COPPE/UFRJ

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FADIGA DE RISERS SOB AÇÃO DE CARREGAMENTOS COM ESPECTROS BI-MODAIS

Pablo César Lazzaroni Garat

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: Luís Volnei Sudati Sagrilo

Edison Castro Prates de Lima

Rio de Janeiro
Abril de 2010

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FADIGA DE RISERS SOB AÇÃO DE CARREGAMENTOS COM ESPECTROS BI-MODAIS

Pablo César Lazzaroni Garat

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. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

_____
Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

_____
Dra. Elizabeth Frauches Netto Siqueira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2010

Garat, Pablo César Lazzaroni

Metodologia para Análise de Fadiga de Risers sob ação de Carregamentos com Espectros Bi-modais/ Pablo César Lazzaroni Garat. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIII, 79 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luís Volnei Sudati Sagrilo

Edison Castro Prates de Lima

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 72-75.

1. Fadiga. 2. *Riser* rígido. 3. Estruturas *Offshore*. I. Sagrilo, Luís Volnei Sudati, *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais, César e Huerto;

Aos meus irmãos Francisco e Eugenia;

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, César Luis Lazzaroni e Maria Del Huerto Garat, pelo incentivo, apoio e confiança que depositaram em mim para empreender uma nova etapa num país diferente e continuar ampliando as fronteiras dos meus conhecimentos.

Aos meus irmãos, Eugenia Lazzaroni Garat e Francisco Lazzaroni Garat pelo carinho e apoio ao longo de minha vida.

Aos professores Luís Volnei Sudati Sagrilo e Edison Castro Prates de Lima, pela orientação, interesse e conhecimentos transmitidos e pela amizade durante a elaboração da dissertação sem os quais não teria sido possível acabar com sucesso esta dissertação.

A meu amigo Juan Manuel Fratti pelo convite a realizar o mestrado e pela ajuda brindada nos primeiros meses para conseguir me adaptar aos novos costumes do Brasil.

Aos meus companheiros e amigos do Laboratório de Análise e Confiabilidade de Estruturas Offshore (LACEO), especialmente a Thiago Lacerda pela grande amizade e conhecimentos proporcionados para a realização desta dissertação, e a Felipe Bazán pela ajuda e amizade nestes últimos meses.

Aos meus amigos Nelson Andrés Ortiz e Wallace Siqueira pela grande amizade, pela compreensão e pela ajuda nos momentos mais difíceis ao longo destes dois anos. Por essas saídas na praia que tão bem fazem para descansar a mente e fortalecer o espírito.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP) que, através de seu Programa de Recursos Humanos (PRH02), forneceu suporte financeiro durante dois anos para a realização deste trabalho.

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

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FADIGA DE RISERS SOB AÇÃO DE CARREGAMENTOS COM ESPECTROS BI-MODAIS

Pablo César Lazzaroni Garat

Abril/2010

Orientadores: Luís Volnei Sudati Sagrilo
Edison Castro Prates de Lima

Programa Engenharia Civil

O principal objetivo desta dissertação é realizar uma investigação dos resultados obtidos na análise de fadiga de *risers* de aço em catenária (*SCRs*), considerando os movimentos induzidos por vórtices (*VIM*) através de uma expressão simplificada fornecida pela norma DnV-RP-F204. A norma permite o cálculo do dano à fadiga de séries temporais de tensões com espectros bi-modais, separando os danos para as faixas de alta e baixa freqüências. No caso específico da análise de *SCRs* sujeitos ao *VIM*, os efeitos das diferentes correntes e ondas podem ser calculados separadamente e, posteriormente, combinados. Esta análise será realizada para 2 *SCRs* conectados a uma plataforma do tipo monocoluna ancorada em lâmina d'água de 1700 metros. Para efeito de comparação, o dano à fadiga em cada *riser* foi também calculado através do método tradicional, utilizando todas as combinações de correntes e ondas existentes. Dar-se-á ênfase nas seções críticas dos *risers*, a fim de obter uma análise detalhada das regiões de maior interesse para o cálculo da vida útil da estrutura projetada.

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

METHODOLOGY FOR RISER FATIGUE ANALYSIS UNDER BIMODAL SPECTRUM LOADINGS

Pablo César Lazzaroni Garat

April/2010

Advisors: Luís Volnei Sudati Sagrilo
Edison Castro Prates de Lima

Department: Civil Engineering

The main objective of this dissertation is to investigate the results obtained in the fatigue analysis of steel catenary risers (SCRs), considering vortex induced motion (VIM) by means of a simplified expression given by DNV-RP-F204. The norm allows calculating the fatigue damage of tensions time series with bi-modal spectra, separating the damage for high and low frequency ranges. In the specific case of the analysis of SCRs subjected to VIM, the effects of different currents and waves can be calculated separately and then combined. This analysis will be performed for 2 SCRs connected to a monocolumn platform anchored in a water depth of 1700 meters. For comparison, the fatigue damage in each riser was also calculated by the traditional method, employing all combinations of currents and waves. Emphasis will be given to critical sections of the risers in order to obtain a detailed analysis of the regions of greatest interest to calculate the lifetime of the structure designed.

Sumário

1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO 1

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO 3

1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS 7

2 FADIGA 8

2.1 CURVA S-N 9

2.2 REGRA DE MINER 11

3 MOVIMENTOS DE ESTRUTURAS FLUTUANTES 13

3.1 MOVIMENTOS INDUZIDOS POR VÓRTICES 14

3.1.1 Características Gerais 14

3.1.2 Características da Camada Limite 16

3.1.3 Esteira de Vórtices 18

3.1.4 Forças Hidrodinâmicas 23

3.2 ESTRUTURAS *OFFSHORE* SUBMETIDAS AOS MOVIMENTOS DO VIM 24

4 CÁLCULO DE FADIGA PARA ESPECTROS BI-MODAIS 35

4.1 METODOLOGIA DA DNV PARA CÁLCULO DE FADIGA CONSIDERANDO ESPECTROS DE TENSÕES BI-MODAIS. 37

5 ESTUDO DE CASOS 45

5.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA FADIGA 45

5.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS 49

5.3 CARACTERÍSTICAS DA MONOCOLUNA E DOS *RISERS* ANALISADOS 49

5.4 CURVA S-N 54

5.5 OFFSETS ESTÁTICOS E MOVIMENTOS INDUZIDOS PELA CORRENTE (VIM). 54

5.6 RESULTADOS 57

5.7 RESULTADOS ADICIONAIS 65

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 68

6.1 CONCLUSÕES 68

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. 70

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

APÊNDICES

Apêndice A: Resultados complementares aos apresentados no Item 5.6. 76

Índice de figuras

Figura 1.1: Camada pré-sal na Bacia de Santos 2
Figura 1.2: Campos de Petróleo no Brasil 3
Figura 1.3: Caracterização de *longo-prazo* das ações ambientais 4
Figura 1.4: Esteira de Vórtices gerada por um obstáculo cilíndrico num fluxo 5
Figura 1.5: Série de tensões bi-modal 5
Figura 1.6: Espectro de tensões bi-modal 6
Figura 2.1: Carregamento de amplitude constante 8
Figura 2.2: Carregamento de amplitude variável 9
Figura 2.3: Modelo de Curvas S-N em água de mar com proteção catódica 10
Figura 3.1: Movimentos no flutuante 13
Figura 3.2: Movimentos do flutuante considerados 14
Figura 3.3: Relação entre o número de Reynolds e o número de Strouhal 15
Figura 3.4: Camada Limite 17
Figura 3.5: Separação da Camada Limite 18
Figura 3.6: Desprendimento de vórtices 19
Figura 3.7: Distancia entre vórtices (esteira de Von Karman) 20
Figura 3.8: Esteira modificada por interferência de Vórtices 20
Figura 3.9: Força de arrasto e Força de sustentação 21
Figura 3.10: Plataforma tipo Monocoluna (TN PETROLEO, 2004) 25
Figura 3.11: Comparação de RAO (*heave*) entre uma Monocoluna e uma Semi-submersivel (TN PETROLEO, 2004) 26
Figura 3.12: *Moonpool* para redução de movimentos (TN PETROLEO, 2004) 27
Figura 3.13: Plataforma Tipo Semi-submersivel 28
Figura 3.14: Direção relativa do fluxo em plataformas Semi Submersíveis 29
Figura 3.15: Diferentes tipos de plataformas Spar 30
Figura 3.16: Esquema de plataforma TLP 31
Figura 3.17: Camadas que conformam um *riser* flexível 32
Figura 3.18: *Riser* rígido 33
Figura 3.19: *Risers* em configuração de catenária livre (SCR) 33
Figura 4.1: Série de tensões com espectro bi-modal 36

