As Frequências do Modelo 56

Tabela 4. 15: Comprimento de excitação para CF caso 1 58

Tabela 4. 16: Síntese das VIV *Cross-flow* 61

Tabela 4. 17: Síntese das VIV *In-line* 61

Tabela 4. 18 – Parâmetros as curva S-N para a curva F1. 62

LISTA DE ABREVIATURAS E GLOSSÁRIO

ANP – Agência Nacional de Petróleo

API – *American Petroleum Institute*

BOP – Blowout preventer.

CHOKE – Operação de restrição do fluxo advindo de um poço petrolífero.

COMPLETAÇÃO – É a operação executada após a perfuração, que visa iniciar ou garantir produção de um poço.

DNV – Det Norske Veritas

DP – *Dynamic Positioning*. Sistema de posicionamento de embarcações por meio de propulsores controlados por computador.

E&P – Exploração e Produção.

FLEXJOINT – Junta flexível composta por camadas de aço e elastômeros com o intuito de prover baixa rigidez flexional a um ponto especifico de um *riser*.

FPSO – Floating Production Storage Offloading

ISO – *International Organization of Standardization*

JUNTA TELESCÓPICA – Estrutura constituinte de um riser de perfuração composta por dois elementos tubulares concêntricos que podem se deslocar um em relação ao outro no eixo longitudinal.

KILL – Operação de amortecimento de fluxo advindo de um poço petrolífero.

LMRP – *Lower Marine Riser Package*. Equipamento que realiza o controle do BOP.

MARINTEK – *Norwegian Marine Technology Research Institute*

MEF – Método de Elementos Finitos

MODU – *Mobile Offshore Drilling Unit*. São embarcações móveis dotadas de equipamentos para a perfuração de poços marítimos.

NTUN – *Norwegian University of Science and Technology*.

OFFSET – Deslocamento no plano horizontal de uma embarcação em relação ao prolongamento vertical de um poço submarino.

PUP JOINT – Estrutura tubular curta utilizada para ajustar o comprimento do riser de perfuração ao comprimento desejado.

RAO – *Response Amplitude Operator*. É a função de transferência que relaciona a amplitude de onda incidente em uma embarcação à resposta dinâmica da mesma.

RECOIL – Fenômeno que ocorre logo após a desconexão de um riser, gerando uma resposta dinâmica transiente.

RISER – Estrutura tubular que conecta uma unidade flutuante ao leito marinho.

RISER DE PERFURAÇÃO – *Riser* utilizado em operações de perfuração de poços marítimas

RPM – Rotações por minuto

TIE-BACK – É a operação de conexão do *riser* na cabeça do poço no fundo do mar à extremidade inferior do *riser* é usado um conector hidráulico denominado de H4

TLP – *Tension Legs Platforms*

UF – Unidade Flutuante

VIV – Vibrações Induzidas por Vórtices

1

Introdução

1.1 Aspectos Gerais

A exploração e produção de petróleo estão dentre as atividades mais importantes no cenário socioeconômico mundial. Na década de 1970, o crescimento da indústria *offshore* tornou-se interessante pela grande variabilidade das estruturas e dos sistemas de produção de petróleo, que promoveram um desenvolvimento tecnológico muito importante das operações em águas rasas. A procura mundial por petróleo e gás aumentou nos anos seguintes, o que impulsionou grandes companhias na busca das reservas de petróleo em águas de até 3000 metros de profundidade.

No Brasil, segundo dados fornecidos em 2009 pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, a produção de petróleo no mar no ano de 2008 foi cerca de 105 milhões de metros cúbicos, o que gerou um aumento de aproximadamente 90% da produção nacional. Estes fatos e acontecimentos são responsáveis pelo impulso na busca de desenvolvimento de novas tecnologias com soluções viáveis para sistemas de perfuração e produção marítimos.

Porém, este aumento da profundidade de extração de petróleo levou a novos problemas e desafios a serem resolvidos. Dentre eles, a instabilidade de estruturas submarinas no processo de perfuração devido ao seu peso próprio, e problemas também no transporte do óleo, do poço até a unidade flutuante, sob ação de vibrações induzidas por vórtices. Alguns dos componentes críticos do sistema marítimo de produção mais afetados pelo fenômeno são os *Risers*. Os *Risers*, estruturas tubulares de ligação entre os poços de extração (ou leito marinho) e a unidade flutuante, são as mais afetadas por este problema, tendo em vista à baixa relação entre o seu diâmetro e o seu comprimento total. Durante a operação, os *Risers* são submetidos a elevados carregamentos estáticos e dinâmicos oriundos do seu peso próprio e ações ambientais..

1.2 Objetivo

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo principal o estudo e análise de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices, agindo sobre um *Riser* rígido de perfuração, mediante análises e simulações feitas a partir de um modelo computacional no domínio da frequência.

Tendo em vista o interesse do melhor entendimento e descrição do fenômeno de vibrações induzidas por vórtices, responsáveis de vários problemas estruturais em um sistema de produção offshore, certos objetivos precisaram ser alcançados, dentre eles:

- Realização de um estudo comparativo das frequências naturais do *Riser* de perfuração, determinadas a partir de três métodos diferentes; Método de Elementos Finitos (MEF-*RIFLEX*), Método Matricial com Pórtico espacial (MathCAD) e Método Analítico Iterativo (MathCAD), a fim de comprovar a adequação e a exatidão dos resultados do Modelo no programa *RIFLEX*.
- Investigar a variação dos esforços axiais ao longo de toda a extensão do *Riser* de perfuração e seus efeitos no conjunto LMRP-BOP-CONDUTOR. Este conjunto de três elementos, fica na extremidade do *Riser* no fundo do mar, onde o LMRP (*Low Marine Riser Package*) fica em cima do BOP (*Blowout Preventer*) e este último é conectado na cabeça do condutor. Por ser um conjunto onde podem ocorrer vários fenômenos que podem prejudicar o funcionamento do mesmo, atenção especial foi dedicada nesta região..
- Investigar os parâmetros que influenciam o fenômeno de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices na dinâmica da resposta da estrutura.
- Apresentar os resultados de análise da dinâmica da resposta do *Riser* no domínio da frequência, avaliando seu comportamento em função da excitação promovida pelas VIV. A resposta é dominada pelos modos de vibração que serão utilizados como parâmetros principal para avaliação.

Foi realizado um estudo dos resultados das análises estática, dinâmica e avaliação do dano estrutural por fadiga com intuito de determinar as regiões mais críticas sujeitas à fadiga com enfoque no conjunto LMRP-BOP-CONDUTOR.

1.3 Motivação

A maior motivação da pesquisa é de estudar foi a de identificar/analisar as regiões de maior dano de um *Riser* de perfuração com foco no conjunto LMRP-BOP-Condutor com base no modelo do *Riser* do exemplo da norma API ISO/TR 13624-2.

Escolhemos focar neste conjunto pelo fato de ser uma região crítica suscetível ao fenômeno *recoil*, que é a desconexão de emergência do *Riser* em caso de necessidade, e que pode se originar a partir da vibrações provocadas pelas VIV.

Os programas computacionais como *RIFLEX*, *HydroD* e *SIMA* auxiliaram a entender melhor o fenômeno, realizar uma interpretação adequada dos resultados e fazer um estudo comparativo do mesmo modelo com outros analisados no programa MatchCAD ou outros programas comerciais.

1.4 Escopo do Trabalho

O presente trabalho se divide em sete capítulos apresentados a seguir.

No capítulo 1, é feita uma introdução do objeto de estudo, assim como a metodologia empregada e a descrição sumária de cada capítulo da dissertação.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos de perfuração, o riser e seus acessórios ou conexões.

No capítulo 3, encontra-se o embasamento teórico matemático sobre as Vibrações Induzidas por Vórtices e seus conceitos que serão considerados no desenvolvimento da presente pesquisa.

No capítulo 4, será apresentada a configuração do riser a ser estudado com base nas propriedades fornecidas pela norma ISO/TR 136234-2.

No capítulo 5, são apresentados os conceitos básico de fadiga, carregamentos e o cálculo da vida útil de uma estrutura, a partir de uso da Regra de PALMEGREN-MINER.

O capítulo 6, é dedicado ao estudo de caso onde são elaboradas as modelagens do *Riser* e da Unidade Flutuante, as análises dinâmicas, estáticas e de fadiga com intuito de analisar a resposta dinâmica da estrutura no domínio do tempo e da frequência.

No capítulo 7, são feitas as discussões e apresentadas as conclusões sobre a pesquisa e sugestões de trabalhos futuros.

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, serão apresentados alguns aspectos e conceitos básicos envolvidos no estudo das Vibrações Induzidas por desprendimento de Vórtices e seu impacto na vida útil das estruturas e linhas de produção offshore, submetidas às correntes marinhas. Em seguida, serão apresentados também os Sistemas de Produção de Petróleo, além de um comentário sobre as cargas ambientais, os tracionadores e o tipo de solo que serão utilizadas na nossa pesquisa.

2.1. Vibrações Induzidas por Vórtices

2.1.1. Conceitos Básicos

As vibrações induzidas por desprendimento de vórtices correspondem às principais causas responsáveis por danos ou falha por fadigas em várias partes do riser, em especial na região de contato entre o solo e a estrutura. As vibrações induzidas por vórtices são originadas principalmente por correntes marinhas. Porém, a ação das ondas pode resultar eventualmente em VIV diretamente no *Riser* e, indiretamente, quando impõe movimentos na unidade flutuante..

As vibrações induzidas por desprendimento de vórtices desde os tempos antigos eram provocadas por ventos em cordas esticadas de uma harpa. No ano 1878, Strouhal descobriu que a frequência destas vibrações é proporcional à velocidade do vento e inversamente proporcional à espessura do arame. Em 1908, Bernard correlacionou estas vibrações com a formação dos vórtices que por sua vez foram descritos como percorrendo caminho estável por Theodore von Karman em 1912.

Dada á complexidade no entendimento e representação, os pesquisadores têm buscado modelos adequados que representem melhor este fenômeno de vibrações induzidos por vórtices.

Existem duas direções de vibrações da estrutura quando está submetida às vibrações induzidas por vórtices, na direção da corrente (*In-line*), ou na direção perpendicular à direção da corrente (*Cross flow*).

Para o melhor entendimento deste fenômeno de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices é preciso um estudo e domínio suscinto de certos parâmetros que são responsáveis por influênciar a ocorrência destas vibrações (LOPES, 2006);

2.1.2. Noções da Camada Limite

A noção da camada limite pode ser entendida a partir do experimento de Prandtl, ao observar um fluido de pequena viscosidade passar por um obstáculo, que resulta na formação da camada limite junto a este obstáculo. Nisso, pode se observar a variação da velocidade do fluido nesta camada, desde o valor nulo, junto à parede do obstáculo, até um valor característico no interior do fluido. Portanto, há um escoamento rotacional dentro da camada limite provocada pela variação da magnitude da velocidade transversal na direção do escoamento. Com isso, a camada limite se desprende do obstáculo a partir de certas velocidades, formando uma esteira de vórtices.

2.1.3. Número de Reynolds

O número de Reynolds é uma quantidade adimensional que representa a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas em um escoamento. Este número adimensional é usado também para caracterizar a natureza do regime de escoamento do fluido, como mostra a Figura 2.1.

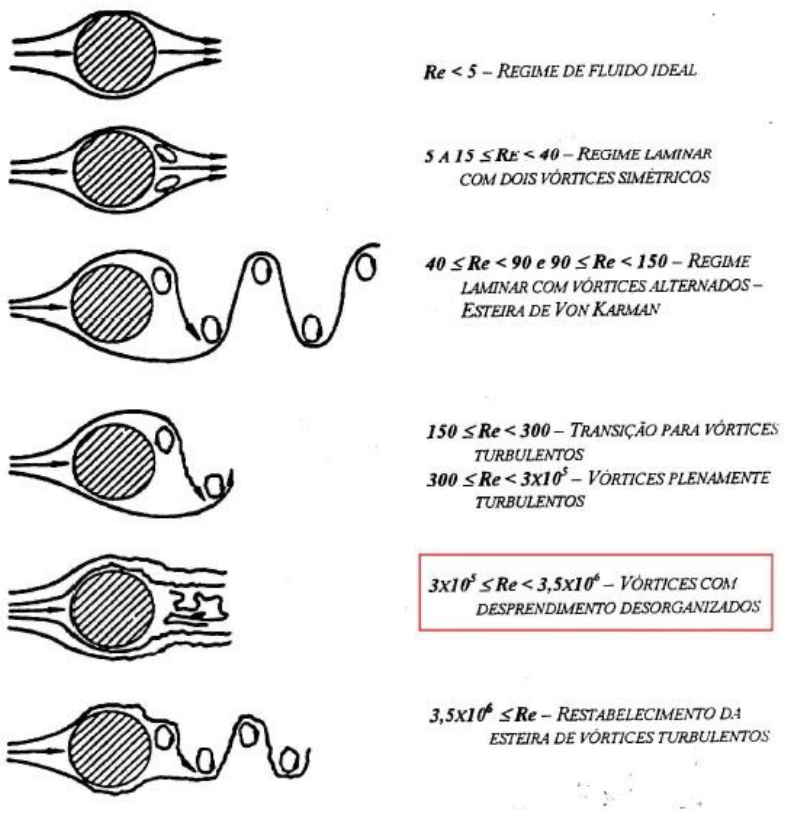

Figura 2. 1 – Relação entre nº de Reynolds e Formação da esteira de vórtices

Fonte: (Von Karman, 1912)

Considerando um cilindro no eixo perpendicular ao fluxo, este número adimensional pode ser escrito como:

$$Re = \frac{U.D}{\nu} \tag{2.1}$$

onde:

U: velocidade do fluido

D: diâmetro hidrodinâmico do cilindro

ν: viscosidade cinemática do fluido

Na maioria dos casos de estruturas Offshore esbeltas sujeitas às VIV, o número de Reynolds encontra-se em torno de 10^5 Nesta faixa, do número de Reynolds, a formção de vórtices ocorre de forma desorganizada.

2.1.4. Formação de Vórtices

Considerando um cilindro posicionado de forma transversal ao fluxo onde as pressões são variáveis, e com base na figura 2.2, podemos observar que a variação da velocidade do fluido entre A e B aumenta enquanto ela diminua entre B e C. A partir da equação de Bernoulli, podemos afirmar também que o gradiente de pressão é favorável entre A e B (pressão decrescente) e desfavorável entre B e C (pressão crescente). Quando a equação de Bernoulli é aplicada, verifica-se que a velocidade se torna inversamente proporcional à pressão; com isso o vórtice surge devido às diferenças de pressão e velocidade. O fluido tende a equilibrar o sistema, migrando da região de maior para menor pressão.

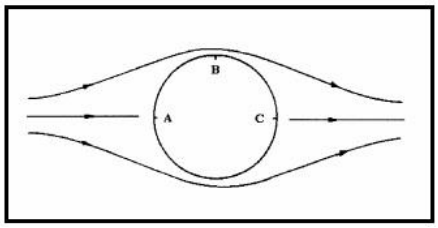

Figura 2. 2 – Escoamento ao longo de um Cilindro Fonte: (LOPES, 2006)

Como foi dito anteriormente, a energia cinética acumulada entre os pontos A e B tem que ser suficiente para vencer o gradiente desfavorável da pressão (pressão crescente) entre os pontos B e C. Caso isso não ocorra, o gradiente desfavorável permanece e provoca o deslocamento da camada limite até um ponto conhecido como ponto de separação, e isso resulta na inversão do escoamento que acaba gerando um par de vórtices simétricos a jusante do cilindro como apresenta a figura a seguir;

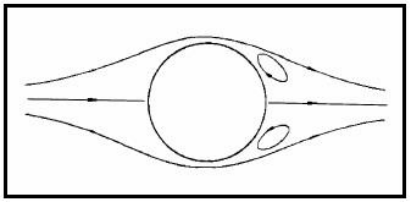

Figura 2. 3 – Par de vórtice simétricos Fonte: (LOPES, 2006)

2.1.5. Número de Strouhal (S_t)

A partir de vários experimentos observou-se a existência de uma constante chamada de número de Strouhal (S_t). O número de Strouhal é uma constante adimensional de proporcionalidade utilizada no cálculo da frequência de *Shedding* ou frequência de desprendimento de vórtices. Esta constante é calculada da seguinte forma:

$$(S_t) = \frac{f_s.U}{D} \tag{2.2}$$

onde:

f_s: frequência de desprendimento de vórtices em Hz

U: velocidade do escoamento do fluido

D: diâmetro do cilindro

O número de Strouhal depende também do regime de escoamento, ou seja, do número de Reynolds..

2.1.6. Frequência de Excitação

A frequência de excitação $\omega_s\ em\ rd/s$ é dada pela seguinte expressão:

$$\omega_s = 2.\pi.\frac{S_t.U}{D} \tag{2.3}$$

onde:

S_t: número de *Strouhal*

U: velocidade do escoamento do fluido

D: diâmetro do cilindro

2.1.7. Frequência de Vibração e Fenômeno *Lock-in*

O fenômeno de *lock-in ocorre* quando a frequência de excitação se aproxima de uma das frequências naturais da estrutura. As frequências naturais podem sofrer alterações nos seus valores devido a variações da massa adicionada quando a frequencia de ~desprendimento de vórtices se aproxima de uma das frequências naturais do riser.

A Figura 2.4 a seguir apresenta a relação entre a amplitude adimensional de vibração com a razão entre as frequências de vibração e de *Shedding*.

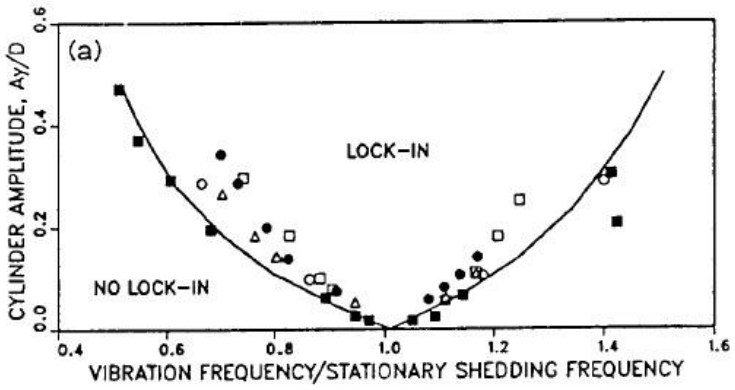

Figura 2. 4 – Intervalo da região de Lock-in. Fonte: (BLEVINS, 1994)

2.1.8. Velocidade Reduzida

A velocidade reduzida (V_R) é uma quantidade adimensional que delimita a região de vibrações devidas ao desprendimento de vórtices. Ela é um dos parâmetros que associam as condições ambientais com o comportamento estrutural de um duto.

$$V_R = \frac{U}{f_n . D} \tag{2.4}$$

onde:

f_n : frequência natural Hz

U: velocidade do escoamento do fluido em m/s

D: diâmetro hidrodinâmico da estrutura em m

2.1.9. Amplitude de vibração Adimensional

A amplitude de vibração adimensional é um parâmetro que relaciona a amplitude de vibração com o diâmetro da estrutura. Ele é muito utilizado nas análises de VIV para avaliar o deslocamento máximo da estrutura transversal ao fluxo.

$$\frac{A}{D} \tag{2.5}$$

onde:

A: amplitude máxima do deslocamento

D: diâmetro hidrodinâmico da estrutura

2.1.10. Supressores de Vórtices

O controle do desprendimento de vórtices é de grande importância na área de engenharia. Os supressores de vórtices são dispositivos utilizados para reduzir as vibrações causadas pelas vibrações induzidas por desprendimento de vórtices uma vez que o dano à fadiga por elas provocado pode inviabilizar o projeto. No caso do riser analisado neste trabalho, não foram utilizados supressores de vórtices.

2.2. Análise de VIV

Introdução

Como já foi mencionado anteriormente, a passagem de um fluido por um cilindro pode gerar vibrações tanto no sentido do fluxo (VIV *In-line*), quanto no sentido perpendicular ao fluxo (VIV *Cross-flow*). Portanto, os deslocamentos gerados por estas vibrações são usualmente representados pela amplitude adimensional, que é a razão entre a amplitude máxima do deslocamento transversal e o diâmetro hidrodinâmico da estrutura (A/D). Esta amplitude em vários casos é utilizada em análise como um parâmetro importante para prever o dano à fadiga na estrutura. Por isso, a presente pesquisa pretende analisar este fenômeno levando em consideração não somente a amplitude adimensional, mas, também outros parâmetros como; massa adicional, velocidade reduzida, etc., para representar melhor o fenômeno com enfoque no conjunto *LMRP-BOP*-Condutor.

Atualmente, existe diversos modelos de análise de VIV desenvolvidos e ainda em estudo, os quais apresentam grandes diferenças nos resultados para os casos reais (LARSEN, 2001). Essas diferenças fazem com que alguns destes modelos sejam mais indicados para determinados casos e estruturas. Alguns modelos conseguem calcular a resposta somente no plano no fluxo: VIV *In-line* e outros somente no plano transversal ao fluxo: VIV *Cross-flow*. Os dois tipos de VIV são em maior parte, responsáveis das falhas por fadiga em estruturas esbeltas tipo risers e dutos submarinos em vãos livres.

Pode-se observar um grande avanço tecnológico na indústria petrolífera no sentido de desenvolver ferramentas computacionais capazes de analisar este fenômeno com intuito de diminuir as incertezas relacionadas ao fenômeno de VIV. Para tanto, muitos ensaios em tanques de prova em medições foram realizadas nos últimos vinte anos com o objetivo de se determinar coeficientes e parâmetros que alimentem este programas computacionais.

Dos programas de análise de VIV mais difundidos, destacam-se o programa Shear7 e o programa VIVANA, ambos no domínio da frequência, sendo que nesta dissertação, foi utilizado o programa VIVANA da DnV.

a) Análise no Domínio da Frequência

Os dois modelos de análise de vibrações induzidas por vórtices no domínio da frequência citados anteriormente admitem de uma forma simplificada somente carregamentos de corrente marinha em um plano.. As correntes marinhas podem ser total ou parcialmente uniformes,, total e parcialmente triangulares ou parte uniforme e parte triangular (Figura 2.5) .