Figura 4.2: Separação do ciclo de tensões de bi-modal em baixa freqüência e freqüência das ondas 37
Figura 4.3: Variação de Tensões 39
Figura 4.4: Curva S-N 43
Figura 5.1: Número de análises dinâmicas para cada riser 48
Figura 5.2: Modelo da monocoluna utilizado 50
Figura 5.3: SCRs selecionados para análise à fadiga. Vista superior 52
Figura 5.4: SCRs selecionados para análise à fadiga. Vista lateral 52
Figura 5.5: Detalhe da *Stress Joint* usada na modelagem dos SCRs 53
Figura 5.6: Curva S-N bi-linear utilizada no cálculo do dano à fadiga 54
Figura 5.7: Tipos de Modelos Utilizados 57
Figura 5.8: Pontos da seção transversal dos risers analisados 59
Figura 5.9: Vida Útil e Dano nos diferentes trechos do SCR n° 17 60
Figura 5.10: Vida Útil e Dano nos diferentes trechos do SCR n° 36 61
Figura 5.11: Danos no Topo dos SCRs analisados 61
Figura 5.12: Dano no TDP dos SCRs analisados 62
Figura 5.13: Relação de danos na seção transversal do Topo. SCR n° 17 63
Figura 5.14: Relação de danos na seção transversal do Topo. SCR n° 36 63
Figura 5.15: Relação de danos na seção transversal do TDP. SCR n° 17 64
Figura 5.16: Relação de danos na seção transversal do TDP. SCR n° 36 64
Figura 5.17: Vida Útil do SCR n° 17 na região do TDP. Modelo VIM e Modelo Onda 65
Figura 5.18: Vida Útil do SCR n° 36 na região do TDP. Modelo VIM e Modelo Onda 66
Figura 5.19: Vida Útil do SCR n° 17 na região do Topo. Modelo VIM e Modelo Onda 66
Figura 5.20: Vida Útil do SCR n° 36 na região do Topo. Modelo VIM e Modelo Onda 67

Índice de tabelas

Tabela 2.1: Parâmetros das curvas S-N em água de mar com proteção catódica..... 11
Tabela 3.1: Período Natural de estruturas offshore 22
Tabela 5.1: Freqüência relativa (%) das velocidades superficiais de correntes, por direção 45
Tabela 5.2: Freqüência relativa dos pares Hs e Tz associados..... 46
Tabela 5.3: Propriedades da Plataforma do tipo Monocoluna utilizada..... 50
Tabela 5.4: Propriedades das linhas de ancoragem 50
Tabela 5.5: Características Geométricas das linhas de ancoragem 51
Tabela 5.6: Posição dos SCRs analisados 52
Tabela 5.7: Propriedades dos *Risers* n° 17 e n° 36. Parte 1..... 53
Tabela 5.8: Propriedades dos *Risers* n° 17 e n° 36. Parte 2..... 53
Tabela 5.9: *Offsets* calculados por velocidade e direção de corrente 55
Tabela 5.10: Movimentos de baixa freqüência gerados pela corrente 56

Nomenclatura

a	-	Parâmetro de curvas S-N
AIE	-	Agencia Internacional de Energia
Ac	-	Aceleração do Fluido
Axc	-	Aceleração do corpo na direção do fluxo
Ac	-	Aceleração do Fluido
API	-	American Petroleum Institute
AWS	-	American Welding Society
CD	-	Coeficiente de Arrasto
CL	-	Coeficiente de Sustentação
CDT	-	Coeficiente de Arrasto Transversal
D	-	Dano à Fadiga
Dh	-	Diâmetro Hidrodinâmico
DNV	-	Det Norske Veritas
fn	-	Freqüência Natural
Fr	-	Número de Froude
g	-	Aceleração da gravidade
HF	-	Alta Freqüência (High Frequency)
LF	-	Baixa Freqüência (Low Frequency
m	-	Parâmetro de curvas S-N
N	-	Número de Ciclos
Re	-	Número de Reynolds
RP	-	Recomended Practice
S	-	Amplitude de Tensões
SCR	-	System Catenary Riser
St	-	Número de Strouhal
TLP	-	Tension Leg Platform
Tn	-	Período Natural
Vc	-	Velocidade Reduzida
Vxc	-	Velocidade de Corrente
Vyc	-	Velocidade do corpo na direção transversal ao fluxo
VIM	-	Movimentos Induzidos por Vórtices (Vortex Induced Motion)
VIV	-	Vibrações Induzidas por Vórtices (Vortex Induced Vibrations)
Vr	-	Velocidade Reduzida
ϕ	-	Ângulo de Fase
ν	-	Freqüência de Cruzamento Zero

1 Introdução e motivação

A tendência de aumento do consumo de petróleo no mundo está fazendo com que os países aumentem os seus investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias e procedimentos, tanto na exploração como na produção deste recurso.

A Agencia Internacional de Energia (AIE) prevê um aumento anual de 1,5% no consumo de energia mundial entre 2007 e 2030, totalizando um aumento total de 40% no período. Os principais motores de tal crescimento na demanda, segundo a AIE, seriam os países da Ásia (incluindo a China e a Índia), seguidos pelos países do Oriente Médio.

Apesar do petróleo ser um recurso não renovável, ainda está longe de ser substituído por algum outro tipo de energia limpa e renovável, sendo o volume de produção do petróleo muito maior que o conjunto dos outros tipos de energia.

O Brasil, atualmente, encontra-se entre os principais produtores de petróleo a nível mundial, tendo aumentado significativamente sua produção ao longo dos últimos anos, esperando-se um acréscimo anual de 2.9% entre 2009 e 2030. Com as novas descobertas de reservas na camada Pré-Sal (ver Figura 1.2), o país passará a ocupar o sexto lugar como produtor mundial de petróleo em 2030, atrás apenas de Arábia Saudita, Rússia, Iraque, Irã e Canadá.

A camada Pré-Sal é uma faixa que se estende ao longo de 800 quilômetros entre os estados do Espírito Santo e Santa Catarina, abaixo do leito do mar, englobando três bacias sedimentares (Espírito Santo, Campos e Santos). Diversos campos e poços de petróleo já foram descobertos no pré-sal, sendo o principal o campo de Tupi. O petróleo encontrado nesta área encontra-se em profundidades que superam os sete mil metros (ver Figura 1.1) abaixo de uma extensa camada de sal que conserva a qualidade do petróleo.

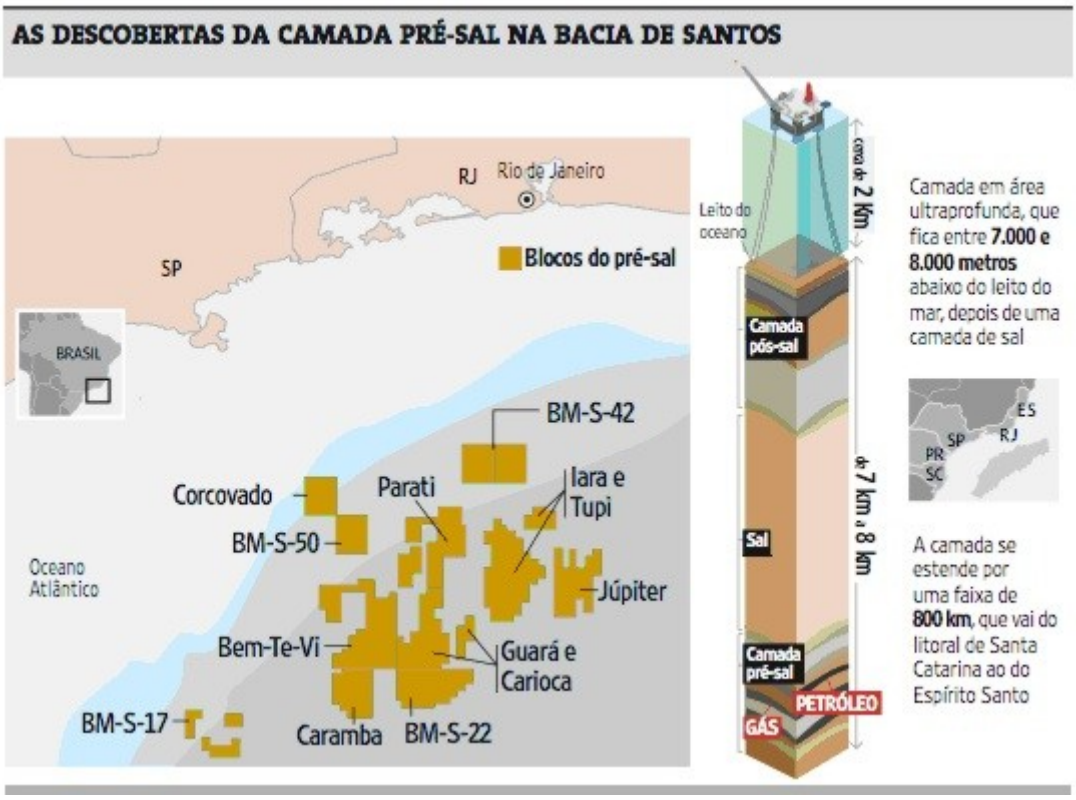

Figura 1.1: Camada pré-sal na Bacia de Santos

Em 2008, o Brasil manteve-se como o 15º maior produtor mundial de petróleo (incluindo óleo cru, condensado e LGN). A maior parte da produção nacional de petróleo (exclusive LGN) foi extraída de campos marítimos, responsáveis por 90% do total produzido. O Estado do Rio de Janeiro respondeu por 91,7% da produção marítima e por 82,5% da produção total nacional. Em 2008, este Estado apresentou crescimento de 5,1% na sua produção de petróleo em relação ao ano anterior. No período 1999-2008, o crescimento médio anual da produção de petróleo do Rio de Janeiro foi de 6,6% (ANP, 2009).

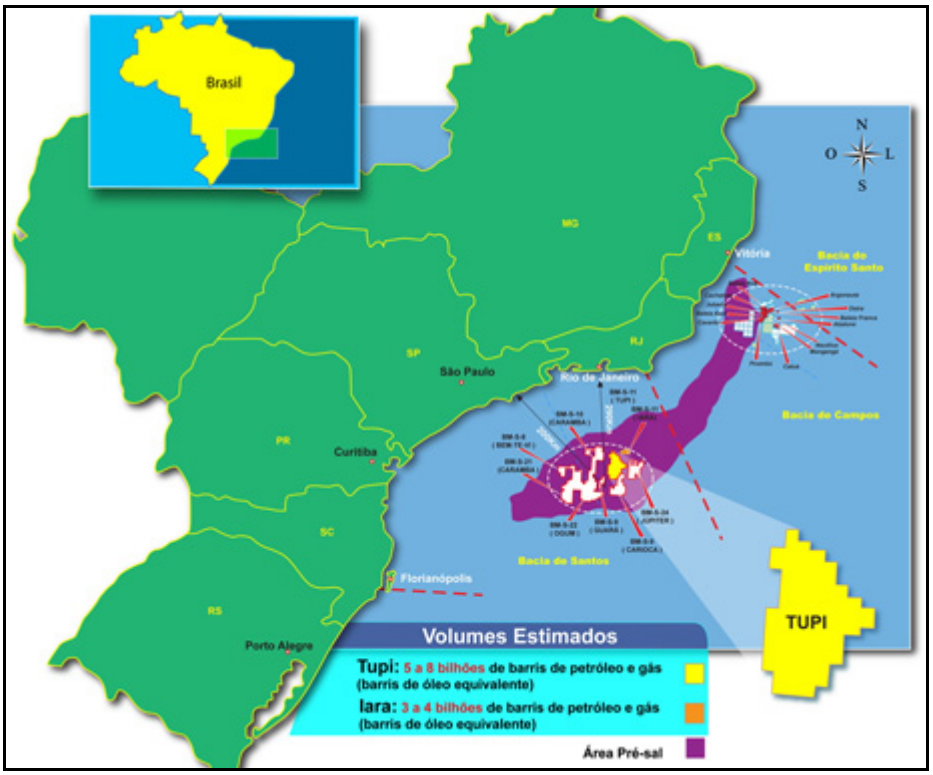

Figura 1.2: Campos de Petróleo no Brasil

O incremento na exploração e produção de petróleo é naturalmente acompanhado de novas tecnologias, processos e formas de análises para superar os desafios que representam profundidades consideradas anteriormente inacessíveis.

Na indústria *offshore*, a exploração e a produção do recurso em grandes profundidades representam um desafio para os engenheiros que, na busca por diferentes soluções econômicas e tecnicamente viáveis, acabaram desenvolvendo estruturas cada vez mais complacentes. Tais estruturas experimentam movimentos diferentes dos que apresentavam os modelos anteriores das plataformas e devem ser analisadas levando em consideração todas as solicitações ambientais relevantes. Assim, o contínuo estudo destas novas tecnologias levou à descoberta de novos efeitos que atuam nestas estruturas flutuantes, resultando em novos métodos de análise das mesmas.

1.1 Objetivos do trabalho

Na análise de fadiga de um *riser* de aço (SCR – *Steel Catenary Riser*) conectado a uma estrutura flutuante, devem ser considerados todos os carregamentos (estáticos e

dinâmicos) originados pelas ações ambientais que atuam sobre a mesma. Essas forças são oriundas dos movimentos do flutuante devido a ondas, corrente e vento e da própria ação destas ações diretamente sobre o *riser*.

Os parâmetros ambientais de onda, vento e corrente são medidos em determinados intervalos de tempo em que possam ser considerados como aproximadamente estacionários do ponto de vista estatístico. Geralmente, na prática, esse intervalo de tempo é de três horas (3-h) e denomina-se de período de curto prazo. A observação dos parâmetros ambientais de curto-prazo ao longo do tempo é conhecida como caracterização de *longo-prazo* das ações ambientais (ver Figura 1.3).

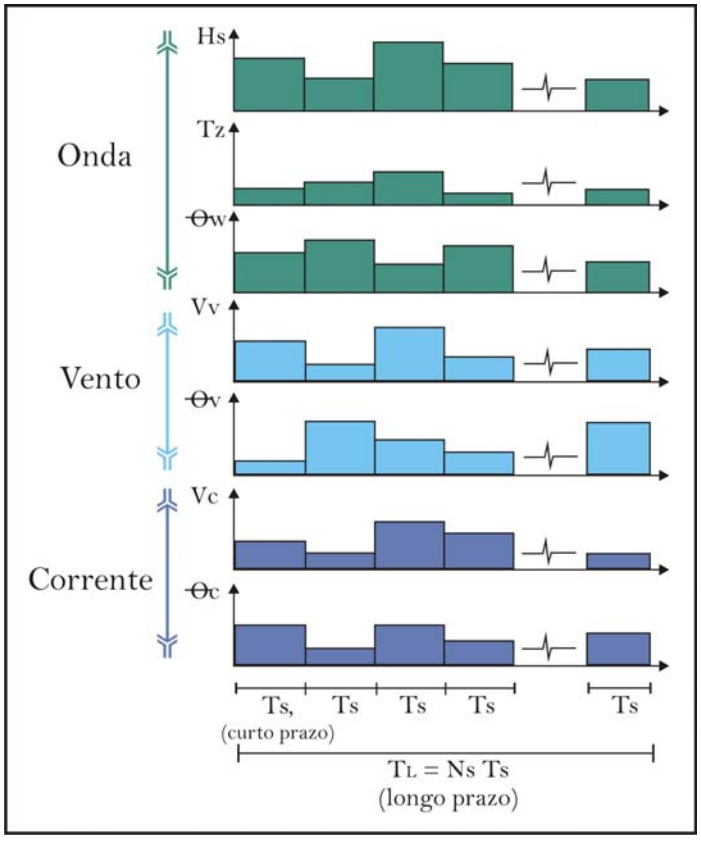

Figura 1.3: Caracterização de *longo-prazo* das ações ambientais

Embora no curto prazo a corrente superficial e seu perfil ao longo da profundidade sejam considerados constantes, ela pode gerar movimentos ou vibrações no corpo flutuante e nos *risers* conectados a este, devido ao desprendimento de vórtices (ver Figura 1.4). Estes efeitos são chamados, respectivamente, de "*Vortex Induced Motion*" (VIM) e "*Vortex Induced Vibrations*" (VIV).