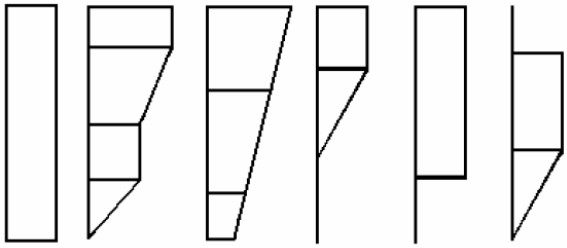

Figura 2. 5 – Seis possíveis perfis de corrente (FRANCISS, 1999)

Além destes dois programas computacionais no domínio da frequência, existem outros modelos matemáticos implementados para a análise de Vibrações Induzidas por vórtices: :

- Modelos de Análise no Domínio do tempo
- Modelos Duais (tempo/frequência)

b) Análise no Domínio do Tempo

Os modelos no domínio do tempo levam em conta carregamentos ambientais de correntes marinhas e das ondas considerando quaisquer perfis e direções. Além disso, consideram também os movimentos da UF (Unidade Flutuante) impostos no topo do *Riser* e isso acaba tornando o problema bastante complexo. Mesmo assim, a análise no domínio do tempo apresenta algumas vantagens como a possibilidade de levar em consideração todas as não-linearidades geométricas e físicas da estrutura, mas, precisam de maior esforço computacional. Esstes modelos apresentam um custo computacional elevado, além de apresentar problemas de convergência em várias situações. Entre os programas utilizados para este tipo de análise podemos citar o ORCAFLEX (CARNEIRO, 2007).

c) Modelos Duais

Os modelos duais como diz o nome, são aqueles que empregam análises parcialmente no domínio do tempo e da frequência, com o foco principal do aproveitamento das vantagens do domínio do tempo e da frequência. Aliás, este modelo considera as não linearidades da estrutura e as variações hidrodinâmicas.

Vale ressaltar que tanto o modelo no domínio da frequência quanto ao modelo no domínio do tempo são métodos iterativos. No domínio do tempo, a iteração ocorre a cada passo de carga, com as forças hidrodinâmicas afetando a resposta da estrutura e vice-vers. No domínio da frequência (programa Shear7), a iteração ocorre somente na solução do balanço de energia de excitação e amortecimento: (LOPES, 2006). No caso do programa VIVANA, a iteração ocorre também na solução do balanço de energia de excitação e amortecimento, mas considerando também a variação das frequências naturais devido à variação da massa adicionada..

2.3. Sistema de Perfuração/Produção Offshore

A produção do petróleo no mar requer um conjunto de estruturas conhecido como Sistemas de Perfuração e de Produção *Offshore*. Esses sistemas são compostos basicamente por três componentes principais: a unidade flutuante ou plataforma, os *Riser*s e o sistema de ancoragem.

2.3.1 *Riser*s de Perfuração/completação/Produção

Os *Risers de produção* podem ser definidos resumidamente como dutos que transportam fluidos entre os poços e a plataforma (CORRÊA, 2008), podendo ser classificados de forma simplória de acordo com a sua configuração, material ou funcionalidade:

Classificação quanto à configuração:

De acordo com a sua instalação, podemos classificá-los em vertical, catenária ou complexa (usando flutuadores).

- **Vertical**

É aplicada uma força de tração no topo com a finalidade de manter o *Riser* sempre tracionado, evitando a sua flambagem.

- **Catenária**

Na maioria dos casos, não é aplicada força de tração no topo. As extremidades (topo e fundo) não estão no mesmo alinhamento vertical e a relação EJ / D (rigidez flexional / lâmina d'água) deverá ser pequena.

- **Complexa**

Derivada da configuração em catenária, o *Riser* assume uma geometria em forma de catenária dupla através da instalação de flutuadores ou boias mantidas submersas com poitas.

As figuras a seguir apresentam algumas configurações do *Riser*.

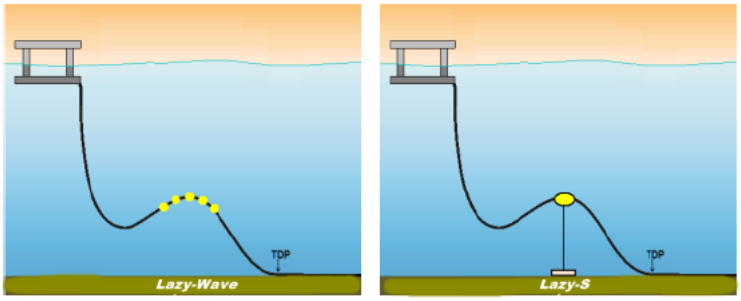

Figura 2. 6 – Configuração em *Lazy-Wave e* Configuração em *Lazy-S*

Fonte: (TAKAFUJI, 2010).

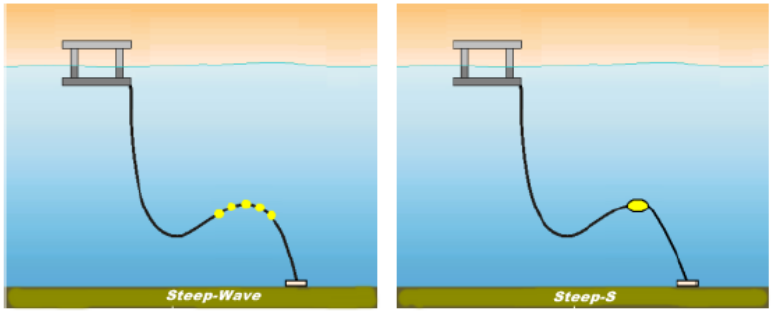

Figura 2. 7 – Configuração em *Steep-Wave*e Configuração em *Steep-S*

Fonte: (TAKAFUJI, 2010).

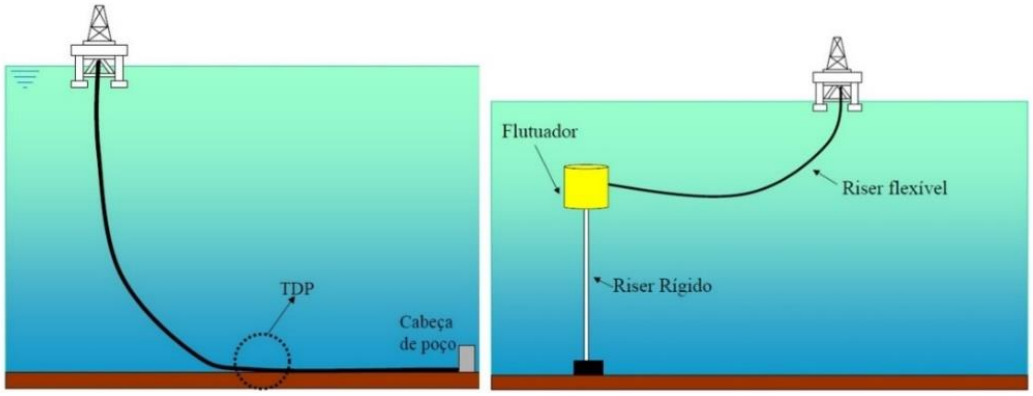

Figura 2. 8 – Configuração em catenária e Configuração híbrida Fonte: (TAKAFUJI, 2010)

.

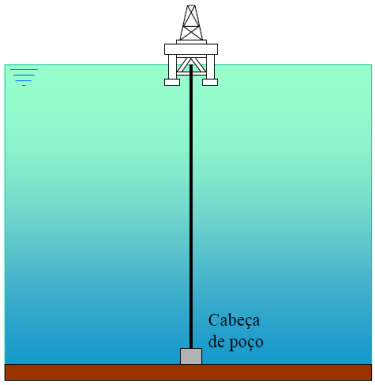

Figura 2. 9 – *Riser* com Configuração Vertical Fonte: (TAKAFUJI, 2010).

Classificação quanto ao material:

De acordo com o material, podemos classificar em rígido e flexível.

- ***Riser* rígido**

Os *Risers* rígidos são constituídos, nas suas maiores partes, de aço, mas poderiam também ser de titânio ou compósitos. Em geral, são instalados na vertical, mas também podem ser instalados em catenária para lâmina d'água profunda (SCR).

Figura 2. 10 – *Riser* rígido Fonte: (RUBIN, 2006)

- ***Riser* flexível**

Os *Risers* flexíveis são compostos por diversas camadas metálicas e poliméricas, cujo conjunto das camadas proporciona resistência e torna a tubulação estanque. Também proporciona proteção contra corrosão e evita a abrasão das camadas metálicas, sem comprometer a sua flexibilidade.

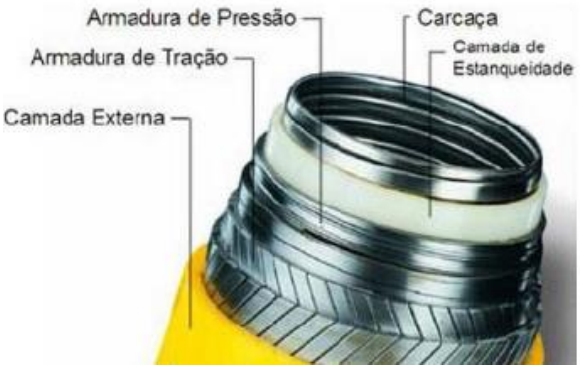

Figura 2. 11 – *Riser* flexível Fonte: (RUBIN, 2006)

Classificação quanto à funcionalidade:

De acordo com a funcionalidade, os *Risers* podem ser classificados em *Risers* de perfuração, de completação, de produção ou de injeção. Entende-se por completação um conjunto de operações realizadas após o término dos trabalhos de perfuração, visando colocar um poço em produção.

- ***Riser*s de perfuração e completação**

Este tipo de *Riser* costuma apresentar uma geometria vertical e o material que o constitui em geral é o aço, mas pode ser de titânio ou compósitos. Este será o tipo de *riser* objeto da nossa pesquisa. O *Riser* de perfuração tem como finalidade abrigar a coluna de perfuração, retornando em seu anular o fluido de perfuração à superfície e trazendo consigo os cascalhos provenientes desta operação. O *Riser* de completação tem como finalidade levar os equipamentos até a zona produtora, afim de que se possa completar um poço. Estas operações são, basicamente, as seguintes: instalação dos equipamentos de segurança para controle do poço; condicionamento do revestimento de produção e do fluido nele contido; verificação da qualidade da cimentação primária realizada pela perfuração (quando da instalação do revestimento de produção); canhoneio(perfurações) na zona de interesse; instalação de equipamentos no interior de poço, para garantir a produção de forma segura e eficiente; instalação dos equipamentos de superfície e indução de surgência (isto é, colocar o poço em produção).

- ***Riser*s de produção ou injeção**

Apresentam em geral geometria em catenária e o material recai nos flexíveis, no entanto, podem ser verticais e em aço quando usamos completação seca, como nas

plataformas “Spar Buoy” ou “TLP”. O *Riser* de produção é o que conduz o petróleo bruto do poço à superfície, para ser separado em óleo, gás e água.

O principal objetivo e as aplicações de um *Riser* são os seguintes:

- Conectar poços de petróleo no fundo do mar à plataforma de perfuração ou produção na superfície;
- Conduzir fluidos ou ferramentas na perfuração, completação e intervenção em poços;
- Injeção de água ou gás (para manter pressão no reservatório);
- Produção de óleo dos reservatórios;
- Exportação da produção até os terminais.

2.3.2 Poços

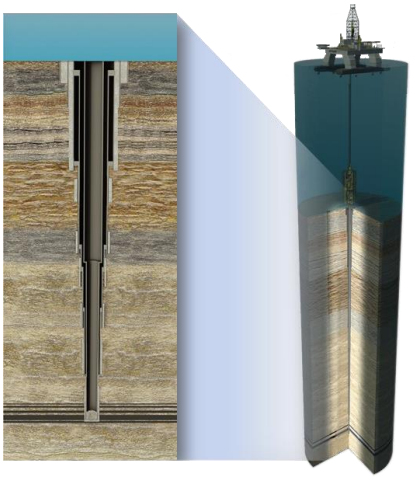

Figura 2. 12 – O poço de extração de petróleo. Fonte: Petrobras

Quando se identifica uma possível localização de óleo ou gás, se começa a planejar a perfuração de um poço pioneiro.

A prospecção é a fase inicial da exploração de óleo e gás onde são realizados diversos estudos para identificação de reservas de petróleo (THOMAS, 2001).

O comprimento normal do condutor seguindo a norma é de 91 m como será apresentado no capitulo 4 na Figura 4.1. Resolvemos nos limitar a uma profundidade de 32 m já que depois desta não haverá maiores efeitos das vibrações. Portanto, no âmbito da nossa pesquisa, a análise de fadiga e alguns parâmetros que influenciam na transferência de vibrações no condutor será focada a uma profundidade de 16 m,

considerada como o ponto médio dentro do poço, com intuito de analisar os efeitos das VIV já que aplicamos algumas molas.

2.3.2.1 Classificação de Poços de Petróleo

Os poços podem ser classificados de três maneiras:

a) Classificação quanto à função

De acordo com a função, podemos classificar em exploratórios, estratigráficos, de extensão, de desenvolvimento ou especiais:

- **Poços Exploratórios –** são aqueles perfurados com finalidade de encontrar e testar reservatórios desconhecidos;
- **Poços Estratigráficos –** quando o objetivo é obter dados do poço e seu conteúdo para futuras programações e análise específica;
- **Poços de extensão** – são aqueles perfurados nos limites de um campo produtor na esperança de expandir as fronteiras do campo;
- **Poços de desenvolvimento –** quando há perfuração de novos poços de produção ou de injeção em um campo que já está produzindo;
- **Poços Especiais -** quando são utilizados para alívio de pressão ou para injeção de fluidos.

b) Classificação quanto à produtividade

De acordo com a produtividade, podemos classificar em poço seco, subcomercial e comercial:

- **Poço Seco –** quando se perfura um poço exploratório e não se encontra nenhuma formação de óleo ou gás;
- **Poço Subcomercial** – quando se encontra uma quantidade economicamente inviável de hidrocarbonetos;
- **Poço Comercial –** quando se encontra uma quantidade de óleo ou gás que viabiliza técnico-economicamente o desenvolvimento do campo.

No caso do poço seco ou subcomercial, o poço fatalmente deverá ser abandonado e vedado de cimento, prevenindo assim o fluxo ou vazamento para a superfície, protegendo o material e a água existente no subsolo.

A tecnologia aumentou muito a taxa de sucesso na busca de depósitos comerciais de óleo ou gás. Nos EUA, por exemplo, os poços secos ainda representavam 13% de todas as perfurações no ano de 2003. Mas quando se compara esse valor com os 37% obtidos em 1973, 32% em 1983 e 26% em 1993, percebe-se a evolução significativa. Em se tratando apenas dos poços exploratórios, o avanço tecnológico foi responsável pela redução dos índices de poços secos de 78%, em 1973 para 53% em 2003. O uso de melhores técnicas de sísmica e perfuração faz com que seja necessário perfurar cada vez menos poços para aumentar o suprimento mundial de óleo e gás.

c) Classificação quanto à profundidade

De acordo com a profundidade, podemos classificar em:

- Raso (<1500 m);
- Médio (1500-2500 m);
- Profundo (>2500 m)

d) Classificação quanto ao percurso

De acordo com o percurso, podemos classificar em vertical, direcional, horizontal e lateral como pode se ver pela figura 2.13

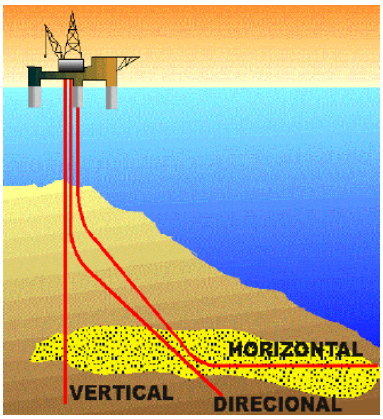

Figura 2. 13 – Classificação de poços quanto ao percurso

2.3.3 O LMRP *(Lower Marine Riser Package)*

É um sistema de controle conectado sobre o *BOP* que envia comandos (por impulsos elétricos ou hidráulicos) para o mesmo.O *LMRP* fica localizado entre o *BOP* e o *riser* de perfuração, sendo este o responsável pela desconexão dos mesmos. Além disto, *o LMRP* controla as funções do *BOP* por meio do *controlpod*. Tubos flexíveis permitem o fluxo de lama ao redor da junta flexível para as linhas de *choke* e *kill*.

O *LMRP* é composto por um adaptador do *Riser* (*riser adapt*), juntas flexíveis, *subsea controlpod* e conector hidráulico – que faz a conexão do *Riser* de perfuração ao BOP –, podendo ou não ter um ou dois *BOP* anulares. (TAKEDA, 2008).

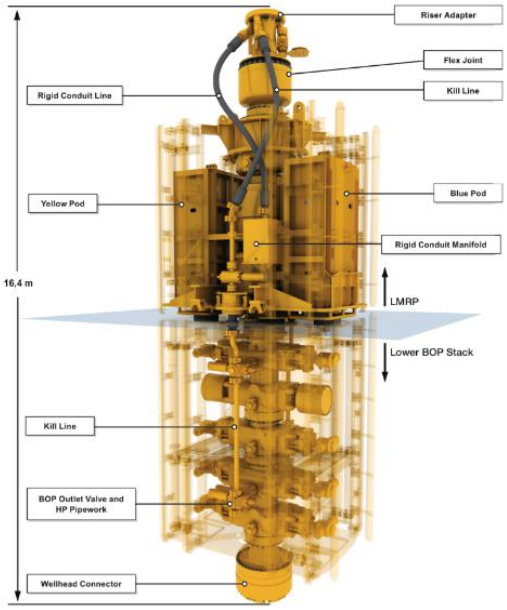

Figura 2. 14 – O *LMRP* Fonte: Petrobras

O conjunto completo do *BOP* é montado em uma grande estrutura que pode pesar até 200 toneladas no ar. Em caso de emergência, uma vez fechado o poço, é possível desacoplar a parte superior do *BOP* chamada de *LMRP*.

Nessa seção estão os módulos de controle, que são alimentados por um umbilical eletro hidráulico que corre ao longo da superfície externa do *riser* até os painéis de controle na plataforma, (MOREIRA, 2003).

2.3.4 BOP *(Blowout Preventer*)

É um dos equipamentos mais importantes do sistema de perfuração. O *BOP* é o equipamento de segurança usado para controlar as pressões no interior do poço durante a operação de perfuração e circular o *kick* quando houver ocorrência. O *kick* é um fenômeno que pode ocorrer durante a perfuração, quando o poço de petróleo alcança uma formação de pressão anormalmente alta. O diferencial de pressão entre o poço e a formação causa o influxo de fluido da formação para dentro do poço e aumenta a sua pressão de fundo, se não controlado apropriadamente, pode resultar no escoamento descontrolado de fluidos do poço para a superfície, induzindo um *blowout*.

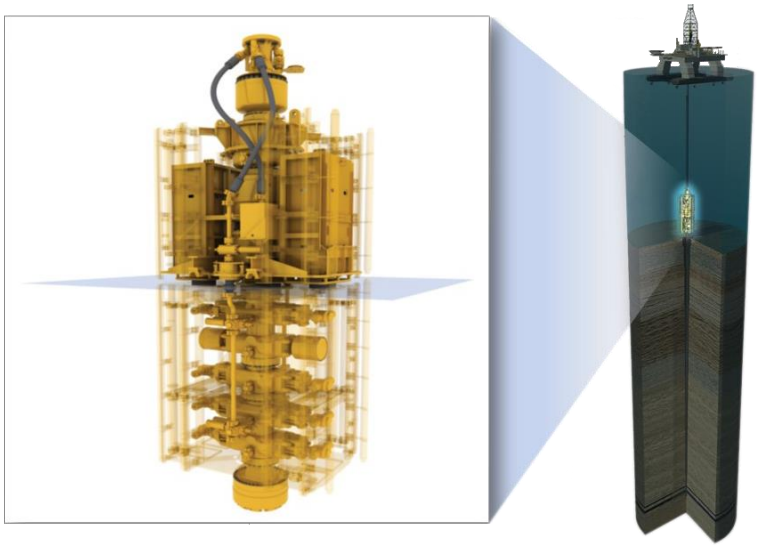

Figura 2. 15 – O *BOP* (Blowout Preventer) Fonte: Petrobras

O BOP é formado por um conjunto de válvulas de gavetas, acopladas umas sobre as outras, com configuração definida para a vedação em torno das diversas colunas de trabalho no poço, sendo uma delas denominada de cisalhante. Esta é capaz de cortar a coluna de trabalho e vedar o poço completamente em caso de descontrole. Outra é a válvula anular ou válvula esférica, formada por elemento resiliente e capaz de vedar ao redor de diferentes diâmetros de tubo. O *BOP* permite a inserção de tubos com a válvula fechada com determinada pressão.

2.3.5 Fluido de Perfuração

Como mencionado anteriormente, vemos que uma das funções de um fluido de perfuração é limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca, levando-os até a superfície.

Analisando ainda o processo rotativo de perfuração, podemos acrescentar que o fluido de perfuração tem como outra função exercer uma pressão hidrostática em frente às rochas perfuradas, de forma a evitar o fluxo de fluidos indesejáveis para dentro do poço, e evitando o desmoronamento de suas paredes.

Para que um fluido de perfuração, comumente chamado de lama de perfuração, desenvolva as funções citadas anteriormente, ele precisa apresentar certas características (THOMAS, 2001), dentre as quais citamos algumas:

1. Ser bombeável;
2. Possuir capacidade de manter os cascalhos em suspensão mesmo quando o bombeamento for suspenso que caso que os cascalhos não sejam depositados em cima da broca e boa parte da coluna de perfuração;
3. Estabilizar as paredes do poço para que haja facilidade de retirada de coluna de perfuração em caso de parada de bombeio;
4. Não causar reações nas formações atravessadas ou danos às rochas produtoras;
5. Apresentar massa específica suficiente (peso) para evitar fluxos para dentro do poço;
6. Não causar corrosão aos equipamentos;
7. Permitir a separação e a interpretação dos cascalhos retornados à superfície.