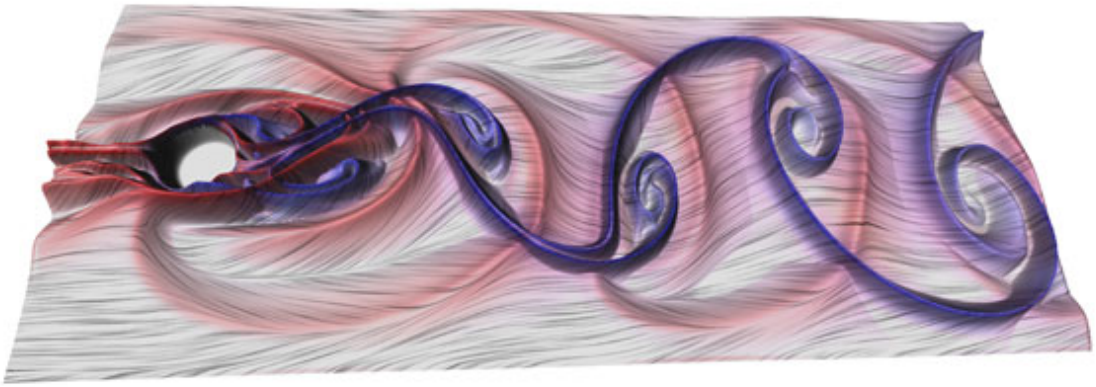

Figura 1.4: Esteira de Vórtices gerada por um obstáculo cilíndrico num fluxo

O movimento devido ao desprendimento de vórtices no flutuante (VIM) possui uma freqüência de vibração que pode coincidir com as freqüências correspondentes aos períodos naturais dos movimentos translacionais do flutuante na direção horizontal. Como estes períodos naturais são relativamente altos, os movimentos devido ao VIM são de baixa freqüência, induzindo, portanto, tensões variáveis de baixa freqüência no *riser*.

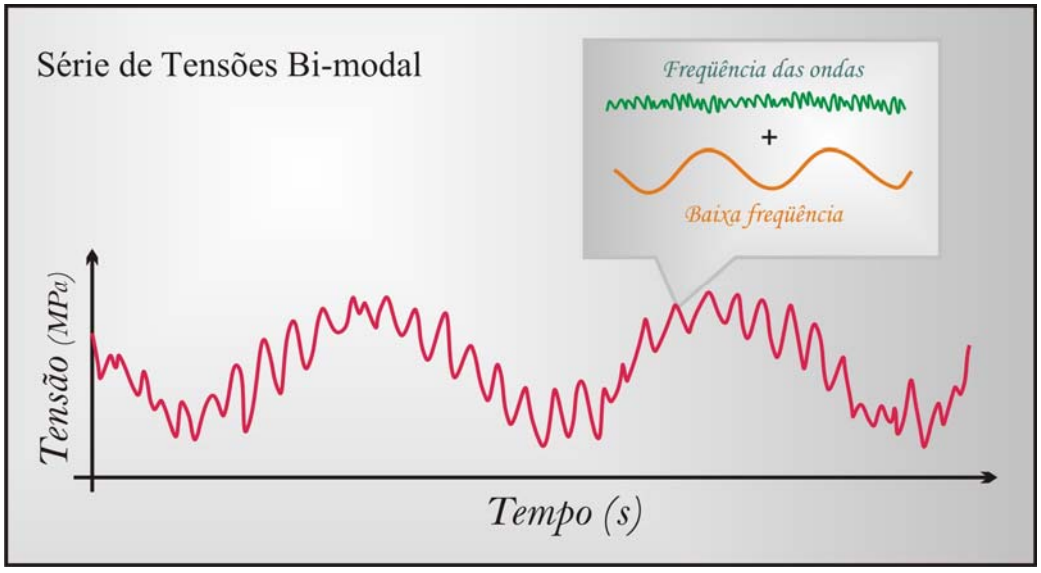

Figura 1.5: Série de tensões bi-modal

Além disso, um riser também é excitado por movimentos do flutuante que apresentam um conteúdo de freqüências na faixa do espectro das ondas. Desta forma, um *riser* conectado a uma estrutura flutuante submetida a movimentos devido ao VIM

apresenta séries temporais de tensões com no mínimo duas faixas distintas de freqüências (ver Figura 1.5), evidenciando um espectro de tensões com comportamento bi-modal, como pode ser observado na Figura 1.6.

Este espectro apresenta parte do seu conteúdo de energia numa faixa na freqüência das ondas, devido aos movimentos gerados pelas ondas, e um pico de energia na faixa de baixa freqüência originado pelos movimentos do flutuante causados pelo desprendimento de vórtices devido à ação da corrente sobre o mesmo (VIM).

Figura 1.6: Espectro de tensões bi-modal

Uma vez obtidas as séries temporais de tensões com as características apresentadas na Figura 1.5, a contagem dos ciclos de tensões para análise de fadiga de um SCR pode ser feita com o método Rainflow (OLAGNON *et. al*., 2008). Este método identifica todos os ciclos existentes na série temporal de tensões e serve como base para o posterior cálculo da fadiga através da regra de Miner, descrita no item 2.2. Observa-se porém que, considerando as diversas combinações de direções de onda e corrente assim como suas intensidades, seriam necessárias inúmeras análises dinâmicas no domínio do tempo para efetuar a análise completa de fadiga.

No caso de espectros bi-modais, a norma DNV-RP-F204 (2005) apresenta uma metodologia de combinação de danos que permite o cálculo de fadiga para séries de tensões bi-modais através da separação do espectro em duas faixas distintas: uma de baixa e outra de alta freqüência. No caso específico da análise de *SCRs* sujeitos ao VIM, podem-se calcular separadamente os efeitos da corrente e das ondas e depois combiná-los usando tal expressão. Isto é feito assumindo-se que a série final de tensões no *riser* pode ser obtida pela superposição da resposta devido à corrente com a resposta devido à onda. Observa-se, entretanto, que esta superposição dos efeitos de baixa freqüência

(VIM) e freqüência das ondas é uma aproximação, devido ao comportamento não linear do *riser* (SAGRILO *et. al*., 2009).

Desta forma, o principal objetivo desta dissertação é avaliar a utilização de uma metodologia de combinação de danos proposta pela DNV-RP-F204, para o cálculo do dano à fadiga de SCRs considerando o efeito de movimentos induzidos por vórtices (VIM) e movimentos de primeira ordem do flutuante devido às ondas.

1.2 Descrição dos capítulos

Esta dissertação encontra-se dividida na forma descrita a seguir.

O Capítulo 2 descreve sucintamente a teoria básica do cálculo à fadiga, apresenta as curvas S-N e faz referência particularmente ao cálculo à fadiga através da Regra de Miner.