No âmbito do nosso trabalho, foi utilizado um fluido de perfuração com massa específica de 100 kg/m³

2.3.6 Sistema *Riser* de Perfuração.

O *Riser* de perfuração *offshore* é um conduto cuja finalidade principal é manter o controle da circulação do fluido no poço durante a perfuração em águas profundas, quando se está utilizando plataformas semissubmersíveis ou navios sonda. O sistema *Riser* de perfuração é composto de *BOP*, *LMRP*, *flexjoint*, *balljoint* e *Riser* de perfuração com ou sem flutuadores dependendo da lâmina de água.

O *Riser* de perfuração, como pode se ver na Figura 2.16, serve de guia para a coluna de perfuração e interliga o *BOP* na cabeça do poço com a sonda de perfuração em constante movimento na superfície. A coluna do *Riser* de perfuração é fixada no topo com *flexjoint* ou *balljoint* na parte inferior da mesa rotativa. O anel de tracionamento que fica no barilete externo, apesar de manter a tração constante no Riser, mas, de fato é o sistema de tracionamento que mantém o Riser de perfuração em tração. O barilete interno já está sobre a compressão. Juntas flexíveis instaladas nas porções inferiores, intermediários e superiores do *Riser*, permitem os seus movimentos de translação e rotação no plano horizontal.

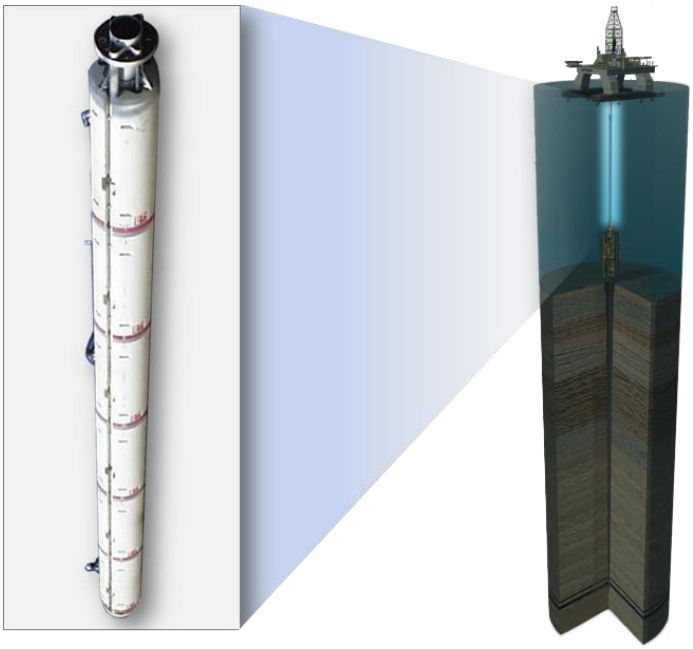

Figura 2. 16 – O *Riser* de perfuração com flutuadores. Fonte: Petrobras

2.4 O Sistema de Tracionamento

O sistema de tracionamento é basicamente composto de um ou mais tracionadores responsáveis pela aplicação da tração de topo do *Riser*, com intuito de assegurar o seu equilibro evitando que ele flambe devido à dinâmica da UF.

Os sistemas de tracionamento são projetados para aplicar tração quase constante ao topo do *Riser* de perfuração. A sua configuração e o número de tracionadores variam dependendo da UF onde é utilizado e do seu fabricante.

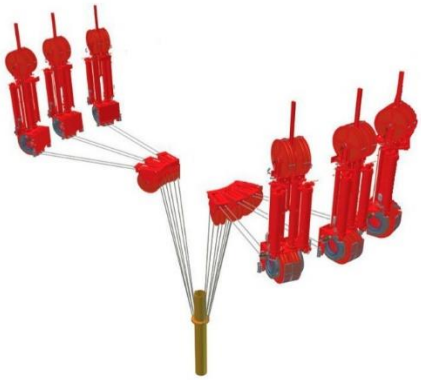

Figura 2. 17 – Arranjo de tracionadores compondo um sistema de tracionamento acoplado a um *riser* de perfuração Fonte: (DYNGVOLD,2011)

Os tracionadores usualmente são de dois tipos: de cabo de aço ou de ação direta. A seguir será descrito em detalhes a composição típica de cada um destes tipos (PESTANA, 2008).

2.4.1 Tracionadores de Cabo de Aço

Tracionadores de cabo de aço são normalmente configurados em uma relação 4:1 entre o comprimento útil do cabo de aço e o curso do cilindro da unidade. Não há nenhuma regulamentação ou norma que exija essa relação 4:1, mas praticamente todos os fabricantes se utilizam desta relação em seus projetos. Um curso de cilindro típico para este tipo de tracionador é 3,81 metros, resultando em 15,24 metros de cabo de aço que podem ser pagos ou recolhidos pela unidade.

A capacidade de carga típica para um tracionador deste tipo varia entre 356 a 1112 kN (80 a 250 kips). Uma embarcação típica possui um número par de tracionadores distribuídos pela sonda, que podem ter seu conjunto de acumuladores individuais ou por pares. As Figura 2.18, 2.19 e 2.20 a seguir, mostram arranjos típicos de tracionadores de cabo de aço.

O tracionador da Figura 2.18 possui ambas as câmaras dos cilindros conectadas ao mesmo acumulador ar/óleo. Logo, em condições estáticas, a pressão em ambos os lados do pistão é a mesma. A tração no cabo de aço nessas condições é dada pela pressão no acumulador multiplicada pela área da haste, uma vez que a pressão atuante no restante da área do pistão é compensada pela pressão atuante no lado oposto. O controle de *recoil* neste tipo de tracionador é feito pelo fechamento da válvula mostrada no item 8 da Figura 2.18. O sistema também possui uma válvula limitadora de velocidade na tubulação de óleo para proteger o sistema contra impactos em caso de uma ruptura do cabo de aço.

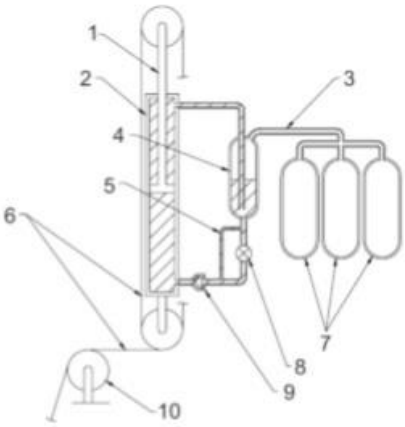

Figura 2. 18 – Tracionador de cabo de aço com acumulador ar/óleo de alta pressão

1- Pistão e Haste
2- Cilindro
3- Tubulação de ar
4- Acumulador ar/óleo de alta Pressão
5- Linha de *by-pass*
6- Cabo de aço
7- Vasos de pressão
8- Válvula *anti-recoil*
9- Válvula limitadora de velocidade
10- Polia

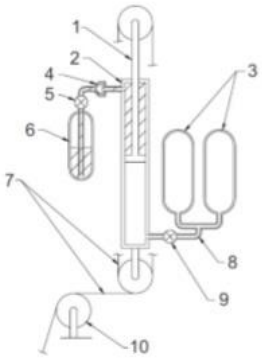

Figura 2. 19 – Tracionador de cabo de aço com acumulador ar/óleo de baixa pressão e ar no circuito de alta pressão (usado com permissão da *Retsco Internacional*)

1- Pistão e Haste
2- Cilindro
3- Vasos de pressão
4- Válvula limitadora de velocidade
5- Válvula *anti-recoil*
6- Acumulador ar/óleo de baixa Pressão
7- Cabo de aço
8- Tubulação de ar
9- Válvula de isolamento
10- Polia

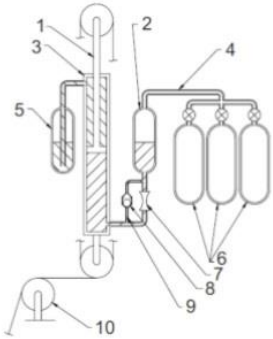

Figura 2. 20 – Tracionador de cabo de aço com acumulador ar/óleo de alta e de baixa pressão

1- Pistão e Haste
2- Acumulador ar/óleo de alta Pressão
3- Cilindro
4- Tubulação de ar
5- Acumulador ar/óleo de baixa Pressão
6- Vasos de pressão
7- Válvula *anti-recoil*
8- Válvula de retenção
9- Linha de *by-pass*
10- Polia

O tracionador da Figura 2.19 possui um acumulador ar-óleo de baixa pressão no lado da haste do cilindro. Ele desenvolve tração no cabo de aço através da diferença entre o produto da alta pressão de ar pela área do pistão e a baixa pressão de óleo pela área anular do conjunto pistão e haste, podendo então possuir menores dimensões que a unidade mostrada na Figura 2.18 para um mesmo valor de tração. Este arranjo usa apenas ar no lado de alta pressão do cilindro, dispensando o uso de um acumulador de alta pressão. O controle de recoil neste tracionador é feito por controle computadorizado das válvulas dos itens 5 e 9 da figura. Uma válvula limitadora de velocidade também é acionada em caso de desconexões de emergência sob altos valores de tração ou falha no cabo de aço.

A Figura 2.20 mostra um tracionador que possui dois acumuladores ar/óleo, um de baixa e um de alta pressão. Este arranjo desenvolve tração no cabo de aço de maneira semelhante ao mostrado na Figura 2.19. Durante uma desconexão de emergência, este sistema fecha a válvula *anti-recoil* para criar um orifício restritivo ao escoamento de óleo, limitando a velocidade de deslocamento do pistão. A válvula de retenção permite o escoamento contornar a válvula *anti-recoil* quando o escoamento ocorre no sentido

inverso. Esta unidade pode isolar também um ou mais vasos de pressão para aumentar a rigidez do sistema, o que pode ser desejável para controle de *recoil*.

2.4.2 Tracionadores por Ação Direta

A Figura 2.21 adiante mostra um tracionador de ação direta. Este tipo de unidade usa um cilindro de curso longo para obter a capacidade necessária de compensação de movimentos, dispensando o uso de cabos de aço. Como esses tracionadores possuem uma relação de curso de 1:1, cada tracionador normalmente é capaz de aplicar uma tração maior ao riser, diminuindo o número de unidades no sistema. A configuração do pistão em relação ao cilindro neste tracionador é invertida em relação às unidades de cabo de aço, fazendo com que a pressão atuante no lado da haste do pistão contribua para a tração desenvolvida pelo sistema. O lado oposto do pistão está normalmente a baixa pressão.

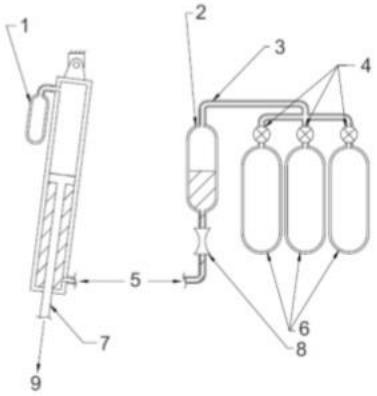

Figura 2. 21 – Tracionador de cabo de ação direta

1- Vaso de baixa pressão com válvula de alívio
2- Acumulador ar/óleo de alta pressão
3- Tubulação de ar
4- Válvula limitadora de velocidade
5- Tubulação de óleo de alta pressão
6- Vasos de pressão
7- Pistão e haste
8- Válvula *anti-recoil*
9- Haste para o anel tracionador

No âmbito do nosso trabalho, foram usados 6 (seis) tracionadores de ação direta que foram modelados no *RIFLEX* como sólidos com seção de cabo considerando as propriedades de cada tracionador isoladamente, o que será explicado no capítulo 4.

2.5 Carregamentos exercidos sobre o Sistema de Perfuração Offshore

Um sistema de perfuração offshore está sujeito a uma variedade de carregamentos ambientais, dos quais, se originam as vibrações induzidas por desprendimento de vórtices. A Figura 2.22 apresenta os carregamentos que têm uma contribuição significativa na geração de fadiga nas estruturas offshore e que são também responsáveis pelas forças dinâmicas no sistema de perfuração offshore.

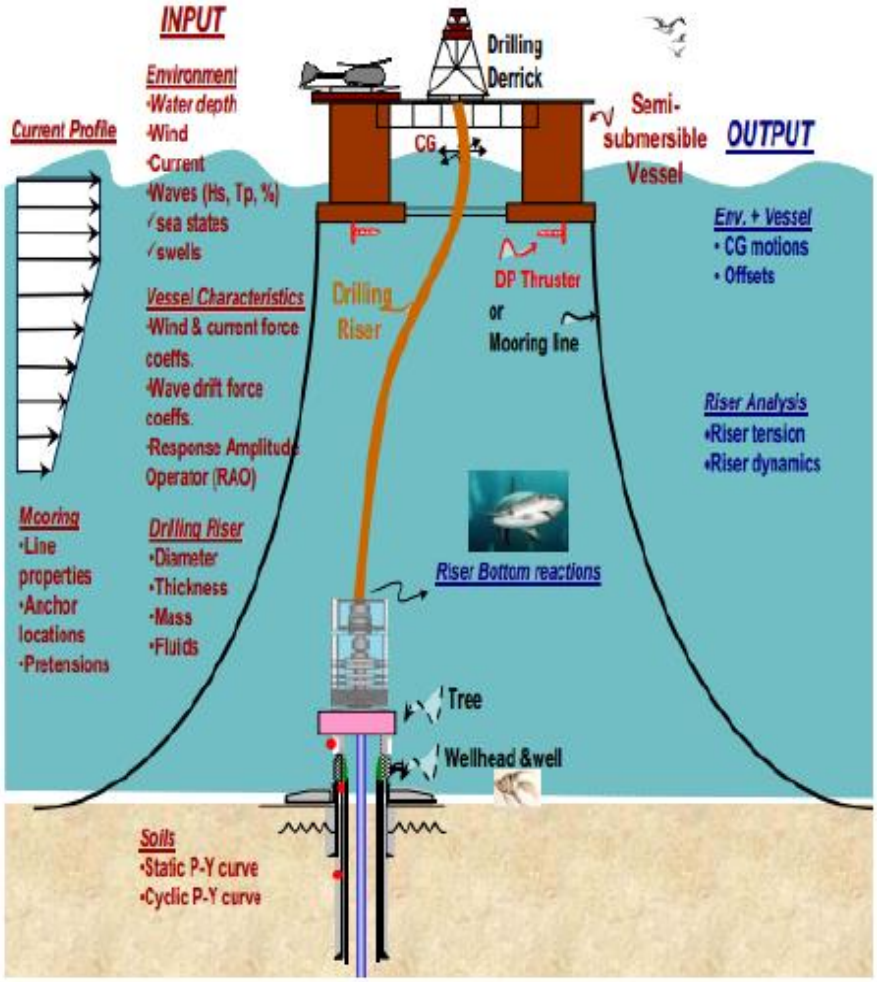

Figura 2. 22 – Carregamento sobre o sistema de perfuração.
Fonte (HARILDSTAD, 2013)

O conhecimento dos carregamentos ambientais que agem nas estruturas offshore é de suma importância nos projetos de estruturas flutuantes offshore. Estas forças

externas oriundas principalmente dos carregamentos ambientais de onda, corrente marinha e vento serão apresentadas neste capítulo. A atuação destas forças nas estruturas flutuantes pode ser entendida da seguinte forma:

- A força de onda, corrente marinha e vento atuam nas UF's;
- A força de onda e corrente marinha atua nas linhas de ancoragem e *Risers.*

Nesta pesquisa o nosso maior foco é nas forças de onda e corrente marinha atuando sobre o *Riser* de perfuração.

2.5.1 Forças das Correntes marinhas

A occorência de Correntes marinhas pode ser entendida como o resultado de vários fenômenos dentre eles, o vento, a diferenças na densidade da água no mar, a circulação, as marés, etc.

Segundo a DNV-RP-C205, as correntes marinhas geradas no mar podem ser provientes de várias formas das quais podemos citar:

- *Corrente do vento*: causadas pelo vento com o gradiente de pressão atmosférica durante a tempestade.
- *Corrente de marré*: geradas pelos movimentos de marré astronómicas mais altas e baixas. Estas correntes marinhas são regulares, fracas em águas profundas e reforçadas pela configuração da linha costeira
- *Corrente Circulares*: são correntes marinhas estáveis e de grande escala de circulação no mar.
- *Corrente de Loop/Eddy:* são correntes marinhas presentes até nas águas profundas.
- *Corrente de Soliton*: são correntes marinhas devidas às ondas internas e são provocadas pelo gradiente da densidade.
- *Corrente Longshore*: são uma conseqüência das ondas que quebram em um ângulo na costa, também conhecida como corrente litoral. Esta corrente é paralela à costa.

2.5.2 Interações Solo-Riser e as Curvas P-y, T-z e Q-z

Com base nas explicações de VELLOSO e LOPES (2002) podemos representar o solo de duas formas distintas: na primeira o solo é representado por molas lineares independentes denominado o modelo clássico de Winkler e, na segunda, o solo e a fundação são substituídos por uma malha refinada de elementos finitos caracterizando o meio contínuo e a interface solo/fundação; neste método, as diversas camadas do solo são representadas pelos parâmetros que definem suas propriedades geotécnicas físicas e mecânicas.

Das duas tecnicas citadas anteriormente, a mais difundida na indústria consiste no emprego das molas não lineares(modelo de Winkler modificado) para representar os respectivos comportamentos lateral, axial e de ponta através das curvas P-y, T-z e Q-z recomendadas inicialmente pela norma API-RP-2A. Estas curvas vem sendo utilizadas desde 1947 na maioria dos problemas de interação solo-estrutura de estruturas offshore e encontram-se descritas com detalhes na dissertação de mestrado ORSINI de CASTRO, (2013) tanto para solos argilosos como para solos arenosos. Esta dissertação serviu de base para utilização deste trabalho no que se refere à interação solo/riser.

3

Fadiga

3.1 Conceitos Básicos

A Fadiga é considerada como um fenômeno de enfraquecimento progressivo ou perda de resistência de um material quando este está submetido às cargas dinâmicas ou repetidas. Esta perda de resistência de um material se dá pelo aparecimento de fissuras que podem dar lugar às situações extremas que resultam no colapso da estrutura. A fadiga é a responsável de 80 a 90% de casos de rotura de peças metálicas solicitadas por esforços mecânicos (BRANCO, 1986).

3.2 Carregamentos

Segundo a *American Society of Testing Materials* (ASTM, 2012), a fadiga é um processo de modificação estrutural progressivo (quando o processo de fadiga ocorre durante certo período de tempo ou uso) e localizado (o processo de fadiga se dá em pequenas áreas em vez de ser em toda a peça ou estrutura) que se produz em um material exposto às condições de variação de tensões e deformações em alguns pontos do material. Os diferentes fatores que afetam a vida à fadiga de uma estrutura são carregamentos (uniaxial, de flexão, de torção), a frequência de repetição (alta ou baixa), métodos de usinagem ou fabricação do material (soldagem), as dimensões da estrutura (variação da seção do cálculo e a seção transversal efetiva), falhas do material (geometria ou concentração pontual do material), temperatura, corrosão, oxidação e histórico de carregamento etc.

Como já foi mencionado anteriormente, os carregamentos ambientais atuantes nas estruturas flutuantes, nos risers e nos demais dutos submarinos são cargas resultantes de correntes marinhas, do vento e das ondas.

a) **A Corrente**: a corrente é uma carga puramente estática que atua sozinha e apresenta uma componente dinâmica de baixa frequência quanto atua junto com a onda.

b) **O vento**: que é também uma carga estática apresenta uma componente de baixa frequência nos sistemas submarinos localizados acima no nível de águas tranquilas e uma de alta frequência nas estruturas tipo torres de perfuração, queimadores e guindastes.

c) **A Onda: -** é uma carga que pode acarretar uma componente força de deriva média e componentes de forças dinâmicas de alta e baixa frequência.

3.2.1 Fases da Fadiga

Independente da carga atuante, a fadiga é composta por três fases (BRANCO, 1986):

- A iniciação da fissura ou nucleação da trinca,
- A propagação da fissura
- A rotura final.

3.2.2 Carregamento com Amplitude Constante

Um ciclo de carregamento pode ser definido a partir de parâmetros obtidos através das tensões máximas (σ_{max}) e mínimas (σ_{min});

- Dupla Amplitude da tensão: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$,
- A tensão média:$\sigma_m = \frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2}$
- Razão de carregamentos: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

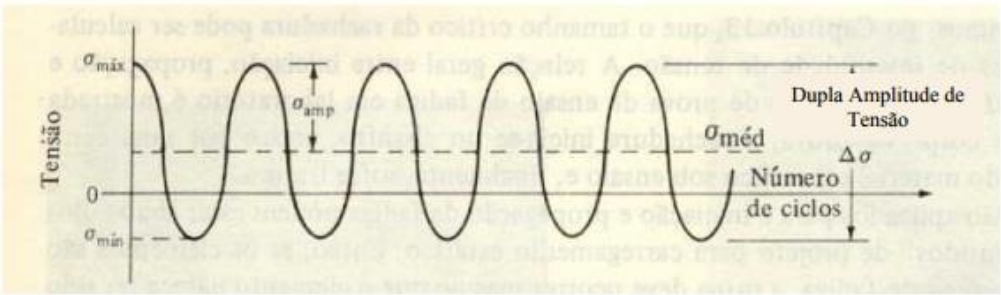

Figura 3. 1 – Exemplo de um carregamento com amplitude constante

Fonte: (BRANCO, 1986)

A partir do valor do parâmetro R, podemos classificar as solicitações conforme Figura 3. 1.

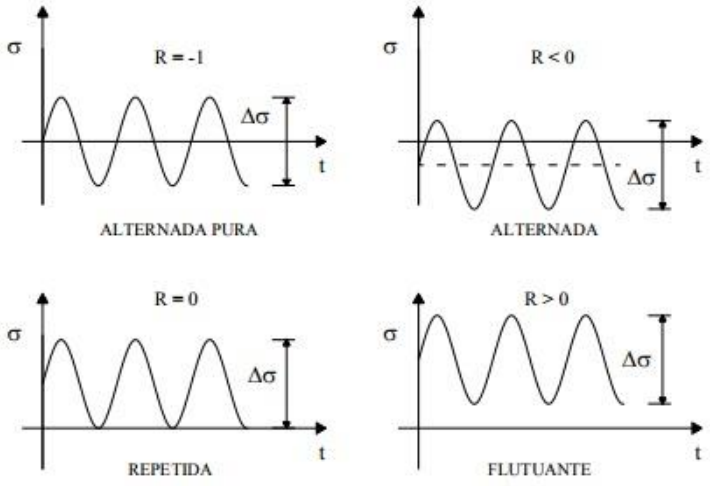

Figura 3.2 – Classificação de solicitações segundo o valor de R (BRANCO, 1986)

3.2.3 Carregamento com Amplitude Variável

Carregamento com Amplitude Variável aparece na maioria dos problemas de estruturas offshore e precisam ser considerados de uma forma adequada.

3.3. Curvas S-N

A metodologia S-N, também denominada fadiga controlada por tensões cíclicas ou faldiga de alto ciclo (FAC), é a ferramenta indicada para estimar a vida do componente quando os níveis de tensão e deformação estão dentro do limite elástico do material que o constitui, e o número de cíclos necessário para a falha é elevado (LOPES, 2006).

As curvas experimentais do tipo S-N são gráficos na forma logarítima, onde N representa o número de ciclos para que uma variação de tensão constante S leve a estrutura à ruptura. As curvas S-N são divididas em classes seguindo as estruturas soldadas com base em arranjo geométrico, no método de fabricação e na inspeção do material de base da estrutura. Nas Figura 3.3 são apresentadas diversas curvas da DNV RP C203. No caso do *Riser* e dutos que são estruturas soldadas, se utiliza as curvas da DNV F, F1, F3 e D. No âmbito da nossa pesquisa, iremos usar a curva F, o que será explicado posteriormente com mais detalhes.

A Tabela 3.1 apresenta as curvas S-N com os demais parâmetros necessários para as suas construções.

De acordo com a norma DNV-RP-F204, cada trecho da curva S-N pode ser representada pela equação:

$$N = \frac{A}{S^m} \tag{3.1}$$

ou

$$\log N = \log(A) - m\log(S) \tag{3.2}$$

onde:

S: dupla amplitude da variação tensão na estrutura;

N: número de ciclos que leva à ruptura com Sensão;

A e m são as constantes experimentais associadas a cada curva S-N.

Tabela 3. 1 – Valores dos parâmetros das Curvas S-N Fonte: (DNV-RP-C203, 2005).

Curva S-N na água com proteção catódica				
Curva S-N	**$N \leq 10^6$**		**$N > 10^6$ ciclos**	**Limite de Fadiga a 10^7 ciclos (MPa)**
	m_1	**log A_1**	**log A_2 $m_2=5$**	
B1	4,0	14,917	17,146	106,97
B2	4,0	14,685	16,856	93,59
C	3,0	12,192	16,320	73,10
C1	3,0	12,049	16,081	65,50
C2	3,0	11,901	15,835	58,48
D	3,0	11,764	15,606	52,63
E	3,0	11,610	15,350	46,78
F	3,0	11,455	15,091	41,52
F1	3,0	11,299	14,832	36,84
F3	3,0	11,146	14,576	32,75
G	3,0	10,998	14,330	29,24
W1	3,0	10,861	14,101	26,32
W2	3,0	10,707	13,845	23,39
W3	3,0	10,570	13,617	21,05
T	3,0	11,764	15,606	52,63

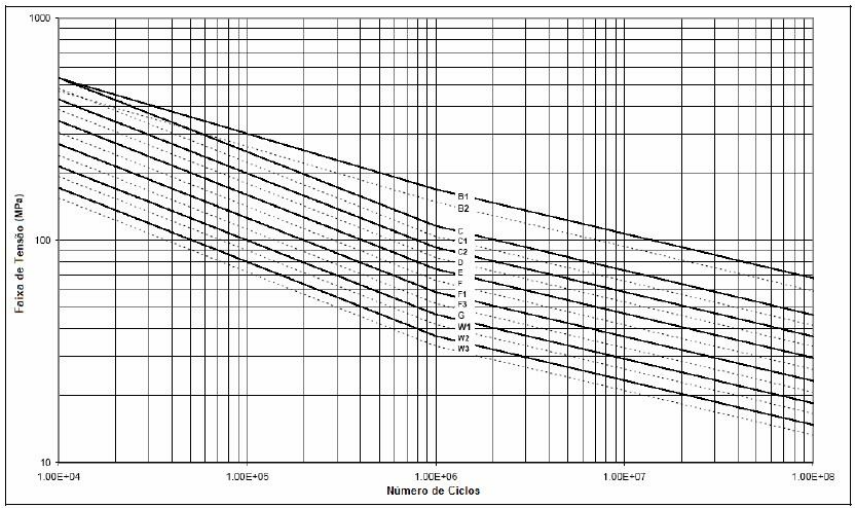

Figura 3. 3 – Curva S-N na água com proteção catódica

Fonte: (DNV-RP-*C*203 DNV, 2005).

3.4. Dano por Fadiga e Regra de Palmgren-Miner

O dano por fadiga pode ocorrer sob carregamento de amplitude constante ou variável. Para o caso amplitude variável, o método utilizado mais frequente é o método de *rainflow*.

.

Na maioria dos casos, utiliza-se a regra de Palmgren-Miner para o cálculo do dano cumulativo que considera a hipótese de que o dano em cada ponto de uma estrutura solicitada por diferentes variações de tensão pode ser somado para se obter o dano total sobre a estrutura.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \tag{3.4}$$

onde:

n_i: o número de ciclo para cada i-ésimo nível de variação da tensão.

4

Estudo de caso

4.1 Caso do *Riser* Rígido de Perfuração

O foco deste trabalho é analisar a influência do fenômeno de VIV na vida útil de uma estrutura esbeltas em águas ultra-profundas considerando um o riser de perfuração completo conjunto *LMRP-BOP*-Condutor, Foram consideradas vibrações Cross-line e In-line. No passado, esta última parcela era negligenciada na análise de fadiga de VIV de risers.

Com o objetivo de se adquirir experiência na análise de VIV In-line com o programa VIVAVA, foi inicialmente rodado um exemplo de um *Jumper* rígido submarino. O exemplo do Jumper rígido foi extraído da dissertação de BARROS, 2015 e projeto final de NOGUEIRA, 2015. No caso do Jumper rígido, ocorre somente o VIV In-line associado ao primeiro modo de vibração, enquanto que no caso do riser em estudo aparecem os dois tipos de VIV para modos diferente conforme era de se esperar.

O *Riser* a modelado no âmbito da nossa pesquisa é uma estrutura genérica da norma ISO/TR 13624-2 que foi adequado aos parâmetros e exigências das interfaces oferecidas pelo programa *RIFLEX*.

Visto o grande leque de informações exigidas pelo programa a fim de viabilizar o modelo foram adotados alguns parâmetros e valores com base nas normas da API RP 16Q e API RP 2RD que determinam padrões de construção, manutenção e recomendações para operação de um modelo genérico de estruturas *offshore* em águas profundas. A complexidade das interfaces para o uso do programa *RIFLEX*, nos levou a decidir e escolher como interface padrão para a nossa pesquisa a interface do SIMA, o que será explicado posteriormente com mais detalhes. O programa *RIFLEX* é um dos programas do pacote SESAN da DNV que coloca à disposição do usuário um leque de programas e interfaces das quais o uso depende de cada caso e natureza do problema a resolver. A Figura 4.1 apresenta os componentes e segmentos do *Riser* em estudo com

as medidas de cada um deles como foi dado na Norma ISSO TR 13624-2. A Figura 4.1 apresenta as partes, os segmentos e as juntas do *Riser* a ser estudado.

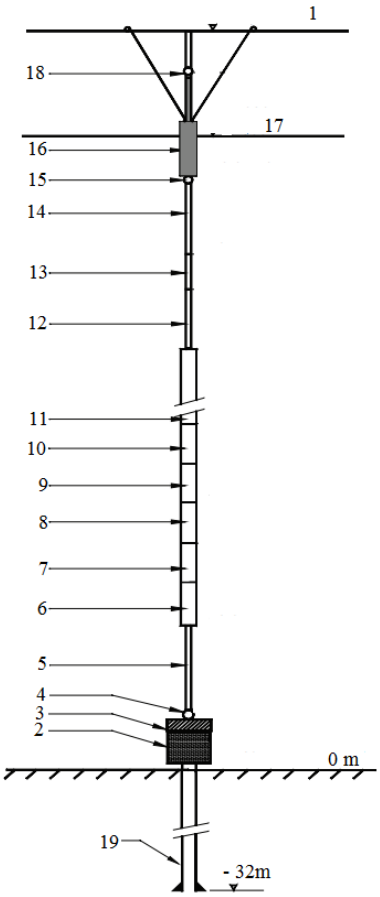

Figura 4. 1 – Descrição esquemática dos segmentos do *Riser*

1- Mesa Rotativa	8- Juntas flut. W1829	15- Flexjoint intermediária
2- BOP	9-Juntas flut. W1524	16- Barrilete externo da JT
3- LMRP	10- Juntas flut. W1219	17- Nível médio do mar
4- Flexjoint inferiror	11- Juntas flut. W914	18- Flexjoint superior
5- Juntas s/Flut.	12- Junta “pup” 40 pés	19- Revest. do Condutor
6- Juntas flut. W/2438	13- Junta “pup” 20 pés	20-Sistema de tracionamento
7- Juntas flut. W/2134	14- Junta de terminação	

4.1.1 Configurações do *Riser* de Perfuração

- **Idealização do Modelo**

Inicialmente, escolhemos trabalhar com a interface do DeepC, a mais recente e abrangente, porém, a mais complexa. Por este motivo tendo enfrentando algumas dificuldades em termos de domínio do programa, escolhemos trabalhar com a interface do SIMA mais direta e prática.

4.1.2 Dados de Entrada (INPMOD)

Tendo em vista as especificações da configuração e estrutura do *Riser* definidas pela norma ISO TR/13624-2, iniciamos a modelagem da estrutura do *Riser* com base nos dados a seguir. Inicialmente, escolhemos a UF, da qual iremos aplicar os seus movimentos e funções de transferência no topo do *Riser*, que serão apresentadas em anexo deste trabalho. A UF é uma plataforma submersível (MODU: Mobile Offshore *Drilling Unit)* com posicionamento dinâmico (DP) operando em uma lâmina d'água de 3048m.

a) Características Geométricas e Propriedades do *Riser*

A Tabela 4.1 a seguir apresenta as propriedades características, geométricas e estruturais do *Riser* a ser modelado no *RIFLEX*. A partir destes dados, são calculados algumas propriedades e parâmetros necessários para as análises.

Propriedades do Riser analisado

- L(m) : comprimento do *Riser*
- D(m) diâmetro do *Riser*
- e(m): espessura do *Riser*
- E(N/m²): Rigidez axial do *Riser*
- σe(Mpa) : Tensão de Escoamento do aço
- σu(Mpa): Tensão última
- δ(Mpa): Módulo de Young
- ρfexterno(kg/m³): massa específica do fluido externo
- ρfinterno(kg/m³) : massa específica do fluido interno
- G(N/m²): Módulo de cisalhamento

- Maço(kg/m): massa por unidade de comprimento do aço
- Mad(kg/m): massa adicional
- Mf(kg/m): massa linear do fluido interno
- MadSJ(kg/m): massa linear do Slipjoint
- Mt(kg/m): massa total por unidade de comprimento, Mt = Maço+ Mad + Mf

Tabela 4. 1 Dados de entrada do *Riser*

Dados do Riser			
Propriedades Geométricas		**Propriedades estruturais**	
L(m)	3075	Segmentos	4
D(m)	0,53	Seções	3
e(m)	0,02	Elementos	262
E(N/m²)	2,07E+11	Nós	263
Aço API 5L-X80			
σe(MPa)	551	G(N/m²)	7,96E+10
σu(MPa)	620	Maço(kg/m)	251,451
δ(MPa)	555	Mad(kg/m)	226,134
ρaço(kg/m³)	7847	Mf(kg/m)	18,851
ρfexterno(kg/m³)	1025	MadSJ(kg/m)	76,085
ρfinterno(kg/m³)	100	Mt(kg/m)	572,14

b) Dados Ambientais

Segundo os dados apresentados na norma para o estudo da fadiga, o foco do nosso trabalho foi considerar somente a ação de uma corrente marinha extrema e mais três casos de variação em torno do perfil adotado de tal forma a entender melhor o comportamento do riser em termos de VIV Cross-line e In-line. A Tabela 4.2 apresenta a corrente unidirecional original (Caso 1|) a ser utilizada nas análises.

Tabela 4. 2: Dados da corrente

Profundidade (m)	**Velocidade (m/s)**
0	1,8
30,48	2,36
60,96	1,23
121,92	1,03
304,8	0,52
609,6	0,26
leito marinho	0,01

Estas ocorrências equivalem às observações durante um ano.

O sistema de tracionamento é composto por seis tracionadores com uma carga aplicada de 1912,7 kN em cada um e com um ângulo de 9,9 graus em relação a vertical. A Tabela 4.3 apresenta as coordenadas X, Y e Z usadas para modelar cada tracionador no *RIFLEX*, o peso e o diâmetro de cada um.

Vale ressaltar que estes os dados e cargas dos tracionadores foram fornecidos pela fabricante e podem ser encontrados na norma ISSO TR 13624-2 e são modelados no *RIFLEX* como linhas *bare elements* (elementos de cabo), ao contrário do resto dos segmentos da estrutura que são modelados como linhas *beam elements* (elementos de viga); este fato será explicado com maior detalhe no estudo do VIV a partir do programa VIVANA.

Foi aplicada uma tração de topo do *Riser* apresentando um valor disponível de 1,091e+07kN, considerado como a resultante das cargas aplicadas em cada tracionador, levando em conta os esforços de peso de cada um deles.

Tabela 4. 3: Descrição dos Tracionadores

Tracionadores	X(m)	Y(m)	Z(m)	Peso(N)	Diam.(m)
T1	1,121	2,706	20	$6{,}64x10^{10}$	0,269
T2	-0,758	2,829	20	$6{,}64x10^{10}$	0,269
T3	-1,68	2,399	20	$6{,}64x10^{10}$	0,269
T4	-1,121	-2,706	20	$6{,}64x10^{10}$	0,269
T5	0,758	-2,829	20	$6{,}64x10^{10}$	0,269
T6	1,68	-2,399	20	$6{,}64x10^{10}$	0,269

Vale ressaltar que estes tracionadores são modelados no *RIFLEX* como linhas *bare elements* (elementos de cabo), ao contrário do resto dos segmentos da estrutura que são modelados como linhas *beam elements* (elementos de viga); este fato será explicado com maior detalhe no estudo do VIV a partir do programa VIVANA.

Foi aplicada uma tração de topo do *Riser* apresentando um valor disponível de 1,091e+07kN, a razão de 1912,7 kN aplicada em cada um dos 6 tracionadores consideando o peso.

c) Configuração do *Riser* de Perfuração

Com base nos dados da norma e alguns cálculos complementares feitos, os dados da configuração do *Riser* onde as juntas representas segmentos são apresentados na Tabela 4.4. Cada segmento foi definido de acordo com as propriedades de seções, densidade e da lâmina d'água.

Tabela 4. 4: Dados para a modelagem do corpo do *Riser*

Descrição da Junta	Nº de Juntas	Profund. (m)	Dens. (Kg/m³)	Empuxo (kN)	Peso Sub. p/junta(kN)	Peso Sub. Total(kN)
Junta de Terminação	1	44,2	0	0	133,355	133,4
Pups"	1	56,4	0	0	50,594	50,7
Flutuador W/914,4	37	902,2	422,9	102,84	2,9	106,8
Flutuador W/1219,2	13	1199,4	459,8	100,26	5,48	71,2
Flutuador W/1524	13	1496,6	483,8	104,315	1,427	17,8
Flutuador W/1828,8	13	1816,6	506,2	100,618	5,124	35,6
Flutuador W/2133,6	13	2113,8	515,8	103,977	1,766	57,8
Flutuador W/2438,4	13	2410,9	551	82,292	23,451	80,1
Junta sem Flutuador	27	3028,2	0	0	121,63	2927
					LMRP	1094
					BOP	1642
					Slip Joint	444,8
TOTAL						6661,2

Obs. Esta Tabela encontra-se em anexo com mais parâmetros para o melhor entendimento do cálculo dos pesos das juntas (segmentos) do *Riser* de perfuração.

d) Dados das Seções transversais dos Segmentos do *Riser*

Para o cálculo destas propriedades, foi utilizada a ferramenta MathCAD, a partir da qual aplicamos fórmulas das massas por unidade de comprimento e das propriedades geométricas das seções circulares (Momentos de inércia).

Tabela 4.5: Propriedades das Seções transversais dos segmentos

Especificação	Massa (Kg/m)	D. Ext.(m)	D. Int.(m)	Rig. Axial (N)	Rig. Flex. (N.m²)	Rig. Tors. (N.m²)
BOP	$1{,}11x10^5$	1,035	0,476	$1{,}37x10^{11}$	$1{,}11x10^{10}$	$8{,}56\ x10^9$
LMRP	$7{,}39x10^4$	1,035	0,476	$1{,}37x10^{11}$	$1{,}11x10^{10}$	$8{,}56\ x10^9$
SJ outer barrel	628,687	0,66	0,58	$1{,}61x10^{10}$	$7{,}78x10^8$	$5{,}98\ x10^8$
SJ inner barrel	71,104	0,53	0,51	$3{,}38x10^9$	$1{,}14x10^8$	$8{,}79\ x10^7$
Flut.W/914	451	1,28	0,53	$2{,}20x10^{11}$	$2{,}64x10^{10}$	$2{,}03\ x10^{10}$
Flut. W/1219	514	1,31	0,53	$2{,}33x10^{11}$	$2{,}91x10^{10}$	$2{,}24\ x10^{10}$
Flut. W/1524	565,64	1,33	0,53	$2{,}41x10^{11}$	$3{,}09x10^{10}$	$2{,}38\ x10^{10}$
Flut. W/1829	623,42	1,36	0,53	$2{,}55x10^{11}$	$3{,}39x10^{10}$	$2{,}61\ x10^{10}$
Flut. W/2134	691,869	1,41	0,53	$2{,}77x10^{11}$	$3{,}93x10^{10}$	$3{,}02\ x10^{10}$
Flut. W/2438	726,819	1,44	0,53	$2{,}91x10^{11}$	$4{,}28x10^{10}$	$3{,}29\ x10^{10}$
Junta sem flut.	251,461	0,53	0,49	$6{,}63x10^9$	$2{,}16\ x10^8$	$1{,}66\ x10^8$

4.1.3 Resultados do Modelo

1ª Etapa: Estudo paramétrico das Frequências Naturais

Com o objetivo de verificar e calibrar o exemplo do riser nos Sietema RIFLEX e VIVANA, foi realizado inicialmente um estudo comparativo dos resultados dos esforços axiais no topo e na base do *Riser* e das frequências naturais, utilizando-se e três métodos.

Os três métodos utilizados para estes estudos comparativos são de uma forma resumida a seguir:

Método Analítico do *Riser* simplificado (Modelo de viga)

O método analítico empregado está baseado manual teórico do programa SHEAR 7 considerando um riser bi-rotulado com tração variável o que implica num processo iterativo. Para tanto, foi aprimorada a planilha existente utilizada por RODRIGUES, 2011.

Método matricial com elementos do Pórtico Plano

Este método é similar ao primeiro método, mas onde o riser agora é discretizado em elementos de pórtico plano. A determinação das frequências é determinada também por uma planilha Mathcad desenvolvida pro RODRIGUES, 2011 e aprimorada nesta pesquisa.

Método de Elementos Finitos (MEF)

Este é o método principal que será aplicado para o restante das análises. Este método consiste em modelar o *Riser* a partir de uma discretização dos elementos dos segmentos das linhas. Para este estudo comparativo de frequências e períodos naturais, usamos o modelo cujos dados foram apresentados anteriormente.

Para o maior domínio e exatidão no programa do *RIFLEX*, resolvemos iniciar um pequeno estudo comparativo dos três métodos e tomando o *Riser* da dissertação de mestrado do RIVA, 2011 como exemplo para o cálculo de frequências naturais.

Riser Estudado a título de comparação (RIVA 20008)

Para análise e determinação das frequências naturais do *Riser*, o RIVA, 2008 usou o programa IKA_VIV(método analítico) que é idêntico ao método iterativo de um *Riser* simplificado. Neste caso, iremos comparar os resultados dos programas RIFLEX, IKA_VIV e o método matricial do pórtico plano. As características do *Riser* se apresentam a seguir:

- Comprimento do riser: 320m;
- Diâmetro hidrodinâmico: 0,25m;
- Diâmetro externo: 0,25m;
- Diâmetro interno: 0,21m;
- Massa específica do aço: 7797 kg/m³;
- Coeficiente de massa adicionada (CA): 1,0
- Tração no topo: 1501kN
- Tração na base: 1219kN
- Número de Strouhal: 0,2
- Fluido interno: 799,73 kg/m³;

Os resultados dos esforços axiais calculados pelo programa *RIFLEX* que se assemelham com aqueles calculados pelo programa IKAV_VIV. Podem observar que o

valor máximo da tração no topo do *Riser* foi de 1500kN pelo *RIFLEX*, 1501 kN pelo MathCAD e o valor mínimo gira em torno de 1494kN.

Para a tração na base do *Riser* pelo programa *RIFLEX*, o valor máximo foi de 1246kN e 1219 kN pelo MathCAD e o mínimo de 1213kN para o *RIFLEX*.