No Capítulo 3, os diferentes tipos de movimentos experimentados por uma plataforma flutuante são mencionados. São explicados em detalhe o movimento induzido por vórtices, as causas da geração do fenômeno e as implicações no calculo à fadiga. Também é feita referência às principais estruturas submetidas a este tipo de movimento.

No Capítulo 4, apresenta-se a metodologia da norma DNV-RP-F204 (2005), que será avaliada nesta dissertação, e explica-se o cálculo à fadiga para espectros de tensões bi-modais.

No Capítulo 5, são detalhados os diversos exemplos analisados. Descrevem-se as características geométricas e físicas da plataforma, linhas de ancoragem e *risers* utilizados no modelo numérico. Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos, incluindo algumas observações.

No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões obtidas ao longo deste trabalho e propõem-se algumas idéias para trabalhos futuros relacionados com esta dissertação.

2 Fadiga

O fenômeno de fadiga é bastante estudado devido ao mesmo ser o responsável por um grande número de falhas em estruturas (principalmente metálicas) submetidas a esforços dinâmicos. A característica principal deste fenômeno é a ruptura das peças ou partes que conformam a estrutura, sob carregamentos cíclicos cujos valores máximos são inferiores aos máximos carregamentos admissíveis para os quais foram projetadas. Em estruturas *offshore*, mais especificamente em estruturas flutuantes, os carregamentos típicos são originados pela corrente, onda e, em menor escala, pelo vento.

O processo experimentado por qualquer material que falha por fadiga, pode ser separado em duas fases: a primeira, caracterizada pela formação e crescimento microscópico da trinca e, a segunda, caracterizada pela propagação e ruptura do material.

Como o carregamento de fadiga consiste na aplicação e remoção da carga ou alternância de carga ao longo do tempo, podemos classificá-lo em:

Baixo Ciclo: ruptura com menos de 10^4 ou 10^3 ciclos;
Alto Ciclo: ruptura com mais de 10^4 ciclos, podendo chegar, em alguns casos, à ordem de 10^6 a 10^9 ciclos.

Os carregamentos podem ser de amplitude constante (ver Figura 2.1) ou variável (ver Figura 2.2). O carregamento de amplitude variável normalmente não apresenta uma lei definida de variação das tensões ao longo do tempo.

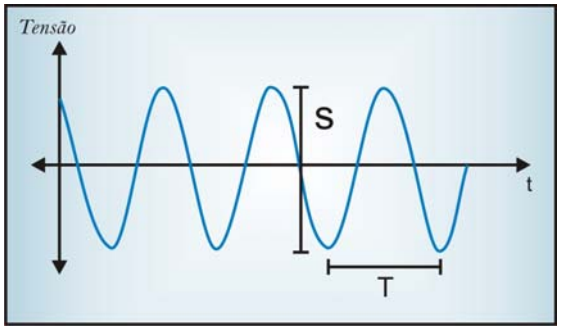

Figura 2.1: Carregamento de amplitude constante

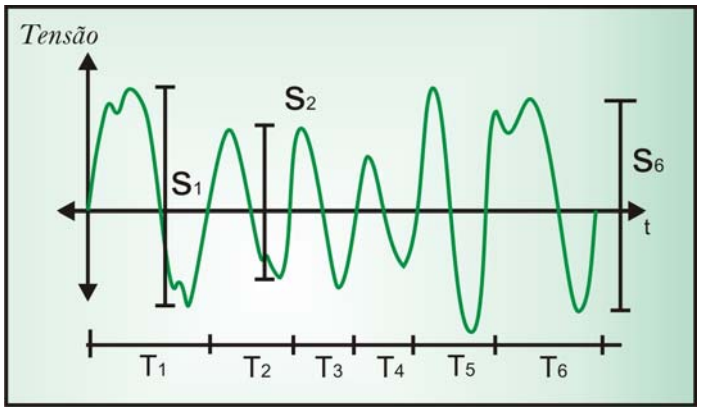

Figura 2.2: Carregamento de amplitude variável

2.1 Curva S-N

Para levar à ruptura um material sob um carregamento variável de tensão, é preciso um determinado número de ciclos. Este número de ciclos pode ser relacionado à variação de tensão através de curvas empíricas, denominadas Curvas S-N. Estas curvas são resultado de provas de laboratório realizadas em vários corpos de prova sob diversas amplitudes de tensão até apresentar alguma trinca significativa na ruptura devida à fadiga. Desta forma, com ajuda destas curvas, é possível estimar a vida a fadiga de um material em qualquer faixa de tensão.

A equação da curva S-N pode ser apresentada na seguinte forma:

$$N = \frac{a}{(S)^m} \tag{2.1}$$

ou alternativamente:

$$LogN = \log(\bar{a}) - m\log(S) \tag{2.2}$$

onde:

S = variação (range) de tensão na estrutura;

N = número de ciclos de variação de tensões S para ocorrer falha por fadiga;

a, m = constantes do material e das condições do ensaio (obtidos experimentalmente)

Para material base, as curvas S-N são construídas para tensões nominais; portanto, devem considerar-se fatores de correção quando existirem tensões residuais, térmicas ou algum fator que provoque concentração de tensões. Porém existem casos. i.e., juntas soldadas que têm curvas S-N especificas que implicitamente já consideram alguns desses fatores.

Além disso, as curvas S-N são apresentadas para geometrias ou conexões estruturais padronizadas e podem ser classificadas em função da geometria, da direção das tensões e do método de fabricação. A escolha da curva a ser utilizada para casos complexos deve ser feita com base na experiência, normas específicas ou com assessoramento de um especialista. Na Figura 2.3, são apresentadas diferentes curvas utilizadas para estruturas marítimas. Os parâmetros destas curvas são mostrados na Tabela 2.1 (DNV-RP-C203, 2008).

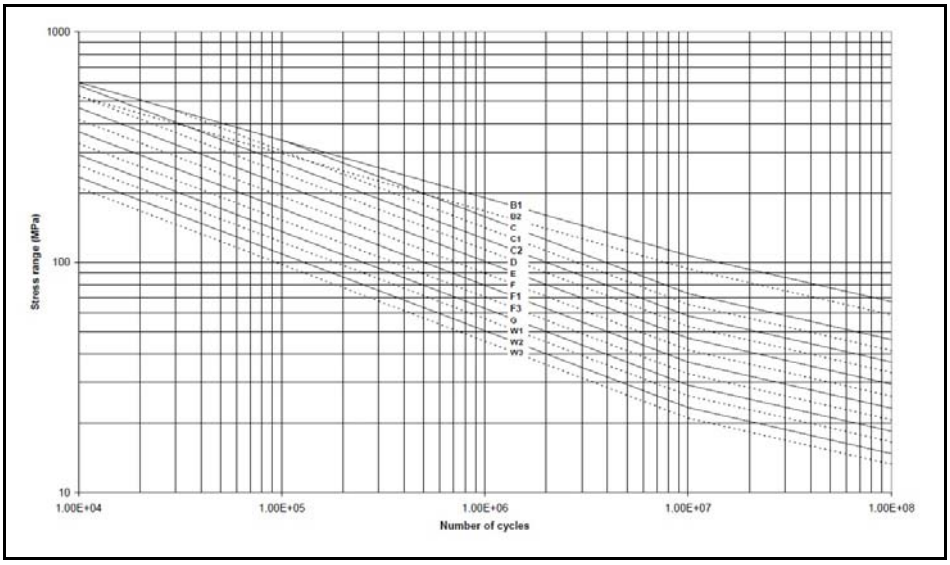

Figura 2.3: Modelo de Curvas S-N em água de mar com proteção catódica

Existem diversas normas dedicadas ao cálculo de fadiga em estruturas *offshore*, que sintetizam o resultado de estudos realizados ao longo de vários anos. Diversos métodos de cálculo, considerações e curvas encontram-se nas normas DNV (norueguesa), API e AWS (americanas), entre outras. Isto se deve ao fato de que o problema da fadiga, em particular em juntas tubulares soldadas, tornou-se muito relevante, e a escassez de resultados referentes ao comportamento de fadiga de juntas tubulares circulares de grandes dimensões, motivou o lançamento de programas de

ensaio e investigação, visando à obtenção de resultados que pudessem ser utilizados pelos projetistas destas estruturas.