Para o estudo comparativo das frequências naturais, foram usados os três métodos citados anteriormente.

Tabela 4.6: As frequências naturais do *Riser* estudado pelo *RIFLEX*

Modelo do MEF (SIMA)			**Modelo Simplificado (MathCAD)**		**Modelo do Pórtico Plano (MathCAD)**	
Discretização (262 elementos)			Método analítico		Método Matricial	
Modos	Períodos Naturais	Frequências naturais	Períodos Naturais	Frequências Naturais	Períodos Naturais	Frequências Naturais
1	7,51	0,13	7,55	0,13	7,28	0,13
2	3,62	0,28	3,77	0,27	3,59	0,28
3	2,34	0,43	2,51	0,40	2,38	0,42
4	1,71	0,59	1,87	0,54	1,77	0,56
5	1,34	0,75	1,48	0,67	1,42	0,71
6	1,09	0,92	1,23	0,81	1,18	0,85
7	0,92	1,09	1,04	0,96	1	1
8	0,79	1,27	0,91	1,11	0,87	1,15
9	0,69	1,45	0,80	1,26	0,77	1,30
10	0,61	1,64	0,71	1,41	0,69	1,46
11	0,55	1,82	0,64	1,57	0,62	1,61
12	0,49	2,04	0,57	1,74	0,56	1,77
13	0,45	2,22	0,52	1,92	0,52	1,93
14	0,41	2,44	0,48	2,09	0,50	1,99
15	0,37	2,70	0,44	2,28	0,48	2,1

O programa *RIFLEX* apresentou uma boa precisão nos resultados do cálculo dos esforços axiais de tração, onde se observaram os valores máximos no topo do *Riser* de 1501kN para o programa IKAV_VIV e 1500kN; os valores máximos na base do *Riser* de 1219kN para o programa IKA_VIV e 1246kN para o programa *RIFLEX*. Não houve variações significativas entre os valores calculados no programa IKA_VIV e no *RIFLEX*.

A pequena variação dos valores de frequências naturais não afetou os resultados. Com isso, podemos logo afirmar que o modelo se comportou de uma maneira satisfatória no programa *RIFLEX* e uma boa precisão nos resultados e isso comprova a importância de modelar o nosso *Riser* em estudo.

Teste da Exatidão dos Resultados do Modelo feito no programa RIFLEX com o risere de perfuração

Iniciamos as análises considerando o primeiro modelo do *Riser* cujas características geométricas, numéricas e mecânicas foram dadas, mas, com uma tração aplicada no topo através de cada um dos seis tracionadores. Vale ressaltar que neste primeiro modelo o condutor não foi incluído, sendo que o *Riser* engastado na base. Na Tabela 4.7, são apresentados os resultados das frequências naturais deste modelo. Este modelo está sendo somente para fazer este estudo de exatidão e precisão dos resultados do modelo usando os três métodos citados anteriormente mas, estes resultados podem ser reaproveitados para posteriores estudos de frequência naturais. Vale ressaltar que este teste é fundamental para o prosseguimento com a modelagem no programa *RIFLEX*.

Tabela 4.7: Resultados das Frequências (em s) e Períodos naturais (em s)

Modelo do MEF (SIMA)			**Modelo Simplificado (MathCAD)**		**Modelo do Pórtico Plano (MathCAD)**	
Discretização (262 elementos)			Método da integral		Discretização (118 elementos)	
Modos	Períodos Naturais	Frequências naturais	Períodos Naturais	Frequências Naturais	Períodos Naturais	Frequências Naturais
1	53,31	0,02	53,10	0,02	54,39	0,02
2	26,57	0,04	26,55	0,04	26,35	0,04
3	17,7	0,06	17,7	0,06	17,41	0,06
4	13,26	0,07	13,27	0,07	13,00	0,08
5	10,59	0,10	10,62	0,09	10,37	0,09
6	8,78	0,12	8,85	0,11	8,63	0,12
7	7,52	0,14	7,58	0,13	7,38	0,14
8	6,55	0,16	6,63	0,15	6,44	0,16
9	5,78	0,18	5,89	0,17	5,71	0,17
10	5,13	0,20	5,30	0,19	5,13	0,19

A Tabela 4.7 apresenta o estudo comparativo dos Períodos e Frequências naturais a partir dos três métodos apresentados anteriormente.

Os três primeiros valores das frequências naturais do MEF e do método analitico apresentaram uma diferença começando na sexta casa decimal e assim diante

este erro foi aumentando-se até a segunda casa decimal para os nonos e décimos valores das frequências naturais. O método matrricial apresentou uma diferença começando já na quinta casa decimal para o primeiro valor, mas, mesmo assim houve grande diferença em torno de 2% comparando-os aos dos outros métodos. Esta discrepância se originou do menor número de elementos discretizados (malhas maiores).

Como o método do pórtico espacial teve 118 elementos discretizados, quase a metade dos elementos discretizados para o método de elemento finito (MEF), resolvemos aumentar o número dos elementos discretizados de 118 para 230. Percebe-se a melhoria dos resultados das frequências naturais na Tabela 4.8 a seguir:

Tabela 4. 8: Resultados das Frequências (em s) e Períodos naturais (em s) corrigidos

Modelo do MEF (SIMA)			**Modelo Simplificado (MathCAD)**		**Modelo do Pórtico Espacial(MathCAD)**	
Discretização(231 elementos)			Método da integral		Discretização(231elementos)	
Modos	Períodos Naturais	Frequências naturais	Períodos Naturais	Frequências Naturais	Períodos Naturais	Frequências Naturais
1	53,31	0,02	53,10	0,02	53,09	0,02
2	26,57	0,04	26,55	0,04	26,54	0,04
3	17,7	0,06	17,7	0,06	17,71	0,06
4	13,26	0,08	13,27	0,08	13,26	0,07
5	10,59	0,09	10,62	0,09	10,45	0,09
6	8,78	0,11	8,85	0,11	8,71	0,11
7	7,52	0,13	7,58	0,13	7,45	0,13
8	6,55	0,15	6,63	0,15	6,5	0,15
9	5,78	0,17	5,89	0,17	5,75	0,17
10	5,13	0,19	5,30	0,19	5,16	0,19

A convergência dos resultados dos três métodos nos leva ao maior entendimento da precisão, da confiabilidade e a exatidão dos resultados do método dos elementos finitos por meio do programa *RIFLEX*. Assim podemos prosseguir com a modelagem no programa *RIFLEX* para a nossa pesquisa com mais segurança nos resultados.

O modelo a ser utilizado nas análises posteriores irá sofrer pequenas alterações estruturais e as condições de contorno com intuito de atender às exigências do programa VIVANA que até atual versão, não aceita trabalhar com elementos cuja seção transversal é de cabo (*bare cross-section*. Como os tracionadores foram e tem que ser modelados com *bare cross-section*, iremos substituí-los por uma carga aplicada no topo

do *Riser* e que representará o mesmo comportamento mecânico e axial de modo que o *Riser* mantenha o mesmo comportamento vibratório e as mesmas frequências naturais iguais às do modelo anterior.

Dessa forma, o processo para a definição do modelo a ser analisado no VIVANA, se dará de forma que o estudo de frequências naturais mantivesse um comportamento físico e mecanicamente verificado. Com isso, as características e propriedades tanto físicas como geométricas serão mantidas iguais para todos os modelos a ser estudados antes de chegar ao modelo final. Os casos a serem estudados se apresentam a seguir:

1º Caso: Modelo Sem Condutor

Este modelo apresenta seguintes características:

Lâmina de água: 3048m

Comprimento do *Riser*: 3075m

Super-nós: 2 (um na base e outro no topo do *Riser*), um super-nó é um nó que carrega umas propriedades estáticas e condições de contornos bem definidos nele. A Figura 4.2 apresenta o esquema do primeiro caso que é do modelo do *Riser* de perfuração sem o condutor

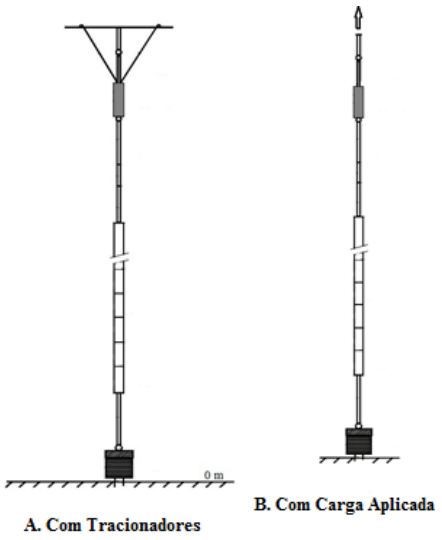

Figura 4. 2 – Modelos sem o Condutor

Vale ressaltar aqui que no modelo sem tracionadores existe uma carga aplicada no topo de *Riser* de 1,091e+07 kN equivalendo a uma carga de 1912,7 kN aplicada em

cada um dos 6 tracionadores considerando também o peso deles. Os demais cálculos das propriedades e características do *Riser* em estudo serão apresentados em anexo desta pesquisa. A Figura a seguir apresenta as duas modelagens sem o condutor cujas períodos naturais para os programas *RIFLEX* e VIVANA se apresentam na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9: Frequências (em s) e Períodos Naturais (em s) do *Riser* sem condutor

Modelo Com Carga Aplicada		**Modelo Com Tracionadores**	
No RIFLEX	**No VIVANA**	**No RIFLEX**	**No VIVANA**
Períodos Naturais	Períodos Naturais	Períodos Naturais	Períodos Naturais
53,36	53,36	53,31	-
25,97	25,97	26,57	-
16,96	16,96	17,7	-
12,53	12,53	13,26	-
9,98	9,98	10,59	-
8,37	8,37	8,78	-
7,25	7,25	7,52	-
6,36	6,36	6,55	-
5,63	5,63	5,78	-
5,04	5,04	5,13	-

2º Caso: Modelo Com Condutor e Sem Molas

Neste modelo, podemos perceber que há um condutor de 32 metros de comprimento nos dois modelos com e sem tracionadores. Assim o modelo ficou agora com 3 Super-nós; um no fundo do condutor, outro na cabeça do poço e outro no topo do *Riser*.

Este modelo considerado como o modelo de transição entre o *Riser* sem condutor e o *Riser* com condutores e 32 molas aplicadas, está sendo somente utilizado para analisar a variação das frequências naturais que devem ter um significado mecânico visto que, aumentamos o comprimento da estrutura, ou seja, diminuímos a rigidez e aumentamos a possibilidade de vibração. Dessa forma, este modelo deverá apresentar frequências naturais menores, ou seja, períodos naturais maiores que do modelo anterior. Já na Figura 4.3, podemos perceber que aparece o condutor no esquema do *Riser*.

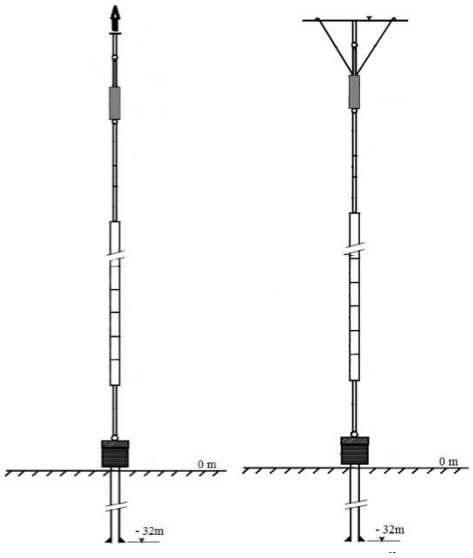

Figura 4. 3 – Modelos com Condutor e sem Molas

Tabela 4. 10: Períodos naturais (em s) com Condutor e sem molas

Modelo Com Carga Aplicada		**Modelo Com Tracionadores**	
No RIFLEX	**No VIVANA**	**No RIFLEX**	**No VIVANA**
Períodos Naturais	Períodos Naturais	Períodos Naturais	Períodos Naturais
60,27	60,27	60,69	-
29,01	29,01	29,41	-
18,61	18,61	18,97	-
13,54	13,54	13,84	-
10,64	10,64	10,92	-
8,82	8,82	8,67	-
7,59	7,59	8,00	-
6,65	6,65	6,87	-
5,87	5,87	5,82	-
5,25	5,25	5,26	-

3º Caso: Modelo Com Condutor e Com Molas

Aplicamos 32 molas ao longo de toda a extensão do condutor de 32 m, com rigidez de 4,68 kN/m cada. Os parâmetros de cálculo do valor da rigidez, foram determinados a partir dos dados do solo e considerando os ensaios experimentais da curva P-y norma API RP–2A–WSD que foram explicados na seção 4.4 do capítulo 4 do presente trabalho. As molas são representadas pelas linhas en negritos que aparecem nos condutores do *Riser*.

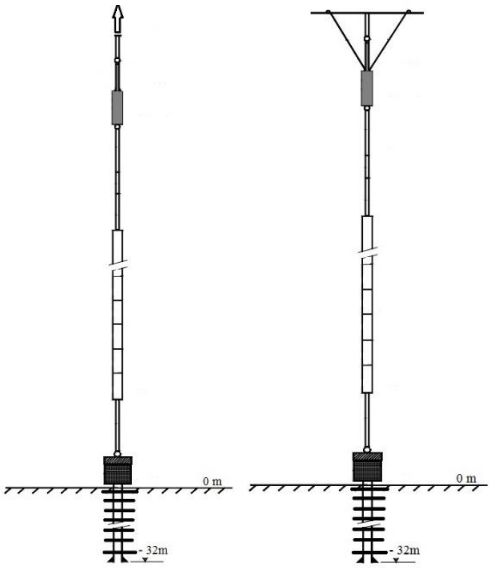

Figura 4. 4 – Modelos com condutor e com as molas

Após aplicação das molas, constatou-se que houve aumento da rigidez da estrutura com a consequente redução das frequencias naturais. Em relação ao modelo anterior, este terceiro modelo fisicamente tem que apresentar os períodos naturais menores que o modelo com condutor e sem molas e maiores que o modelo sem condutor.

Tabela 4. 11 Períodos Naturais (em s) do *Riser*

Modelo Com Carga Aplicada		**Modelo Com Tracionadores**	
No RIFLEX	**No VIVANA**	**No RIFLEX**	**No VIVANA**
Períodos Naturais	Períodos Naturais	Períodos Naturais	Períodos Naturais
55,05	55,05	55,00	-
27,97	27,97	28,53	-
18,62	18,62	18,81	-
14,52	14,52	14,92	-
11,94	11,94	12,01	-
10,63	10,63	11,01	-
9,02	9,02	9,25	-
8,93	8,93	9,13	-
7,72	7,72	7,86	-
7,8	7,80	7,89	-

Os resultados acima se encaixam física e perfeitamente no que foi dito a respeito da variabilidade entre frequências naturais dos 3 modelos.

Percebe-se que o intervalo de variação dos valores dos períodos naturais entre os modelos sem e com tracionadores se mantiveram iguais na parte inteira e apresentando somente uma pequena variabilidade na parte decimal para todos os 3 casos. Esta variabilidade se dá pelas pequenas parcelas laterais das cargas aplicadas nos tracionadores, que atuam também no movimento vibratório do *Riser*. Depois deste processo conseguimos alcançar com sucesso o modelo que irá fazer objeto das posteriores análises de VIV e de fadiga do nosso trabalho; Um *Riser* de perfuração sem tracionadores, mas, com uma carga resultante dos esforços atuantes em cada um dos seis tracionadores, aplicada no topo do *Riser* e com um condutor com 32 molas aplicadas ao longo de toda a sua extensão. Este modelo foi escolhido com intuito de se diferenciar um pouco com a configuração do modelo genérico da Norma. O processo seguido até chegar a este modelo final foi no sentido de se manter as características geométricas, estruturais e dinâmicas do modelo inicial.

A Tabela 4.12 apresenta as Características numéricas das linhas utilizadas na modelagem no RIFLEX; numero de elementos, comprimentos e nós dos segmentos de cada linha.

Tabela 4. 12: Características numéricas das linhas

Linha	Descrição	Segmento local	Compr. de segmento(m)	N º de Elementos	Nós Delimitantes
1	Riser	1	123	30	1 e 31
		2	2354	175	31 e 206
		3	618	25	206 e 231
2	Condutor	1	32	32	232 e 262

2ª Etapa: Análise Estática

Para análise estática foram definidas duas linhas limitadas pelos três Super-nós que são:

1. Nó-Topo: que se encontra no topo do *Riser*, onde se aplica a tração.
2. Nó-Cabeça do Poço: um Super-nó que se encontra abaixo do *BOP* e na cabeça do poço, onde se encontra a tração na base do *Riser*.
3. Nó-Fundo do Poço: Como diz o nome é o Super-nó que se encontra na base do condutor, ou seja, no fundo do poço.

Inicialmente, as condições de contorno destas duas linhas analisadas, o *Riser* e o condutor, são apresentadas na Tabela 4.13, onde nos nós fixos todas translações e rotações são restritas e nos nós livres todos os graus de liberdade são liberaados.

Tabela 4. 13: As Condições de Contorno do *Riser*

Super-Nós	Translações			Rotações		
	X(m)	Y(m)	Z(m)			
Topo	Fixo	Fixo	Livre	Livre	Livre	Livre
Cabeça do Poço	Livre	Livre	Fixo	Livre	Livre	Livre
Fundo do Poço	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo

Com esta configuração final a tração máxima disponível no topo do *Riser* pelo método dos elementos finitos (*RIFLEX*) ficou em torno de 1.442 x10^7N, considerando o peso de cada tracionador e na base do *Riser*, ou seja, na cabeça do poço ficou em torno de 1.058 x10^7N. Pelo método iterativo a tensão (MathCAD) a tensão no topo do *Riser* ficou em torno de 1.398 x10^7N e na base 1.018 x10^7N ; com isso concluímos que os resultados são satisfatórios, apresentando uma diferença de 0.03% entre os dois métodos. Considerando o peso total submerso do *Riser*, a tração na base do *Riser* fica em torno de 1.442 x10^7N.

3ª Etapa: Analise de Vibrações Induzidas por Vórtices

Outros parâmetros interessantes que ampliam mais o nosso entendimento sobre a influência das VIV na estrutura do *Riser* são parâmetro de excitação da resposta, zona de excitação e energia de excitação.

O parâmetro de excitação é uma quantidade adimensional determinada a partir da zona de excitação de cada frequência da resposta. Este parâmetro ajuda na determinação do modo mais excitado. Porém, o modo potencialmente excitado terá o maior parâmetro de excitação assim por diante.

O estudo do Parâmetro de excitação é indispensável para a determinação dos modos dominantes e das zonas de excitação do nosso modelo em estudo. O parâmetro de excitação pode ser obtido a partir das curvas experimentais de Gopalkrishnan com base no ensaio de movimentos de um cilindro rígido, sob o efeito de VIV *Cross-flow*, (GOLPALKRISHNAN, 1993). O estudo de Gopalkrishnan levou à definição de um

intervalo onde pode se achar uma curva do coeficiente positivo de excitação. Este intervalo varia de 0,125 a 0,3, mas, no caso do programa VIVANA este intervalo se reduz de 0,125 a 0,2.

O processo para determinação do parâmetro de excitação da resposta se faz da seguinte forma: Primeiramente, são determinadas as frequências adimensionais de excitação a partir da seguinte fórmula:

$$f_a = \frac{f_r D_{(H)}}{U_r}$$

onde:

f_a : frequência adimensional

f_r: frequência da resposta

$D_{(H)}$: diâmetro hidrodinâmico do *Riser*

U_r : a corrente sobre o *Riser*

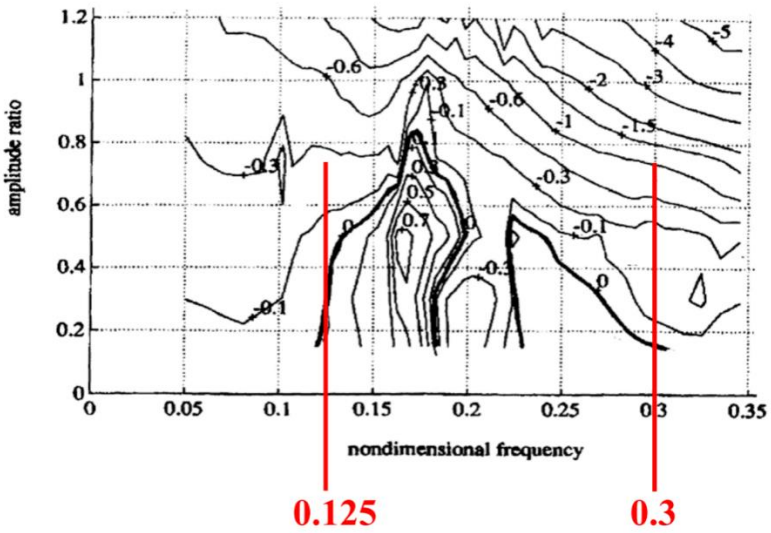

Figura 4. 5– Relação parâmetro de excitação com a Frequência Adimensional

Em seguida, a partir do grafico da Figura 4.5, se determina a amplitude adimensional a ser utilizada na fórmula a seguir para o cálculo do parâmetro de excitação da resposta, entrando com o valor da frequencia adimensional de excitação. No final, é calculado o parâmetro de excitação a partir da fórmula a seguir:

$$E_i = \int_{L_e}^{i} U_N^3 \, D_H^2(s) \left(\frac{A}{D}\right) ds$$

onde:

U_N: a corrente normal ao cilindro

$D_{(H)}$: o diâmetro hidrodinâmico

A/D: amplitude adimensional.

E_i: o parâmetro de excitação da resposta

1. Analise modal

A análise de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices é feita com base nos dados dos resultados do programa VIVANA. Antes de tudo, é preciso rodar a análise estática para adquirir dados que serão considerados como INPMOD (dados de entrada) para o programa VIVANA.

Foram reaproveitados os resultados das frequências naturais do terceiro caso estudado anteriormente, mas, com finalidade de realizar a análise de VIV ***In-line*** e ***Cross-flow*** no domínio da frequência para um posterior cálculo da fadiga. Vale ressaltar aqui que, o processo no domínio da frequência apresenta uma estabilidade nos resultados da resposta, a partir de um balanço de energia de excitação e de amortecimento.

A premissa para o estudo de vibrações induzidas por vórtices é a análise modal, a partir da qual iremos determinar os modos de vibração do *Riser*, as frequências da resposta e os demais parâmetros de quantificação e determinação dos efeitos das vibrações induzidas por vórtices. Com base nas possibilidades que nos oferece o programa *RIFLEX*, foram feitas as análises considerando as VIV *In-line* e *Cross-flow* separadamente e os dois combinados para podermos analisar as variações e quantificar os danos que cada um dos tipos de VIV pode provocar na estrutura. Considerando o terceiro caso do *Riser* sem tracionadores, mas, com molas aplicadas no condutor, iremos variar as correntes marinhas no intervalo de 2,36 m/s a 0,01 m/s e analisando distintamente as VIV *In-line* e *Cross-flow*, para entendermos melhor a resposta da estrutura.

a) <u>Análise de VIV *Cross-Flow*</u>

Caso1: Para U_1 = 2,36m/s e U_2 = 0,01m/s

Iniciamos este estudo de VIV C*ross-flow* considerando uma corrente triangular como foi dado anteriormente. A Tabela 4. 14, apresenta as frequências naturais e da resposta do *Riser*, considerando 25 modos de vibração.

Tabela 4. 14: As Frequências do Modelo

Estudo de VIV *Cross-Flow*				
Modos	**Freq. Nat. em (Hz)**	**Freq. da resp. em Hz**	**Parâmetro de Excitação**	**Energia de Excitaçãoadimensionalisada**
1	0,02	0,04	0,309	0
2	0,03	0,08	0,999	0
3	0,05	0,09	3,5	0,002
4	0,07	0,14	12,22	0,005
5	0,09	0,16	18,08	0,008
6	0,11	0,19	28,46	0,012
7	0,13	0,2	40,68	0,018
8	0,15	0,22	52,62	0,023
9	0,16	0,23	388,26	0,169
10	0,18	0,24	-	0,475
11	0,2	0,26	-	0,683
12	0,21	0,27	-	0,769
13	0,23	0,29	-	0,786
14	0,25	0,3	-	0,824
15	0,27	0,32	-	0,861
16	0,28	0,33	-	0,887
17	0,31	0,34	-	0,904
18	0,33	0,35	-	0,925
19	0,35	0,37	-	0,944
20	0,37	0,38	-	0,965
21	0,38	0,39	-	0,978
22	0,41	0,4	-	0,989
23	0,43	0,41	-	0,995
24	0,44	0,43	475	1
25	0,48	0,45	-	0,993

Em seguida, foi feita uma analise modal pelo programa *RIFLEX* para podermos determinar o parâmetro e energia de excitação e descobrir o modo potencialmente dominante. Ainda na Tabela 4.14, a penúltima coluna que representa a energia de excitação, o modo potencialmente dominante é aquele cuja energia de excitação se

aproxima de 1. Com isso podemos perceber que o modo 24 é potencialmente excitado. Os modos 17,18,19,20,21,22,23 e 25 tem uma energia de excitação aproxidamente igual a 1 e são considerado também como modos excitados.

O parâmetro e a energia de excitação são parâmetros que o programa VIVANA providencia no intuito de confirmar o modo potencialmente excitado caso houver mais de um modo excitado ou não. O Modo potencialmente dominante apresentará um parâmetro de excitação maior que o restante dos modos como foi dito anteriormente. Por isso, o modo 24 é considerado como o modo potencialmente excitado porque ele apresenta o maior parâmetro de excitação. Por outro lado, o modo potencialmente dominante é o modo que tem uma energia de excitação igual a 1. Vale ressaltar que este raciocínio será usado para o restante dos casos de variação de velocidade para vibrações *Cross-flow* e *In-line.*

Amplitude da Resposta do Modo 24

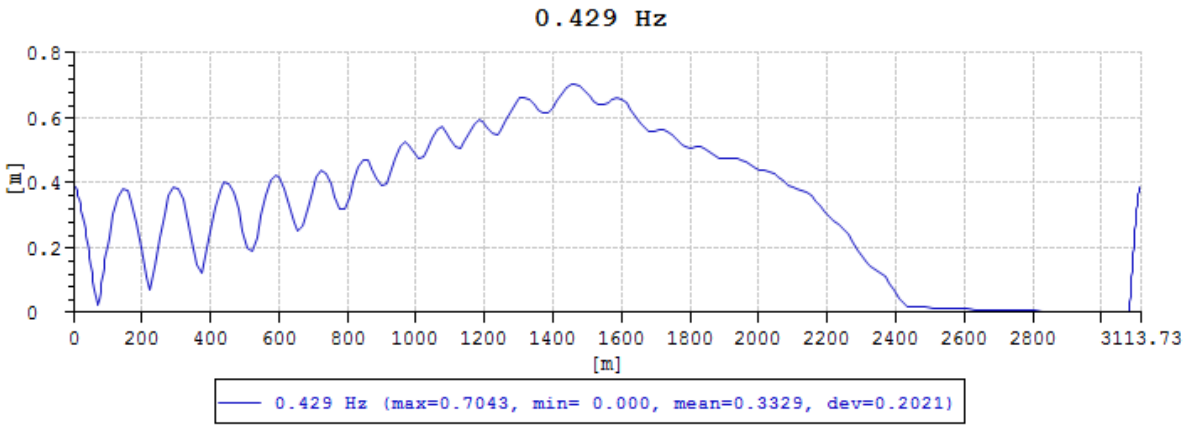

Figura 4. 6– Amplitude da resposta do modo dominante para CF caso 1

A amplitude máxima ocorre no ponto 1452, $\frac{A}{D}$ = 0,704 m.

O tamanho da zona de excitação depende inteiramente do parâmetro de excitação E. O modo com maior parâmetro de excitação terá maior comprimento da zona de excitação. A estrutura começa vibrar bruscamente com um determinado comprimento chamado de comprimento inicial que pode ou não quando a vibração da estrutura se estabilza apresentando um comprimento final que é ajustado automaticamente pelo VIVANA como mostra a Tabela 4.15.

Tabela 4. 15: Comprimento de excitação para CF caso 1

Comprimento de Excitação em m		
Modos	**Comprimento Inicial de Excitação**	**Comprimento Final de Excitação**
1	67	67
2	94	94
3	148	94
4	242	53
5	269	40
6	322	40
7	363	40
8	390	26
9	726	53
10	1304	53
11	1641	53
12	1587	13
13	1573	13
14	1560	26
15	1533	0
16	1533	13
17	1520	13
18	1506	13
19	1493	13
20	1493	13
21	1479	0
22	1466	13
23	1452	13
24	1439	1439
25	1425	0

A zona de Excitação

Zona de excitação para a Frequência do modo dominante

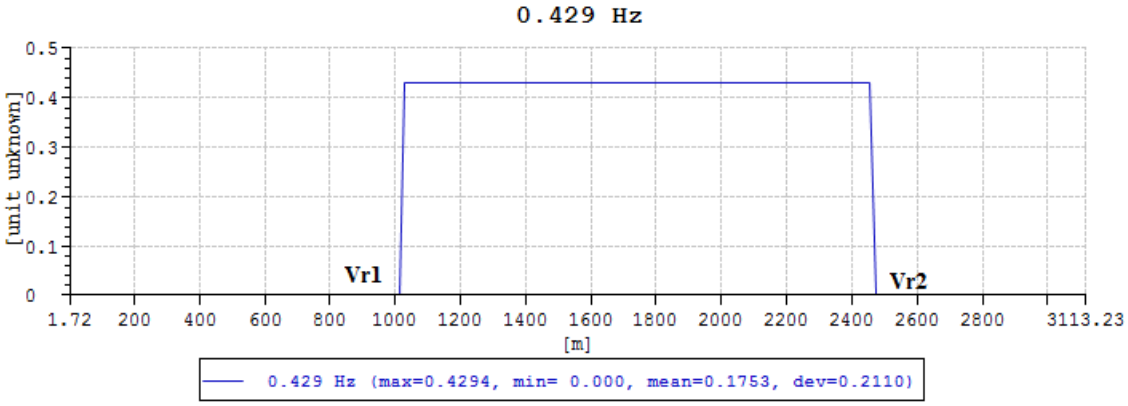

Figura 4. 7 – A zona de excitação do modo dominante para CF caso 1

A zona de excitação se inicia no ponto 1020 m e termina em 2459 m

A variação e alguns parâmetros ao longo da extensão do *Riser* que descrevem as vibrações induzidas por desprendimento de vórtices pode influenciar no aumento ou no decréscimo da ação de VIV. Dentre estes parâmetros, podemos citar: a corrente, a frequência de Shedding, o diâmetro e o número de Strouhal. No caso deste *Riser* de perfuração, mesmo tendo a variação do diâmetro do *Riser* em regiões onde há presença de flutuadores, resolvermos trabalhar com o diâmetro hidrodinâmico.

A frequência de Shedding que é a frequência de desprendimento de vórtices, varia ao longo de toda a extensão do *Riser*, pelo simples motivo de estar diretamente proporcional à velocidade do fluido. Com isso, vários modos podem ser dominantes, anulando os demais ou vários modos atuando simultaneamente, cada um com uma determinada energia de excitação. O número de Strouhal, que varia também ao longo de toda a extensão do *Riser* junto com a frequência de *Shedding* irá nos auxiliar no cálculo da velocidade reduzida.

A frequência de Shedding , o número de Strouhal e avelocidade reduzida são utilizados no cálculo das forças de excitação e de amortecimento em toda a extensão do *Riser* visto que eles variam desde a superfície até o leito marinho.

Sendo uma análise no domínio frequência, a massa adicionada apresenta uma alternativa importante no estudo da variabilidade e influência nos resultados da fadiga e nas frequências de excitação. A massa adicionada varia também ao longo de toda extensão do *Riser* e é função também de cada modo de vibração.

b) <u>Análise de VIV *In-Line*</u>

Caso 1: Para U_1 = 2,36m/s e U_2 = 0,01m/s

Para as análises de vibrações induzidas por vórtices *In-Line*, visto que era preciso considerar mais de 200 modos para poder atingir os modos excitados para o melhor entendimento da variabilidade e vibração da estrutura em estudo, as demais Tabelas serão apresentadas em anexo II.

Para esta corrente o modo potencialmente excitado é o modo 45

<u>Análise dos Resultados das VIV *Cross-flow* e *In-line*</u>

A partir das Tabelas 4.16 e 4.17, que apresentam de uma forma resumida, comparações entre alguns parâmetros importantes para o nosso estudo de VIV *Cross-flow* e *In-line*, variando as velocidades no intervalo de 2, 36 a 0,01m/s tanto na direção *In-plane* (no plano) quanto na direção *out-of-plane* (fora do plano).

A frequência de *Shedding* ou a frequência de desprendimento de vórtices, juntamente com o número de Strouhal não apresentaram nenhuma variação de seus valores seja para a vibração *Cross-flow* quanto à vibração *In-line*, porque estes dois parâmetros dependem da corrente e do diâmetro hidrodinâmico da estrutura e são diretamente proporcionais. O valor do CA, coeficiente de massa adicionada, se inicia com valor fornecido pelo usuário e vai variando de acordo com o processo iterativo e nesta Tabela estão apresentados os valores extremos dos parâmetros, ou seja, os piores casos.

Observação importante: o dano apresentado nas tabelas refere-se a um dano como se estas correntes marinhas atuassem 100% do tempo o ano todo, razão pela qual estes

valores são bem altos. Estes valores só servem como forma comparativa entre as diversas análises realizadas e como forma de identificar as regiões críticas sujeitas à fadiga no conjunto RISER/LMRP-BOP-CONDUTOR .

Tabela 4. 16: Síntese das VIV *Cross-flow*

Estudo de VIV's Cross-Flow				
Parâmetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Velocidade (m/s)	**2,36-0,01**	**2,36-1,18**	**2,36-2,30**	**1,18-0,01**
Frequências da Resposta (Hz)	0,429	0,438	0,545	0,34
Strouhal	0,45	0,45	0,302	0,45
Frequências de Shedding (Hz)	1,26	1,23	1,209	0,998
Amplitude da Resposta	0,704	0,42	0,64	0,685
CA	2,18	2,12	2,063	2,2
Comprimento de Excitação	1439	2354	2354	820
A/D	1,38	0,82	1,255	0,59
Vr	6.1	6,3	6	7,2
Danos máximos (1/anos)	**95,65**	**8,09**	**15,27**	**11,25**

Tabela 4. 17: Síntese das VIV *In-line*

Estudo de VIV's *In-Line*				
Parâmetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Velocidade (m/s)	**2,36-0,01**	**2,36-1,18**	**2,36-2,30**	**1,18-0,01**
Frequências da Resposta (Hz)	0,96	1,06	1,23	1,352
Strouhal	0,45	0,45	0,302	0,45
Frequências de Shedding (Hz)	1,26	1,23	1,209	0,998
Amplitude da Resposta	0,0753	0,11	0,15	0,382
CA	1,02	0,92	0,59	1,02
Comprimento de Excitação	1910	2354	3071	1629
A/D	0,091	0,134	0,183	0,466
Vr	3	3,01	3,93	2

Danos máximos (1/anos)	1,63	76,9	6,9	1,72

No nosso caso, como se trata de um *Riser* rígido de perfuração, uma estrutura soldada escolhemos a curva F1 da DnV. A Tabela 4.18 apresenta os parâmetros da Curva S-N escolhida.

Tabela 4. 18 – Parâmetros as curva S-N para a curva F1.

m	**A**	**log *A***
4,00	$10^{15,01}$	15,01

Inicialmente, para o cálculo do dano, determinamos a variação da tensão a partir da qual será calculado o número de ciclos (usando o método do *Rainflow*) até a falha, como foi detalhado no capítulo 3 do presente trabalho. Em seguida, para cada modo é determinado um dano, multiplicando-se o dano causado pela variação de tensão de cada ocorrência. O dano total será a soma de todos os danos.

Os dados experimentais estudados até o momento indicam que a amplitude de vibração transversal (VIV *Cross-flow*) é significamente maior que a longitudinal (VIV *In-line*), no entanto, esta não deve ser desprezada visto que sua frequência de vibração é aproximadamente o dobro ou mais que da frequência transversal, podendo gerar danos significativos no cálculo de fadiga devido a maior curvatura do modo excitado longitudinalmente e ao maior número de ciclos (LOPES, 2006). Isso ficou bem claro nas Tabelas anteriores e pode se observar também pelos gráficos de VIV *In-line* e *Cross-flow*, o maior dano ocorreu na região da cabeça do poço para a maior corrente triangular, ou seja, para a corrente de 0,01 até 2,36 m/s. Devido ao fato de amplitudes da resposta dinâmica *out-of-plane* serem maiores que *In-plane* para esta corrente triangular o dano da vibração *Cross-flow* foi bem maior que o dano da vibração *In-line* e isso se verificou para o restante dos casos. No âmbito da nossa pesquisa, o ponto mais crítico é aquele que apresenta maior incidência de dano à fadiga. Como já foi mencionado na introdução, o nosso foco será no conjunto *LMRP-BOP*-condutor, além de analisar a fadiga a 16m de profundidade dentro do condutor.

Pode se observar que para os valores das amplitudes adimensionais e das velocidades reduzidas para os dois tipos de vibrações (*In-line* e *Cross-flow*), os resultados se encaixaram perfeitamente nos padrões encontrados pela formulação das recomendações práticas da DNV (DNV RP F105, 2006).

Segundo a norma citada acima, as amplitudes adimensionais e as velocidades reduzidas para a vibração *In-line* deve se adequar a esta condição:

$$1 \leq V_R \leq 4{,}5. \qquad \text{e} \qquad 0 \leq \frac{A_{IL}}{D} \leq 0{,}2$$

Estas duas condições foram satisfeitas com base nos resultados nas Tabelas de sínteses dos resultados. Somente o último caso que deu um valor fora do esperado e isso se explica pela calibração de alguns parâmetros que não geraram figuras esperadas. Da mesma forma, as amplitudes adimensionais e as velocidades reduzidas para a vibração *Cross-flow* deve se adequar a esta condição:

$$4 \leq V_R \leq 16 \qquad \text{e} \qquad 0{,}8 \leq \frac{A_{CF}}{D} \leq 1{,}4$$

Para VIV *Cross-flow*, as duas condições foram plenamente satisfeitas, seja para amplitude adimensional quanto à velocidade reduzida.

Neste estudo, para os casos analisados das correntes marinhas, verificou-se que os danos finais devidos à fadiga considerando VIV In-line foram inferiores em relação aos danos acarretados pelas VIV *Cross-flow*. *No entanto, sugere-se que esta verificação deve ser sempre realizada para todas as correntes marinhas possíveis na região onde o riser deve operar.* .

5

Conclusão

5.1. Conclusões

Como foi descrito neste trabalho de pesquisa, o problema de Vibrações Induzidas por Desprendimento de Vórtices(VIV) está sendo bastante estudado na indústria offshore. Porém, não se tem ainda um entendimento completo deste fenômeno, haja vista a sua complexidade. Diversos parâmetros semi-empíricos utilizados na obtenção da resposta são de difícil obtenção principalmente estruturas esbeltas tipo risers de perfuração e de produção situados em grandes profundidades. A maioria dos parâmetro utilizados nos softwares disponíveis foi obtida com ensaios em tanques físicos limitados o que implica em na adoção de hipóteses bastante conservativas . Assim, este trabalho foi desenvolvido com ênfase na contribuição para melhorar entendimento do comportamento de um riser de perfuração localizado em águas ultra-profundas com parâmetros disponíveis na bibliografia e com um software que levasse em consideração a variação da massa adicionada e também contemplasse as VIV Cross-line e In-line. Os resultados preliminares obtidos no presente trabalho foram similares aos do trabalho de pesquisa de HARILDSTAD, que estudou a fadiga no *BOP* de um *Riser* a partir de uma análise local. Considerando estes resultados preliminares de que não haveria maiores danos no *BOP*, o presente estudo ampliou o campo de visão e entendimento do conjunto riser/condutor, incluindo todo o conjunto de elementos localizados na conexão entre o *Riser* e o poço. Dessa forma, o objetivo principal desta dissertação foi o de analisar a fadiga de um *Riser* rígido de perfuração com enfoque no conjunto *LMRP-BOP*-Condutor, sob o ação de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices(VIV Cross-line e VIV In-line), levando em conta os parâmetros mais

relevantes que regem o fenômeno. Desta forma, pode-se identificar as regiões mais vulneráveis a este fenómeno.

Para a realização das análises e processamento de resultados contidos neste presente trabalho, três procedimentos foram de suma importância e merecem ser destacados.

Primeiramente, foi desenvolvido um modelo de um *Riser* rígido de perfuração com carga de 1912,7 kN aplicada em cada um dois seis tracionadores com seções em elemento de cabo, de acordo com as exigências da norma API ISO TR 136234-2. Este modelo se tornou inviável para ser usado no estudo de vibrações induzidas por vórtices, visto que o programa VIVANA até atual versão não aceita os elementos com seção em cabo ou "*bare Cross-section*". Com isso, foi necessário eliminar os tracionadores atendendo aos critérios do programa VIVANA; assim foi substituído o modelo com tracionadores pelo modelo sem tracionadores mas, com uma carga aplicada no topo do *Riser* que representaria o equilíbrio estático, ou seja, a resultante de todos esforços aplicados nos tracionadores.

Em segundo lugar, foi desenvolvido um procedimento para a confecção de um modelo que mantivesse similaridade com parâmetros da dinâmica global e as frequências naturais do modelo anterior. Até então, o modelo estudado não contemplava a presençã do condutor e a interação solo/estrutura. Após a aplicação desta carga equivalente, verificou-se que as frequências naturais foram praticamente as mesmas conforme resultados comparativos apresentados ao longo do texto

O último e terceiro procedimento diz a respeito à modelagem do condutor com uma posterior introdução de 32 molas com rigidez de 4,68 KN/m cada, para as novas análises estática, dinâmica e do VIVANA para um estudo resposta dinâmica do Riser rígido de perfuração sob efeito de vibrações induzidas por vórtices.

As análises foram realizadas considerando correntes marinhas com perfis triangulares, trapezoidais e uniformes mantendo-as dentro do intervalo da corrente triangular fornecido no exemplo da norma: 2,36 na superfície e 0,01 m/s no fundo do mar.

Dessa forma, o estudo de Vibrações Induzidas por Desprendimentos de Vórtices considerando o modelo do *Riser descrito ao longo do texto* fazendo sempre considerando as duas direções;

1. somente VIV *Cross-flow;*

2.. somente VIV *In-line*

Isso feito, passou-se a determinar os respectivos danos devidos às VIV r com o objetivo principal de identificar as regiões mais suscptíveis à fadiga no conjunto *LMRP-BOP*-Condutor. Com base nos resultados, pode-se perceber que a estrutura apresentou o maior dano devido à fadiga na cabeça do poço, o que já foi também constatado nos estudos anteriores de vários pesquisadores. Porém, o mais interessante é que o atual trabalho traz uma visibilidade do comportamento da estrutura, a partir de parâmetros do estudo de VIV, considerando parcialmente a contribuição de cada parcela de VIV, a fim de quantificar o tipo de VIV que traz maiores danos por fadiga à estrutura.

As VIV *Cross-flow* foram responsáveis em influenciar o maior comportamento vibratório do *Riser*, apresentando maiores variações de tensões na cabeça do poço e danos à fadiga. As *VIV In-line* apresentaram um dano bem menor nessa região. Com isso, foi constatado que o ponto mais crítico do conjunto *LMRP-BOP*-condutor, foi a região da cabeça do poço que apresentou maior dano à fadiga em relação aos outros pontos analisados.

Vale ressaltar aqui a praticidade dos Programas *RIFLEX* e VIVANA, que apresentaram uma visibilidade a partir de um conjunto de parâmetros que facilitam o entendimento de certos conceitos para minimizar a complexidade de estudo de VIV para o nosso modelo, já que estamos tratando de diferentes tipos de corrente (uniformes e triangular). Mesmo assim, a complexidade deste fenômeno permanece ainda o que o torna muito desafiador para a indústria *offshore*.