Tabela 2.1: Parâmetros das curvas S-N em água de mar com proteção catódica

Curva S-N	$N < 10^6$ ciclos		$N > 10^6$ ciclos	Limite a Fadiga em 10^7 ciclos	Expoente k	concentração de tensões no detalhe S-N
	m_1	log a_1	log a_2 $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0.00	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0.00	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	11.764	15.606	52.63	0.25 for SCF < 10 0.30 for SCF > 10	1.00

2.2 Regra de Miner

A regra de Miner está baseada numa lei de danos acumulados e é empregada para calcular o dano total de um elemento submetido a condições de carregamento de amplitudes variáveis. Por esta lei, cada ciclo de variação de tensões causa um determinado "dano" à fadiga. Esse dano é definido por:

$$D = \frac{1}{N} \tag{2.3}$$

onde N é o número de ciclos para a ruptura por fadiga para a variação de tensões S considerada. Para determinar o valor de N, utilizam-se as curvas S-N mencionadas no item 2.1.

A regra de *Miner* estabelece que os danos são acumulados de modo linear; portanto, o dano correspondente a cada um dos ciclos aos quais está submetida a estrutura é somado conforme a seguinte equação:

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = D_T \tag{2.4}$$

onde:

k = número de diferentes ciclos de tensão em uma seqüência específica de crregamento;

i = i-ésimo nível de tensão S_i naquela seqüência de carregamento;

n_i = número de ciclos de carregamento a um nível de variação de tensão S_i;

N_i = vida de fadiga a um nível de variação de tensão S_i (número total de ciclos de carregamento a um nível de tensão S_i que a estrutura resiste calculado pela curva S-N).

Pela regra de Miner admite-se que a falha por fadiga ocorre quando o dano acumulado alcança a unidade, i.e., $D_T = 1$

3 Movimentos de Estruturas Flutuantes

Plataformas de petróleo flutuantes no mar, ancoradas por diferentes tipos de amarras ao leito marinho, estão sujeitas aos mais variados movimentos resultantes das ações ambientais atuando nas mesmas ao longo de suas vidas úteis. Entender as respostas que estas estruturas apresentam sob condições climáticas da região em que se encontram é importante para o correto tratamento e a consideração de carregamentos relevantes assim como a desconsideração de aspectos irrelevantes (DNV-RP-C205, 2005).

Existem diferentes escalas de movimentos de resposta das estruturas flutuantes complacentes, que podem ser classificados em três grupos:

- Movimentos na freqüência das ondas (*WF: Wave Frequency*)
- Movimentos de alta freqüência (*HF: High Frequency*)
- Movimentos de baixa freqüência (*LF: Low Frequency*)

A onda pode gerar na estrutura flutuante ancorada, movimentos na própria freqüência das suas elevações e, por efeitos de segunda ordem, movimentos em freqüências maiores e menores a essa freqüência própria das ondas (ver Figura 3.1). As ondas do mar podem ser representadas por ondas regulares ou ondas irregulares, em função do tipo de análise que se deseja realizar (determinística ou aleatória).

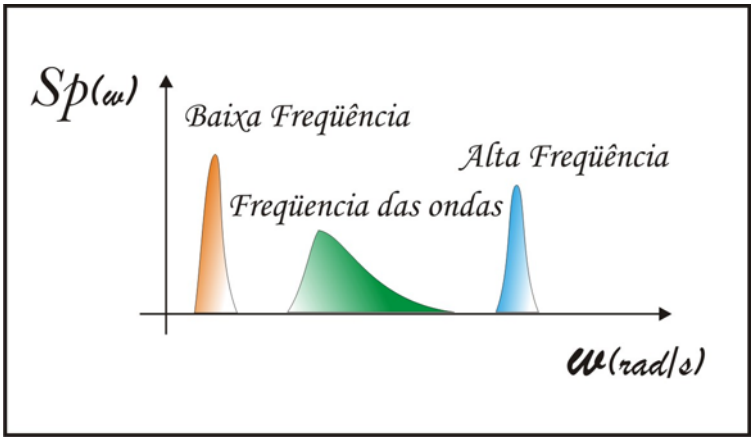

Figura 3.1: Movimentos no flutuante

Os movimentos de baixa freqüência também podem ser originados pela corrente através de forças geradas pelo desprendimento de vórtices no casco. Esses movimentos são comentados em mais detalhes no item 3.1 deste trabalho.

Embora o flutuante possa sofrer as três clases de movimentos mencionadas anteriormente, neste trabalho não serão considerados os efeitos da onda de segunda ordem (movimentos de alta e baixa freqüência), sendo considerados somente os efeitos dos movimentos na faixa da freqüência das ondas (*wave frequency*) e os movimentos de baixa freqüência devidos ao VIM (ver Figura 3.2).

Figura 3.2: Movimentos do flutuante considerados

No item seguinte, serão abordados os movimentos de baixa freqüência induzidos pela corrente.

3.1 Movimentos Induzidos por Vórtices

Dentre os movimentos de baixa freqüência sofridos pelas estruturas flutuantes, destaca-se o movimento induzido por vórtices VIM (*Vortex Induced Motion*). Esse movimento é o resultado da interação entre o corpo flutuante e a corrente marítima como será descrito a seguir.

3.1.1 Características Gerais

As características do escoamento de um fluido em torno de um corpo dependem fortemente de vários parâmetros, tais como, forma e tamanho do corpo, velocidade, orientação e propriedades do fluido que escoa sobre o corpo. É possível descrever as

características do escoamento com alguns parâmetros adimensionais. Os parâmetros mais importantes são:

- Número de Reynolds:

O número de Reynolds representa a razão entre os efeitos de inércia e os viscosos. Ele é usado para o cálculo do regime de escoamento de um fluido e é dado por:

$$\mathrm{Re} = \frac{Vc \cdot D_h}{\nu} \tag{3.1}$$

onde:

Vc = velocidade do fluido

D_h = diâmetro hidrodinâmico do corpo

ν = viscosidade cinemática do fluido (para a água do mar, $9{,}24\times10^{-7}$ m^2 / s)

Geralmente, na natureza encontramos escoamentos com $10 < Re < 10^9$.

- Número de Strouhal:

O número de Strouhal é um parâmetro adimensional que está ligado à geometria do obstáculo e ao número de Reynolds. Para cilindros de paredes lisas, o número de Strouhal relaciona-se com o número de Reynolds através da curva experimental apresentada na Figura 3.3.

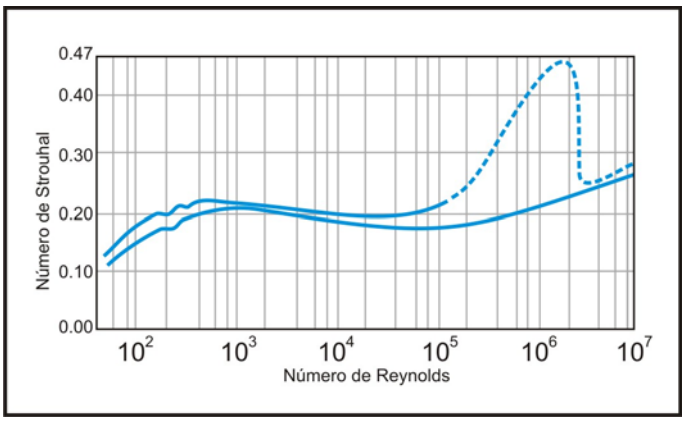

Figura 3.3: Relação entre o número de Reynolds e o número de Strouhal

O número de Strouhal é usado para calcular a freqüência de desprendimentos de vórtices gerados pelo fluxo de um fluido através de um obstáculo.