De uma forma resumida, algumas considerações importantes merecem ser destacadas:

> O fenômeno de Vibrações Induzidas por Desprendimento do Vórtice, ainda continua um conceito desafiador na indústria *offshore*, principalmente pela sua complexidade. A complexidade está concentrada na obtenção de vários parâmetros empíricos que regem o fenômeno e nas hipótes simplificadoras adotadas nas análises. o descrevem. No caso em estudo, foram apresentados alguns resultados destacando a variabilidade de certos parâmetros como diâmetro, frequência de Shedding e o número de Strouhal.

- De forma similar que foi obtido por HARILDSTAD, o atual estudo de dano à fadiga, a partir do programa VIVANA, no conjunto *LMRP*, *BOP* e no Condutor, mostrou a partir dos gráficos discutidos na análise de resultados que o Dano a Fadiga no *LMRP* e no *BOP* foram bem inferiores do que em outras regiões, tais como a cabeça do poço.

Visto que a tendência atual é continuar a exploração de petróleo em águas ultra profundas, a lâmina d'água tende a aumentar cada vez mais, o que torna a massa adicionada um parâmetro extremamente importante pois, a variação dela pode alterar significamente a dinâmica da resposta da estrutura e implicar na variação de outros parâmetros associados com o fenômeno de vibrações induzidas por vórtices.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, nos deparamos com alguns pontos que, uma vez levados em consideração, podem vir a contribuir na melhoria dos estudos de vibrações induzidas por desprendimentos de vórtices ou estudos e análises de estruturas:

- Realizar o mesmo trabalho mas, desta vez usando o programa DeepC, que, por ser o mais atualizado, traz novos parâmetros para melhorar a visualização do comportamento de estrutura sob efeitos de VIV;
- Realizar o estudo de fadiga com várias correntes marinhas com perfis de menor velocidades de tal forma a se obter uma vida útil mais realista.
- Repetir as análises realizadas considerando a inclusão de supressores de vórtices nas regiões do riser acima do LMRP mais excitadas de tal forma a minimizar o dano devido às VIV próximas à cabeça do poço.
- Analisar localmente a cabeça do poço, com intuito de se entender os pontos relativos mais críticos na escala menor desta região sujeita a elevados esforços e danos à fadiga;
- Realizar estudos experimentais de análise de vibrações induzidas por vórtices, considerando ensaios de laboratórios e em situ de tal forma a se obter parâmetros emíricos mais realistas.

- Estudar a variabilidade do modelo nos limites de regiões de amortecimento e de excitação.
- Introduzir de uma forma mais realista o amortecimento devido ao solo o que deve contribuir para a diminuição do dano na região próxima à cabeça do poço
- tentar obter os parâmetros empíricos com o auxílio de ferramentas computacionais mais sofisticadas
- Desenvolver programas para análise de VIV no domínio do tempo que contemplem a tri-dimensionalidade do fenômeno, a simultaineidade das VIV Cross-line e in-line, as não linearidades geométricas,, a variação da massa adicionada, etc.

6
Referências Bibliográficas

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *Recommended Practice for Design of Risers for Floating Production Systems and Tension-Leg Platforms*. API RP 2RD, 1998.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *Petroleum and Natural Gas Industries-Drilling and Production equipment. Deepwater Drilling*.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *Recommended Practice for 6Design, Selection, Operation and maintenance of Marine Drilling Riser Systems*. API RP 16Q, Washington 1993, 48p.

ARONSEN, K., (2007). "*An experimental investigation of in-line and combined in-line and cross-flow vortex induced vibrations*". DSc. Thesis, Department of Marine Technology, NTNU.

ASTM E399 - 12e1 (2012), *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain FractureToughnessKIc of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI:10.1520/E0399-12E01, www.astm.org.

AZPIAZU, W.R., NGUYEN, V.N., (1984). *Vertical Dynamics of marine Risers*. Annual OTC (*Offshore Technology Conference*). In Houston, Texas, may7-9, 1984.

BARROS, P. P. S., "Projeto de um Jumper Rígido Offshore", M. Sc., (PPE) -Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

BRANCO, M. *et al* (1986), Fadiga de Estruturas Soldadas, edição de Fundação Calouste Gulbenkian, agosto de 1986.

BLEVINS, R. D., (1994). *Flow-Induced Vibration.* 2 ed., Van Nostrand & Reinhold Company. New York, USA.

BLEVINS, R. D., (1993). *Formulas for Naturals Frequency and Mode Shape.* Ed. Krieger Publishing Company Malabar, Florida, USA.

BRENO, P.J., (2015). *Métodos Computacionais e Sistemas Offshore*. Notas de Aula CPC799, COPPE/UFRJ, Brasil.

CARNEIRO, D.L., (2007). *Análise de Vibrações Induzidas por Vórtices em Estruturas Offshore Utilizando Modelos Numéricos Tridimensionais no Domínio do Tempo*. Dissertação de Mestrado, (PEC) COPPE/UFRJ, Brasil.

CHAKRABARTI, S.K. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Londres: *Computational Mechanics Publication*, 1987. 440 p.

CHAPLIN, J.R., et al, (2005). *Blind Predictions of Laboratory Measurements of Vortex-Induced Vibrations of a Tension Riser*. Journal of Fluids and Structures, vol. 21, pp. 25-40.

CORRÊA, F.N., 2008, *Ferramentas Computacionais para Análise Acoplada de sistemas Offshore.* Tese de Doutorado, (PEC) COPPE/UFRJ, Brasil.

DARA, W., (2017), FEARGAL, K., (2017), *Calculation of VIV of Multi-Pipe Systems*. Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.

DNV-OS-F201 DNV (2001), *Dinamic Risers.* Det Norske Veritas, Noruega.

DNV-RP-C203 DNV (2017), *Recommended Pratices, Free spanning pipelines* Det Norske Veritas, Noruega.

DNV-RP-C205 DNV (2010), *Enviromental Conditions and Environmental Loads.* Det Norske Veritas, Noruega.

DNV-RP-F105 (2006), *Recommended Pratices, Free spanning pipelines* Det Norske Veritas, Noruega.

DNV-RP-*C*203 DNV (2005), *Fatigue Design of Offshore Steel Structures.* October, Det Norske Veritas, Noruega.

DYNGVOLD, S. H. O., (2011). *Development of simulation model for virtual testing and design of a riser tensioner system*. M Sc. Thesis, University of Agder, Agder, Noruega.

ELIZBAR, B.K. *et al*, (2017), *wellheadmonitoring - measured fatigue damagevalidation*. Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.

FORTALEZA, E, (2011). *Analysis of phenomenological models of vortex-induced vibrations*. OMAE 49403, Rotterdam.

FRANCISS, R., (1999). *Vibrações Induzidas por Vórtices em Membros Esbeltos de Estruturas Offshore Flutuantes.* Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Brasil.

GIRÓN, A.R.C., 2009, *Aplicação de metodologias de projeto integrado de sistemas de ancoragem e risers na Explotação de petróleo offshore*. Dissertação de Mestrado, (PEC) COPPE/UFRJ, Brasil.

GOPALKRISHNAN, R., (1993). *Vortex Induced Forces on Oscillating Bluff Cylinders*. DSc. Thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts, Boston, USA.

GRIFFIN, O.M., RAMBERG, S.E., (1975). *The Resonant, Vortex Excited Vibrations of structures and Cable Systems*. OTC 2319, Dallas, Texas, USA.

GRIFFIN, O.M., RAMBERG, S.E., (1982). *Some recent studies of vortex shedding with application to marine tubular and risers.* Trans. ASME Energy Resour. Technol. 104:2-13.

GROVE, M.A., (2005). *Sistema de Posicionamento Híbrido para FPSOs*. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE/UFRJ, Brasil.

GROVE, M.A., (2005). *Sistema de Posicionamento Híbrido para FPSOs*. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE/UFRJ, Brasil.

HARILDSTAD, E., HAUKANES, A., (2013). *Effects of BOP Stack Modelling on Estimated Wellhead Fatigue Damage.* Master Thesis, Department of Marine Technology, NTNU, Norway.

ISO – *International Organization of Standardization* /TR 136234-2.

LARSEN, C.M., VIKESTAD, K., YTTERVIK, R. and PASSANO, E. (2001): "*Empirical model for analysis of vortex induced vibrations - theoretical background and case studies*", OMAE2001-1203, 20th international conference on Offshore mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil

LARSEN, CARL M., BAARHOLM, GRO S., PASSANO, ELIZABETH and KOUSHAN, KAMRA: (2004) *"Non-linear Time Domain Analysis of Vortex Induced Vibrations for Free Spanning Pipelines"*. OMAE2004-51404, Proceedings of 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, Canada

LARSEN, C.M., BAARHOLM, G.S. AND LIE, H. (2005): *"influence from helical strakes on vortex induced vibrations and static deflection of drilling risers"*. OMAE2005-67192, Proceedings Of 24rd International Conference On Offshore Mechanics And Arctic Engineering, Halkidiki, Greece.

LOPES, R.K.D., (2006). *Análise de Estruturas sujeitas a Vibrações Induzidas por Vórtices*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, (PEC) COPPE/UFRJ, Brasil.

MARTINS, C.A., 1989, *Amortecimento ativo para reduzir vibrações induzidas por vórtices em risers*. Tese de D. Sc., USP - Universidade de São Paulo.

MATHCAD, (2015). *MathCAD Professional 8.0 User´s Guide*. MathSoft, Cambridge Massachussets, USA.

MOREIRA, J.C.D., (2003*), Análise global estática de um sistema de perfuração para águas profundas composto de riser marinho e revestimento concêntrico.* Dissertação de mestrado. Universidade Federal do rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Brasil.

NOGUEIRA, G. (2015), Avaliação da fadiga emm jumpers rígidos devido a birações in-line produzidas pelo fenômeno de VIV.. Curso (Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

ORSINI de CASTRO, (2011), F.M. . Aços para Plataformas Fixas Offshore.. Monografia (MSO - Curso Especialização em Sistemas Offshore) - Programa de Engenharia Naval da COPPE-UFRJ

ORSINI de CASTRO, (2013). Análise nãoi linear de plataformas fixas offshore do tipo Jaqueta de Aço: estudo e aplicação do método quase-estático PUSHOVER. Dissertação (PPE) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

PESTANA, R. G. (2013).. Análise de desconexão de emergência de risers de perfuração em águas ultra-profundas. Dissertação (PEC) - COPPE - UFRJ

RIFLEX *Theory Manual*, SINTEF Report STF70 F95219, September 1995, Trondheim, Norway.

RIFLEX *User's Manual*, MARINTEK report, March 2005, Trondheim, Norway

RUBIN, A., GUDME, J., (2006). *Qualification of Steel Wire for Flexible Pipes.* NACE International – Corrosion, March, San Diego, California, USA.

RIVA, I.R.. (2008). Análise de Vibrações Induzidas por desprendimento de vórtices no domínio da freqüência considerando variação da massa adicionada. Dissertação mestrado (PEC) - Programa de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ

RODRIGUES, V.C.. Análise de Fadiga em. (2011) . Curso (Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

SANTOS, C.M.P.M., (2005), *Análise de Estruturas Esbeltas Offshore Sujeitas a Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV).* Tese de D.Sc., (PEC) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA, R.S.L., (2008). *Descomissionamento de Sistemas de Produção Offshore de Petróleo: O Exemplo de Aberdeen para as Cidades Petrolíferas Brasileiras.* Dissertação de Especialização em Engenharia de Petróleo e Gás Natural. Universidade Federal Fluminense (UFF), Brasil.

TAKAFUJI, F. (2010), *Dinâmica tridimensional de risers.* Dissertação de Doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

TAKEDA, C., (2008), *análise de fadiga para riser de perfuração.* Dissertação de mestrado. Universidade Federal do rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Brasil.

THOMAS, J.E., (2001), *Fundamentos de Engenharia de Petróleo.* Ed. Interciência, Petrobras, 2001 Rio de Janeiro.

TSUKADA, R. I., YAKAMOTO, M., MOROOKA, K.C., (2007), *Análise de operação da instalação de risers e descida de BOP em sondas flutuantes de perfuração.*4° PDPETRO, Campinas, SP 2.4.308 pp 2– 9, 21-24 de outubro de 2007.

VANDIVER, J. K., (1993) *Dimensionless Parameters Important to the Prediction of Vortex-Induced Vibration of Long Flexible Cylinders in Ocean Currents. Journal of Fluids and Structures*, vol. 7, pp. 423-455.

VANDIVER, J. K., CHUNG, T. Y., (1987). *Hydrodynamic Damping on Flexible Cylinders in Shared Flow*, MIT, Cambridge, Massachusetts, USA.

VANDIVER, J. K.; LI, L.; LEVERETTE, et al, *User Guide for SHEAR7 V4.4, MIT - Massachusetts Institute of Technology*, 2005.

VELLOSO, D. A., LOPES, F. R., Fundações. v. 2, 1 ed., Editora COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

VENUGOPAL, M., (2004). *Cross-flow and In-line damping measurements from forced excitations of a flexible cylinder in a uniform flow,* OMAE 51397.

VENUGOPAL, M., VANDIVER, J.K., *Damping and Response Predictions of a Flexible Cylinder in a Current*, MIT, Cambridge, Massachusetts, USA.

VIKESTAD, K., LARSEN, C. M., VANDIVER, J. K., (1997). *Experimental Study of Excited Circular Cylinder in Current*. *Proceedings of the* 16th OMAE, Yokohama, Japan.

VIKESTAD, K., LARSEN, C. M., VANDIVER, J. K., (1998). *Added Mass and Oscillation Frequency for a Circular Cylinder Subjected to Vortex Induced Vibrations and External Disturbance. Proceedings of the 2nd Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Research Institute for Applied Mechanics (RIAM),* Kyushu University, Fukuoka, Japan.

VIKESTAD, K., (1998). *Frequency Response of a Cylinder Subjected of Vortex Shedding and Support Motions, PhD Thesis - Norwegian Deepwater Program: Multi – Trondheim*.

VIVANA, 4.6.1, (2015). *User's Manual*, MARINTEK, Department of Marine technology, NTNU, Norway.

RODRIGUES, V.C.. Análise de Fadiga em. (2011) . Curso (Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

VOLPINI, J.H.M., (2012) *RIFLEX – Análise Estrutural Não linear de Linhas Flexíveis (Risers e umbilicais).* Apostila DNV-Software – Maritime and Offshore Solutions, Brasil.

Anexo I

1. O Programa RIFLEX

1.1. Histórico

O *RIFLEX* é um software desenvolvido pela MARINTEK e SINTEF em cooperação com a NTNU (*Norwegian University of Science and Technology*) como resultado de um JIP. Além disso, houve também certas empresas que participaram de alguma forma na elaboração do projeto, como, BP *Petroleum Development*, Conoco *Norway*, Esso Norge, Norse Hydro, Saga *Petroleum* e Statoil. Este software é exclusivamente de comercialização da DNV.

1.2. Aspetos Gerais

O *RIFLEX* é um programa adequado para análise de *Riser* e sistemas de *Risers* descrevendo o comportamento global estático e dinâmico para deslocamentos, curvaturas, ângulos e forças resultantes. Esta ferramenta se emprega também em quaisquer tipos de estruturas esbeltas como, linhas de ancoragem, umbilicais, tendões TLP, SCRs, linhas de reboque e Mangueiras de transferência.

1.3. Recursos

O Programa opera em modo DOS com os módulos que se comunicam entre eles por meio de arquivos de entrada e de resultados. O *RIFLEX* é um dos mais rápido que existe para as análises de estruturas offshore e oferece vários recursos dentre eles; (VOLPINI, 2012).

- Modelagem de carregamento por Morison,
- Vários espectros de onda (Pierson-Moscowitz, Joswap, Torsethaugen) ou a ser determinado pelo usuário,
- Ondas regulares (Airy ou Stokes) e irregulares,
- Recurso para perturbação cinemática,

- Perfis arbitrários de corrente 3D variáveis com o tempo,
- Efeitos de pressão hidrostática interna e externa, efeitos de contato com leito do oceano (atrito, sucção),
- Propriedades não lineares de materiais,
- Contato com roletes e tracionadores,
- Formulação do contato pipe-in-pipe e com o casco
- Elementos de conexão (rótulas, juntas flexíveis, *swivels*).

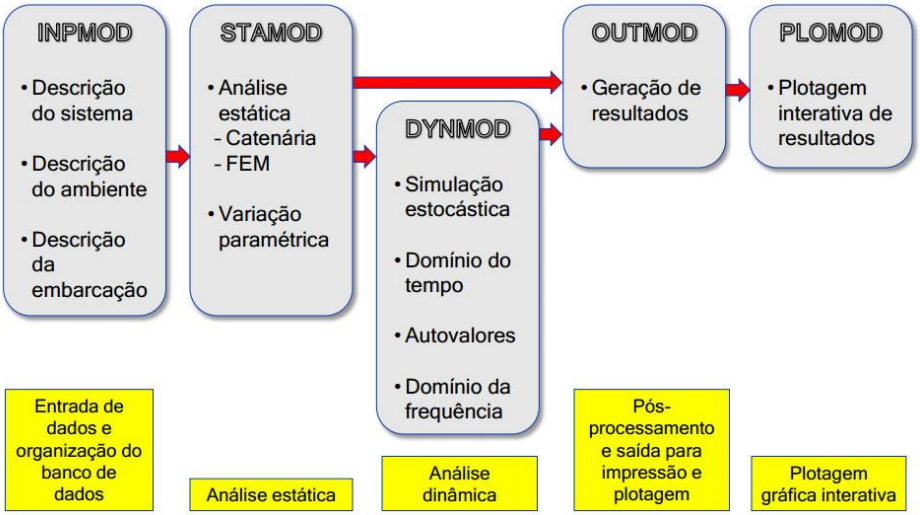

Figura I. 1– Estrutura dos módulos do *RIFLEX*. (VOLPINI, 2012)

Vale ressaltar que além destes recursos citados anteriormente, o programa *RIFLEX* faz quatro tipos principais de análises baseadas na não-linearidade por elementos finitos:

- Análise Estática não linear que é um pré-processamento baseado na teoria de catenária.
- Análise paramétrica estática
- Análise dinâmica linear e não-linear no domínio do tempo, incluindo análise dos autovalores e dos autovetores, através de integração numérica.
- Análise no domínio da frequência que se embaseia na aplicação da linearização estocástica do carregamento hidrodinâmico.

Como foi mostrado na Figura 2.16, o programa *RIFLEX* é dividido em 5 módulos dos quais a entrada de dados se faz pelo módulo INPMOD ou a partir de

arquivo externo. O INPMOD é o módulo pelo qual se define a descrição do sistema, as cargas ambientais, as propriedades da estrutura (no nosso caso as propriedades geométricas e mecânicas do *Riser*) e a descrição da UF. Em seguida, se usa o módulo STAMOD que representa ou armazena os dados da análise estática do módulo. Estes dois módulos são fundamentais no âmbito da nossa pesquisa. O terceiro módulo ou o DYNMOD é o módulo que fornece a resposta dinâmica do sistema no domínio do tempo ou da frequência dependendo dos resultados que se esperam. O OUTMOD e PLOMOD são módulos que não dependem necessariamente dos dados do INPMOD; eles podem até receber dados de fora do programa fazendo um pós-processamento ou a partir de certas extensões como EIGENVALUES (um módulo que calcula somente autovalores, autovetores e frequências angulares) e VIVANA.

Para a modelagem da estrutura no programa *RIFLEX* se usa uma lógica que pode ser entendida da seguinte forma: a estrutura ou linha é constituída por segmentos, que por sua vez são divididos em elementos. Neste contexto, a linha é considerada como um conjunto de elementos lineares contido entre dois super-nós. O segmento pode ser entendido como um pedaço de uma linha representado por um conjunto de elementos que têm algumas propriedades em comum; por exemplo, seção transversal igual ou mesmo comprimento etc. Dependendo das condições de contorno, os super-nós podem ser fixos, livres ou engastados. A Figura 2.17 explica melhor o que foi descrito anteriormente.

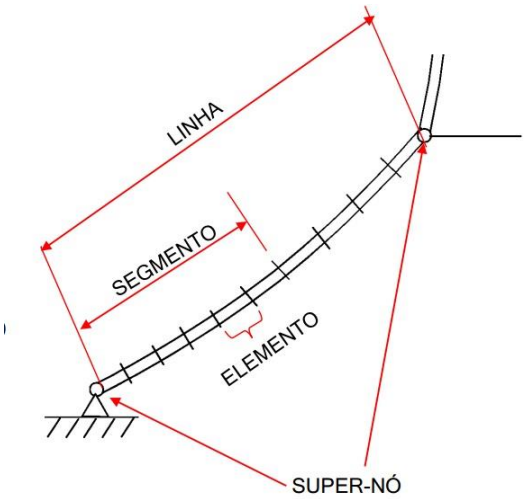

Figura I. 2 – Estrutura de modelagem de linhas no *RIFLEX*

Fonte: (Manual teórico RIFLEX, 2001)

Estes conceitos serão apresentados com mais detalhes na seção de estudo e modelagem do *Riser* da nossa pesquisa.

2. O Programa VIVANA

Conceitos Básicos

O programa VIVANA, também um produto da MARINTEK, é uma ferramenta computacional desenvolvida por Larsen, para calcular no domínio da frequência a resposta dinâmica das estruturas esbeltas excitadas por vibrações induzidas por desprendimento de vórtices devido às correntes marinhas. Com base nos estudos de Larsen et al, e com base nos testes experimentais de Venugopal, podemos dizer que o VIVANA está diretamente conectado aos arquivos do programa *RIFLEX* por meios dos arquivos internos. O VIVANA precisa de dois módulos do *RIFLEX* para rodar; INPMOD e STAMOD que são considerados também em algumas hipóteses como módulos do programa VIVANA.