- Número de Froude:

O número de Froude é um número adimensional que relaciona o efeito das forças de inércia e a força de gravidade que atua sobre um fluido.

$$Fr = \frac{Vc}{\sqrt{g \cdot D_h}} \tag{3.2}$$

onde:

Vc = velocidade do fluido;

D_h = diâmetro hidrodinâmico do corpo;

g = aceleração da gravidade (9.81 m/s^2);

O número de Froude serve para caracterizar o regime do fluxo, onde podem ocorrer os três casos seguintes:

$Fr > 1$, o regime do fluxo será supercrítico;

$Fr = 1$, o regime do fluxo será crítico;

$Fr < 1$, o regime do fluxo será subcrítico.

3.1.2 Características da Camada Limite

Como a viscosidade do fluido não é nula, o fluido precisa aderir à superfície sólida; assim, a velocidade do escoamento varia na região adjacente ao obstáculo (o corpo) imerso no fluido. Esta região é conhecida como camada limite.

Deste modo, é possível tratar o escoamento sobre um corpo como a combinação de um escoamento viscoso (na camada limite) e de um invíscido (fora da camada limite). Fora da camada limite, os gradientes de velocidade normais ao escoamento são relativamente pequenos e o fluido se comporta como se fosse invíscido.

O tamanho da camada limite e da estrutura do escoamento nela confinado variam muito. Parte desta variação é provocada pelo formato do objeto onde se desenvolve a camada limite.

Normalmente, quando o fluido escoa sobre um objeto diferente de uma placa plana, o campo de pressão não é uniforme. Quando o número de Reynolds é alto, o componente do gradiente de pressão na direção do escoamento (i.e. ao longo da superfície do corpo) não é nulo, ainda que o gradiente de pressão na direção normal à superfície seja muito pequeno. Note-se que a pressão varia ao longo da superfície do corpo se este for curvo. O gradiente de pressão na camada limite é provocado pela variação da velocidade da corrente livre (velocidade na borda da camada limite).

Quando o corpo apresenta uma espessura considerável, as velocidades do fluido variam ao longo do obstáculo, como mostra a Figura 3.4. Isto ocorre, por exemplo, quando o obstáculo é um cilindro. A velocidade do fluido varia de zero na borda do cilindro ate o máximo no final desta camada limite.

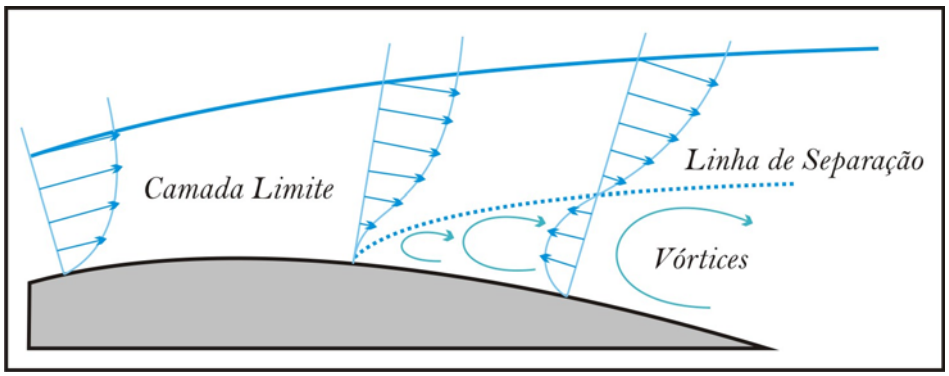

Figura 3.4: Camada Limite

Se consideramos uma partícula fluida que escoa dentro da camada limite mostrada na Figura 3.5, durante o movimento de A para F, a partícula está submetida a mesma distribuição de pressão das partículas do escoamento ao longe. Entretanto devido aos efeitos viscosos, a partícula localizada dentro da camada limite sofre perdas de energia enquanto escoa. Esta perda faz com a partícula não tenha energia suficiente para vencer o gradiente de pressão adverso (movimento de C para F) e atingir o ponto de estagnação localizado na traseira do cilindro.

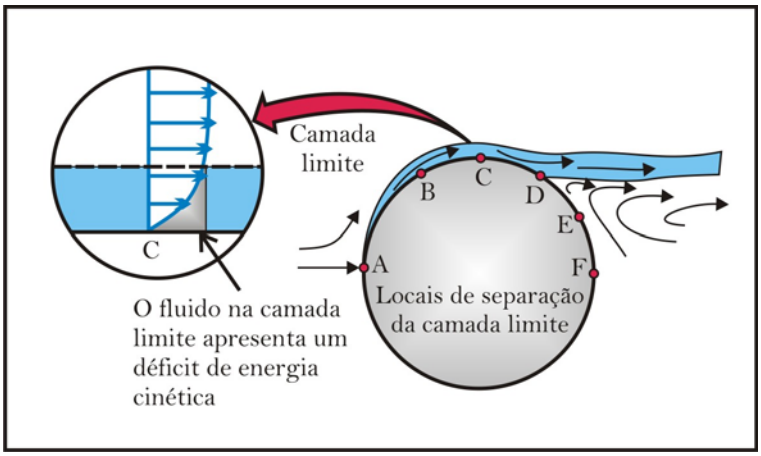

Figura 3.5: Separação da Camada Limite

Devido ao atrito, o fluido da camada limite não pode se movimentar livremente da porção frontal para a região traseira do cilindro. Esta conclusão também pode ser obtida analisando que a partícula C não tem quantidade de movimento suficiente para vencer o gradiente adverso de pressão.

Assim, o fluido escoa contra uma pressão crescente e, num certo ponto, a camada limite se separa da superfície. No ponto de separação o gradiente de velocidade e a tensão de cisalhamento na parede são nulos e a pressão média na metade traseira do cilindro é consideravelmente menor do que na metade dianteira e isto é devido a separação da camada limite. Assim, pode-se detectar uma força de arrasto de pressão no cilindro, ainda que devido a pequena viscosidade do fluido o arrasto da tensão de cisalhamento seja muito pequeno.

Não importa quão pequena seja a viscosidade, sempre ocorrerá a separação da camada limite da superfície do corpo (MUNSON *et. al.*, 2004).

3.1.3 Esteira de Vórtices

Para determinadas velocidades do escoamento, a camada limite se desprende do obstáculo formando-se uma esteira de vórtices. A periodicidade da esteira causada devido à passagem de um fluido por um cilindro foi associada com a formação de vórtices por primeira vez por Bernard em 1908 e por Von Karman em 1912.

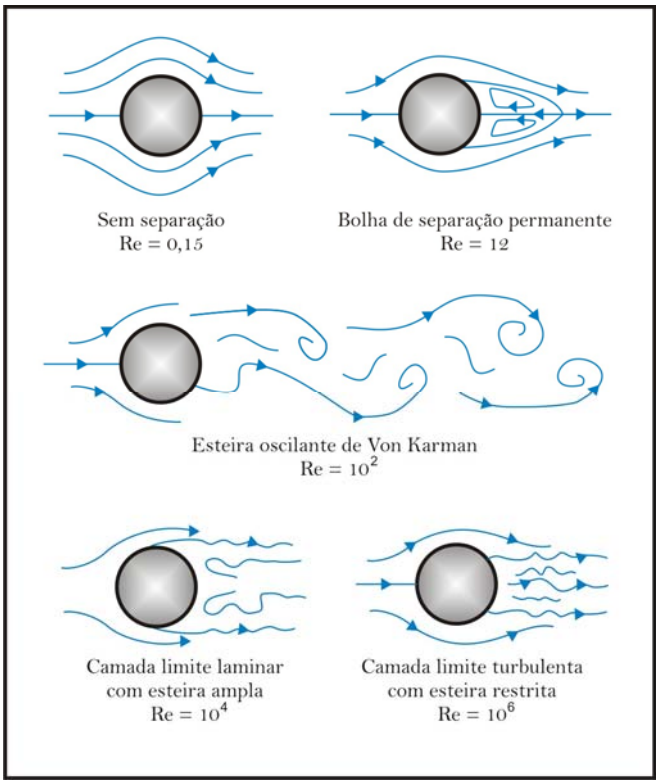

Figura 3.6: Desprendimento de vórtices

Existem dois tipos de esteiras de vórtices características de um cilindro submetido a um escoamento com velocidade constante denominadas laminar e turbulento.