O VIVANA é uma ferramenta a partir da qual podemos analisar a resposta dinâmica de várias estruturas como *Risers* rígidos e flexíveis, linhas de ancoragem, umbilicais, tendões e pipelines. A Figura 2.18 apresenta os módulos e o funcionamento do VIVANA.

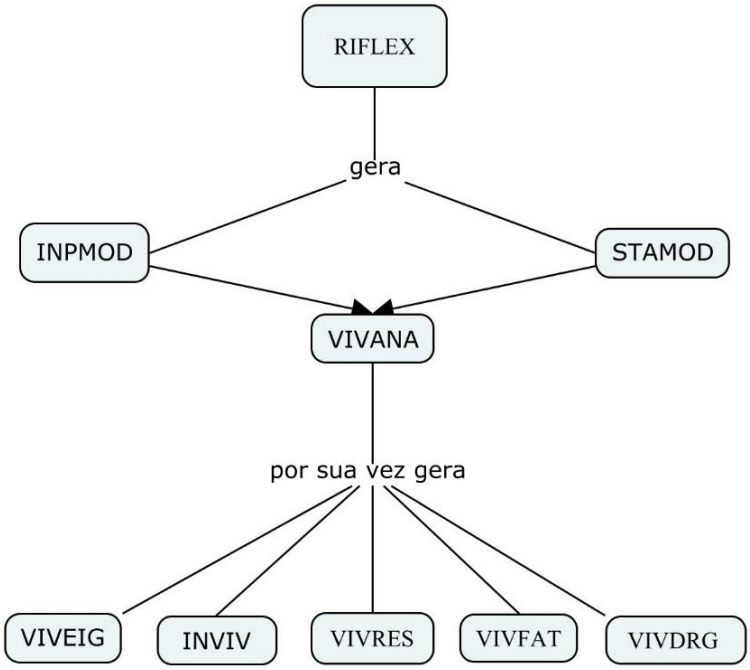

Figura I. 3 – A estrutura Geral do VIVANA (Manual teórico VIVANA, 2001).

Entre os múltiplos recursos que o programa VIVANA oferece podemos citar;

- Recursos para determinação da variação de alguns parâmetros ao longo de toda a extensão da estrutura (diâmetro, número de Strouhal, coeficiente de sustentação e de arrasto, a massa adicionada, etc.) por meio do módulo INIVIV.
- Recursos para determinação de Períodos e frequências naturais por meio do módulo VIVEIG.
- Recurso para determinação da zona mais excitada e amortecida para todas as frequências da resposta do *Cross-flow* (CF) e *In-line* (IL) por meio do módulo VIVRES.
- Recursos para determinação das frequências e modos dominantes da resposta por meio do VIVEIG.
- Recursos para cálculo das amplitudes e fadigas por meio do módulo VIVFAT que usa os resultados do módulo VIVRES.
-

No âmbito da nossa pesquisa, para análise de VIV serão feitas três análises a seguir:

- Análise estática não linear com intuito de determinar os esforços axiais e tensões exercidos sobre o *Riser*; este módulo calcula somente o peso próprio.
- Análise EINGENVALUE que usa o módulo VIVEIG do programa VIVANA para a determinação das frequências naturais.
- Análise de VIV para determinar a resposta dinâmica da estrutura e as amplitudes correspondentes.

Vale ressaltar aqui que o VIVANA atualiza a massa adicional a cada passo, o que o torna mais eficiente me relação aos outros programas comerciais. No VIVANA, a resposta dinâmica da estrutura dá duas frequências; uma fixa e outra se atualiza com a massa adicional e no âmbito da nossa pesquisa iremos trabalhar com a frequência fixa.

Anexo II

1. As Tabelas de Cálculo de Frequências de VIV *In-line*

1.1 Caso 1: Para U_1= 2,36m/s e U_2= 0,01m/s

Foi necessário o uso de 220 modos de vibração

Estudo de VIV *In-line*				
Modos	**Frequência Nat. em (Hz)**	**Frequência da Resp. em (Hz)**	**Parâmetro de Execitação**	**Energia de Excitação**
1	0,02	0,03	0	0
2	0,04	0,06	0	0
3	0,06	0,088	0	0
4	0,08	0,114	0	0
5	0,1	0,14	0	0
6	0,119	0,169	0	0
7	0,138	0,198	0	0
8	0,157	0,226	0	0
9	0,177	0,251	0	0
10	0,198	0,287	0	0
11	0,219	0,306	0	0
12	0,239	0,309	0	0
13	0,259	0,332	1,06	0
14	0,278	0,359	1,36	0
15	0,297	0,384	1,69	0,01
16	0,307	0,41	2,15	0,01
17	0,318	0,437	2,73	0,01
18	0,34	0,461	3,41	0,01
19	0,361	0,486	4,25	0,012
20	0,381	0,511	5,21	0,015
21	0,399	0,535	6,27	0,018
22	0,419	0,56	7,54	0,021
23	0,439	0,583	12,5	0,036
24	0,461	0,607	31,6	0,09
25	0,482	0,631	67,9	0,19
26	0,503	0,653	120	0,34
27	0,522	0,674	176	0,5
28	0,541	0,692	222	0,63
29	0,562	0,71	255	0,72
30	0,583	0,726	275	0,78

31	0,604	0,74	288	0,82
32	0,665	0,754	297	0,84
33	0,685	0,77	298	0,85
34	0,706	0,786	291	0,83
35	0,727	0,802	279	0,79
36	0,749	0,821	270	0,77
37	0,769	0,84	266	0,76
38	0,789	0,856	267	0,76
39	0,809	0,878	272	0,78
40	0,829	0,897	284	0,81
41	0,85	0,915	303	0,87
42	0,872	0,933	327	0,93
43	0,893	0,938	331	0,95
44	0,914	0,952	343	0,98
45	0,932	0,96	350	1
46	0,938	0,987	346	0,98
47	0,953	1,01	340	0,97
48	0,974	1,02	335	0,95
49	0,996	1,04	331	0,94
50	1,017	1,06	329	0,94
51	1,039	1,07	325	0,92

Comprimento de Excitação		
Modos	**Comprimento de Excitação Inicial**	**Comprimento de Excitação Final**
1	115	21
2	233	21
3	266	30
4	289	47
5	282	40
6	282	40
7	295	26
8	336	13
9	363	13
10	403	13
11	443	0
12	457	13
13	497	13
14	538	13
15	591	13
16	645	0
17	699	13

18	834	13
19	1156	13
20	1573	0
21	2084	13
22	2071	13
23	2058	0
24	2058	13
25	2044	13
26	2031	13
27	2031	0
28	2017	13
29	2017	0
30	2004	0
31	2004	13
32	2004	53
33	1990	0
34	1990	0
35	1990	0
36	1977	0
37	1963	0
38	1963	0
39	1950	0
40	1937	13
41	1937	0
42	1923	0
43	1923	13
44	1923	13
45	1910	1910
46	1896	0
47	1896	0
48	1883	0
49	1883	0
50	1869	0
51	1856	0

1.2 Casos 2: Para U_1= 2,36m/s e U_2= 1,18m/s

Foi necessário o uso de 250 modos de vibração

Estudo de VIV *In-line*				
Modos	**Frequência Nat. em (Hz)**	**Frequência da Resp. em (Hz)**	**Parâmetro de Excitação**	**Energia de Excitação**
1	0,02	0,03	0	0
2	0,04	0,06	0	0
3	0,06	0,088	0	0
4	0,08	0,114	0	0
5	0,1	0,14	0	0
6	0,119	0,169	0	0
7	0,138	0,198	0	0
8	0,157	0,226	0	0
9	0,177	0,251	0	0
10	0,198	0,287	0	0
11	0,219	0,306	0	0
12	0,239	0,309	0	0
13	0,259	0,332	0	0
14	0,278	0,359	0	0
15	0,297	0,384	0	0
16	0,307	0,41	0	0
17	0,318	0,437	0	0
18	0,34	0,461	0	0
19	0,361	0,486	0	0
20	0,381	0,511	1,245	0
21	0,399	0,535	33,25	0,04
22	0,419	0,56	115	0,12
23	0,439	0,583	230	0,24
24	0,461	0,607	342	0,36
25	0,482	0,631	437	0,46
26	0,503	0,653	523	0,56
27	0,522	0,674	597	0,64
28	0,541	0,692	660	0,71
29	0,562	0,71	706	0,76
30	0,583	0,726	734	0,79
31	0,604	0,74	745	0,8
32	0,665	0,754	752	0,81
33	0,685	0,77	759	0,81
34	0,706	0,786	767	0,82
35	0,727	0,802	772	0,82
36	0,749	0,821	776	0,83

37	0,769	0,84	787	0,84
38	0,789	0,856	806	0,86
39	0,809	0,878	816	0,87
40	0,829	0,897	824	0,88
41	0,85	0,915	834	0,89
42	0,872	0,933	846	0,91
43	0,893	0,938	859	0,92
44	0,914	0,952	883	0,95
45	0,932	0,96	909	0,97
46	0,938	0,987	926	0,99
47	0,953	1,01	934	1
48	0,974	1,02	930	0,99
49	0,996	1,04	915	0,98
50	1,017	1,06	898	0,96
51	1,039	1,07	880	0,94

Comprimento de Excitação		
Modos	**Comprimento de Excitação Inicial**	**Comprimento de Excitação Final**
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	605	0
18	1439	0
19	1937	0
20	2340	0
21	2353	0
22	2353	0
23	2353	0
24	2353	0

25	2353	0
26	2353	0
27	2353	0
28	2353	0
29	2353	0
30	2353	0
31	2353	0
32	2353	0
33	2353	0
34	2353	0
35	2353	0
36	2353	0
37	2353	0
38	2353	0
39	2353	0
40	2353	0
41	2353	0
42	2353	0
43	2381	0
44	2453	0
45	2453	0
46	2453	0
47	2453	2453
48	2453	0
49	2453	0
50	2453	0
51	2453	0

1.3 Casos 2: Para U_1= 2,36m/s e U_2= 2,30m/s

Foi necessário o uso de 300 modos de vibração

Estudo de VIV *In-line*				
Modos	**Frequência Nat. em (Hz)**	**Frequência da Resp. em Hz**	**Parâmetro de Excitação**	**Energia de Excitação**
1	0,019	0,03	0	0
2	0,038	0,06	0	0
3	0,06	0,09	0	0
4	0,08	0,11	0	0
5	0,1	0,15	0	0
6	0,12	0,18	0	0
7	0,14	0,21	0	0
8	0,16	0,24	0	0
9	0,18	0,31	0	0
10	0,2	0,33	0	0
11	0,22	0,34	0	0
12	0,24	0,36	0	0
13	0,27	0,39	0	0
14	0,28	0,43	0	0
15	0,3	0,46	0	0
16	0,32	0,49	0	0
17	0,33	0,52	0	0
18	0,34	0,55	0	0
19	0,36	0,58	0	0
20	0,39	0,61	0	0
21	0,41	0,64	0	0
22	0,42	0,67	0	0
23	0,44	0,7	0	0
24	0,47	0,73	0	0
25	0,49	0,77	0	0
26	0,51	0,79	37	0,016
27	0,53	0,82	207	0,088
28	0,55	0,85	648	0,28
29	0,57	0,87	0	0,46
30	0,6	0,89	0	0,59
31	0,61	0,91	0	0,67
32	0,64	0,92	0	0,73
33	0,66	0,93	0	0,76
34	0,68	0,93	0	0,79
35	0,7	0,94	0	0,8
36	0,72	0,95	0	0,83
37	0,74	0,97	0	0,85

38	0,78	0,98	0	0,86
39	0,8	1	0	0,84
40	0,81	1,02	0	0,82
41	0,82	1,04	0	0,79
42	0,84	1,06	0	0,75
43	0,86	1,08	0	0,71
44	0,89	1,1	0	0,68
45	0,9	1,12	0	0,67
46	0,92	1,14	0	0,7
47	0,93	1,16	0	0,85
48	0,95	1,17	0	0,93
49	0,97	1,19	0	0,98
50	0,99	1,22	0	1
51	1,02	1,23	0	0,98
52	1,04	1,25	0	0,96
53	1,06	1,27	0	0,95

Comprimento de Excitação		
Modos	**Comprimento de Excitação Inicial**	**Comprimento de Excitação Final**
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	390	0
22	1533	0

23	2353	0
24	2353	0
25	2353	0
26	2353	0
27	2353	0
28	2353	0
29	2353	0
30	2353	0
31	2353	0
32	2353	0
33	2353	0
34	2353	0
35	2353	0
36	2353	0
37	2353	0
38	2353	0
39	2353	0
40	2353	0
41	2353	0
42	2353	0
43	2353	0
44	2353	0
45	2353	0
46	2353	0
47	2353	0
48	2353	0
49	2947	0
50	2975	0
51	3071	3071
52	3071	0
53	3071	0

1.4 *Casos 2: Para U_1= 1,18m/s e U_2= 0,01m/s*

Estudo de VIV *In-line*				
Modos	**Frequência Nat. em (Hz)**	**Frequência da Resp. em (Hz)**	**Parâmetro de Excitação**	**Energia de Excitação**
1	0,019	0,03	0	0
2	0,038	0,06	0,03	0
3	0,06	0,08	0,86	0
4	0,08	0,11	0,15	0
5	0,1	0,13	0,23	0
6	0,12	0,16	0,32	0
7	0,14	0,18	0,44	0,01
8	0,16	0,21	0,56	0,02
9	0,18	0,23	0	0,02
10	0,2	0,26	0	0,03
11	0,22	0,28	0	0,04
12	0,24	0,3	1,2	0,04
13	0,27	0,31	1,6	0,04
14	0,28	0,33	1,66	0,05
15	0,3	0,35	2,1	0,07
16	0,32	0,38	2,6	0,08
17	0,33	0,39	3,1	0,1
18	0,34	0,42	3,8	0,12
19	0,36	0,44	4,7	0,15
20	0,39	0,46	5,7	0,18
21	0,41	0,48	7	0,22
22	0,42	0,5	8	0,26
23	0,44	0,52	9	0,26
24	0,47	0,54	11	0,32
25	0,49	0,56	13	0,36
26	0,51	0,58	15	0,42
27	0,53	0,6	17	0,48
28	0,55	0,62	20	0,55
29	0,57	0,64	23	0,63
30	0,6	0,65	26	0,71
31	0,61	0,67	29	0,79
32	0,64	0,69	31	0,86
33	0,66	0,71	33	0,92
34	0,68	0,72	34	0,94
35	0,7	0,74	35	0,96
36	0,72	0,76	35	0,97
37	0,74	0,78	35	0,97
38	0,78	0,8	35	0,96
39	0,8	0,82	34	0,95
40	0,81	0,83	34	0,94

41	0,82	0,85	34	0,93
42	0,84	0,87	34	0,93
43	0,86	0,89	34	0,95
44	0,89	0,91	34	0,97
45	0,9	0,93	34	0,98
46	0,92	0,94	36	0,98
47	0,93	0,95	36	0,97
48	0,95	0,97	35	0,95
49	0,97	0,99	35	0,92
50	0,99	1,01	34	0,89
51	1,02	1,03	33	0,87
52	1,04	1,04	32	0,86
53	1,06	1,06	31	0,84
54	1,07	1,08	31	0,83
55	1,09	1,1	30	0,82
56	1,12	1,12	30	0,82
57	1,13	1,14	30	0,82
58	1,16	1,16	30	0,82
59	1,18	1,18	30	0,84
60	1,2	1,2	30	0,85
61	1,22	1,22	31	0,87
62	1,24	1,24	31	0,91
63	1,26	1,27	33	0,93
64	1,29	1,29	34	0,96
65	1,31	1,31	35	0,97
66	1,33	1,33	36	0,99
67	1,35	1,35	36	1
68	1,37	1,37	36	0,99
69	1,4	1,39	36	0,97
70	1,42	1,41	36	0,96

2. As Tabelas de Cálculo de Frequências de VIV *Cross-flow*

2.1 *Caso 2: Para U_1= 2,36m/s e U_2= 1,18m/s*

As análises feitas para o primeiro caso são válidas para o restante.

Estudo de VIV *Cross-Flow*				
Modos	**Frequência Nat. em Hz**	**Frequência da Resp. em Hz**	**Parâmetro de Excitação**	**Energia de Excitação**
1	0,019	0,085	0	0
2	0,039	0,177	0	0
3	0,06	0,247	0	0
4	0,081	0,3	594	0,099
5	0,102	0,348	-	0,552
6	0,121	0,351	-	0,588
7	0,14	0,369	-	0,745
8	0,16	0,376	-	0,780
9	0,18	0,382	-	0,811
10	0,202	0,388	-	0,839
11	0,223	0,392	-	0,862
12	0,244	0,397	-	0,883
13	0,264	0,401	-	0,9
14	0,283	0,405	-	0,916
15	0,303	0,408	-	0,928
16	0,324	0,411	-	0,940
17	0,346	0,413	-	0,948
18	0,367	0,418	-	0,962
19	0,388	0,421	-	0,973
20	0,406	0,426	-	0,984
21	0,407	0,428	-	0,989
22	0,427	0,434	-	0,998
23	0,447	0,438	875	1
24	0,469	0,446	-	0,998
25	0,019	0,452	-	0,995

Modo potencialmente EXCITADO é o modo 23

Quando o valor do comprimento de excitação apresenta um valor insignificante ou proximo de zero, colocamos diretamente zero. Neste caso, os demais modos não apresentaram uma variação significante do comprimento de excitação por

isso é igual a zero. Inicialmente eles fizeram a estrutura vibrar muito mas, depois a estabilização da estrutura somente o modo 23 que manteve a estrutura sob vibração por isso o comprimento final é igual a zero.

Comprimento de Excitação para CF caso 2

Comprimento de Excitação		
Modos	**Comprimento de Excitação Inicial**	**Comprimento de Excitação Final**
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	552	0
5	2085	0
6	2152	0
7	2354	0
8	2354	0
9	2354	0
10	2354	0
11	2354	0
12	2354	0
13	2354	0
14	2354	0
15	2354	0
16	2354	0
17	2354	0
18	2354	0
19	2354	0
20	2354	0
21	2354	0
22	2354	0
23	2354	2354
24	2354	0
25	2354	0

2.2 *Caso 3: Para U_1= 2,36m/s e U_2= 2,30m/s*

As frequências Naturais e da Resposta para CF caso 3

Estudo de VIV *Cross-flow*				
Modos	**Frequência Natural em (Hz)**	**Frequência da Resp.em Hz**	**Parâmetro de Excitação**	**Energia de Excitação**
1	0,019	0,087	0	0
2	0,039	0,187	0	0
3	0,06	0,256	0	0
4	0,081	0,357	0	0
5	0,102	0,406	-	0,48
6	0,121	0,417	-	0,555
7	0,14	0,459	-	0,684
8	0,16	0,475	-	0,722
9	0,18	0,481	-	0,74
10	0,202	0,486	-	0,757
11	0,223	0,489	-	0,769
12	0,244	0,493	-	0,788
13	0,264	0,495	-	0,795
14	0,283	0,499	-	0,813
15	0,303	0,503	-	0,838
16	0,324	0,507	-	0,854
17	0,346	0,509	-	0,867
18	0,367	0,512	-	0,881
19	0,388	0,515	-	0,895
20	0,406	0,52	-	0,919
21	0,407	0,52	-	0,917
22	0,427	0,522	-	0,93
23	0,447	0,524	-	0,94
24	0,469	0,526	-	0,95
25	0,491	0,529	-	0,961
26	0,512	0,532	-	0,973
27	0,532	0,534	-	0,981
28	0,551	0,537	-	0,989
29	0,571	0,541	-	0,996
30	0,592	0,545	624	1

Modo potencialmente EXCITADO é o modo 30.

Comprimento de Excitação para CF caso 3

Comprimento de Excitação		
Modos	**Comprimento de Excitação Inicial**	**Comprimento de Excitação Final**
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	2192	0
6	2354	0
7	2354	0
8	2354	0
9	2354	0
10	2354	0
11	2354	0
12	2354	0
13	2354	0
14	2354	0
15	2354	0
16	2354	0
17	2354	0
18	2354	0
19	2354	0
20	2354	0
21	2354	0
22	2354	0
23	2354	0
24	2354	0
25	2354	0
26	2354	0
27	2354	0
28	2354	0
29	2354	0
30	2354	2354

2.3 *Caso 4: Para U_1= 1,18/s e U_2= 0,01m/s*

Estudo de VIV *Cross-flow*				
Modos	**Frequência Nat. em Hz**	**Frequência da Resp. em Hz**	**Parâmetro de Excitação**	**Energia de Excitação**
1	0,016	0,038	0,4	0
2	0,03	0,086	1,9	0,01
3	0,054	0,095	2,4	0,01
4	0,074	0,14	6	0,03
5	0,094	0,16	14	0,07
6	0,11	0,19	22	0,11
7	0,13	0,2	26	0,13
8	0,15	0,22	36	0,19
9	0,16	0,23	50	0,26
10	0,18	0,24	57	0,29
11	0,2	0,26	77	0,4
12	0,21	0,27	99	0,51
13	0,23	0,29	125	0,65
14	0,25	0,3	152	0,79
15	0,27	0,32	185	0,96
16	0,28	0,33	189	0,98
17	0,31	0,34	192	1
18	0,33	0,35	191	0,99
19	0,35	0,37	189	0,98
20	0,37	0,38	186	0,97
21	0,38	0,39	183	0,95
22	0,41	0,4	177	0,92
23	0,43	0,41	168	0,87
24	0,44	0,43	149	0,77
25	0,48	0,45	113	0,59

Modo potencialmente EXCITADO é o modo

Comprimento de Excitação para CF caso 4

Comprimento de Excitação		
Modos	**Comprimento de Excitação Inicial**	**Comprimento de Excitação Final**
1	174	174
2	188	40
3	201	147
4	295	94
5	403	94
6	457	40
7	484	67
8	551	67
9	618	26
10	645	67
11	712	67
12	766	53
13	833	53
14	887	67
15	941	67
16	874	53
17	820	820
18	753	0
19	699	0
20	645	0
21	605	0
22	551	0
23	497	0
24	416	0
25	322	0