Como se apresenta na Figura 3.6 para um dado corpo existem diversas condições de escoamento e podem ser identificadas pelo valor do número de Reynolds.

Anteriormente, foi enunciado um número denominado número de Strouhal, que precisamente é a freqüência de desprendimento dos vórtices alternados. Essa freqüência também é conhecida como freqüência de *Shedding*.

Nas plataformas offshore, devido ao grande diâmetro da partes submersas da estrutura, os números de *Reynolds* correspondentes ao fenômeno de *VIM* encontram-se a partir de 10^7. Esses valores de Reynolds localizam-se na região de maior turbulência e desprendimentos regulares de vórtices.

Von Karman mostrou que o padrão de vórtices alternados seria estável se a razão entre a distância lateral e a longitudinal entre o centro de um vórtice e outro fosse igual

a 0,286 (ver Figura 3.7) e é por isso que a configuração regular de desprendimentos de vórtices é conhecida como esteira de Von Karman.

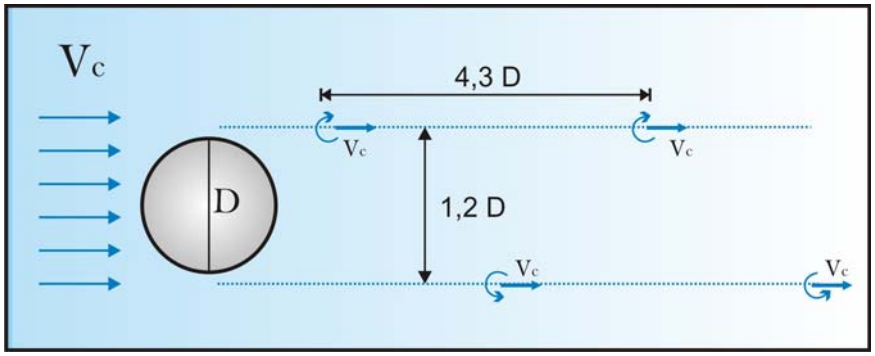

Figura 3.7: Distancia entre vórtices (esteira de Von Karman)

Até o momento só foi considerado um obstáculo submerso no fluido, porém, podem existir mais de um obstáculo. Nesse caso, a esteira modifica-se pelo fato de ocorrer uma interferência entre os vórtices. Na Figura 3.8 pode-se observar a dita interferência.

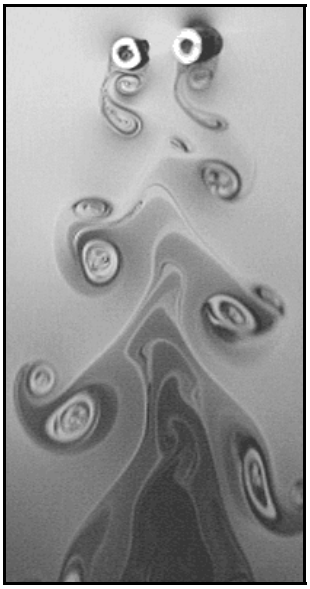

Figura 3.8: Esteira modificada por interferência de Vórtices

Cabe aqui ressaltar que, junto com esse fenômeno de desprendimentos de vórtices gerado pelo fluido em movimento agindo sob a estrutura, é gerada uma série de forças que agem sob o elemento submerso (o obstáculo) as quais são responsáveis dos movimentos evidenciados pelas plataformas.

Podemos dividir essas forças em Longitudinais e Transversais. Estas forças podem ser escritas em função da tensão de cisalhamento na parede do obstáculo provocada pelos efeitos viscosos e da tensão normal que é devida a pressão. Entretanto, na maioria das vezes não é necessário conhecer as distribuições dessas tensões, mas apenas os seus efeitos globais.

A componente da força resultante que atua na direção do escoamento denomina-se força de Arrasto ou *Drag*, e a força que atua na direção normal ao escoamento é denominada Sustentação ou *Lift*. Essas duas forças podem ser obtidas pela integração das tensões de cisalhamento e normais ao corpo considerado. Além da força transversal de *Lift*, existe outra força de natureza hidrodinâmica que constitui a parcela de amortecimento da força transversal (ver Figura 3.9)

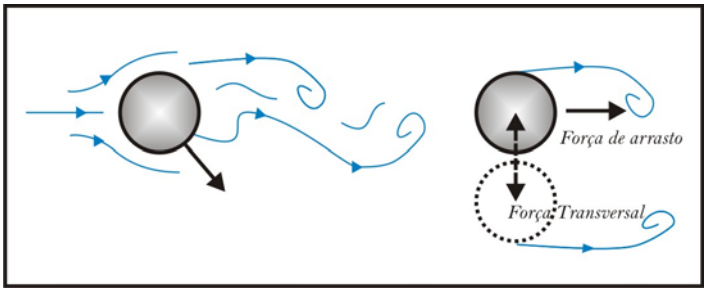

Figura 3.9: Força de arrasto e Força de sustentação

Porém o simples surgimento destas forças agindo na estrutura, por serem de pequena magnitude, não é suficiente para provocar movimentos significativos na mesma. É fundamental que a freqüência dos desprendimentos de vórtices coincida com uma freqüência natural da estrutura. Quando a freqüência de desprendimentos de vórtices fica próxima ou coincide com os valores de freqüências correspondentes aos períodos naturais das unidades flutuantes, aparecem os movimentos transversais à direção do fluxo e movimentos menores na mesma direção do mesmo. Assim, as forças hidrodinâmicas causam um fenômeno denominado ressonância ou *lock-in*. Valores típicos de períodos naturais para alguns sistemas flutuantes ancorados em águas profundas são mostrados na Tabela 3.1. (DNV-RP-F205, 2004)

Tabela 3.1: Período Natural de estruturas offshore

Movimento	FPSO	Spar	TLP	Semi
Surge	> 100	> 100	> 100	> 100
Sway	> 100	> 100	> 100	> 100
Heave	5 - 12	20 - 35	< 5	20 - 50
Roll	5 - 30	50 - 90	< 5	30 - 60
Pitch	50 - 12	50 - 90	< 5	30 - 60
Yaw	> 100	> 100	> 100	> 50 - 60

As oscilações transversais ao fluxo geralmente apresentam maior amplitude e são consideradas como movimentos induzidos por vórtices. Desta forma, é importante a determinação destes movimentos já que influenciam ambos os sistemas de ancoragem e os *risers* ligados à plataforma. A magnitude dos esforços gerados pelos movimentos impostos pode ser significativa na análise de fadiga e para cargas externas.

Os parâmetros importantes na avaliação do *VIM* são: a relação entre a amplitude transversal de oscilação da estrutura e diâmetro da mesma e a velocidade reduzida. O primeiro parâmetro é calculado por:

$$\frac{A}{D_h} \tag{3.3}$$

A é a amplitude transversal de oscilação

D_h é o diâmetro hidrodinâmico

A velocidade reduzida é definida como:

$$Vr = \frac{V_C \cdot T_n}{D_h} \tag{3.4}$$

V_C é a velocidade da corrente;

T_n é o período natural da estrutura, na direção transversal a da corrente;

D_h é o diâmetro hidrodinâmico do corpo

Para Vr < 3 ~ 4, as oscilações devido ao VIM são pequenas e na direção do fluxo. Para Vr > 3 ~ 4, a estrutura começa oscilar transversalmente com amplitude maiores que os às oscilações longitudinais (paralelas ao fluxo) ganhando assim maior importância.

3.1.4 Forças Hidrodinâmicas

As forças geradas pela passagem de fluxo sobre um corpo cilíndrico, como já dito anteriormente, são as forças de lift e a força de arrasto.

A força de *Lift* na direção transversal ao fluxo é definida por (BLEVINS, 2009):

$$F_{Lift}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot (V_C - V_{XC})^2 \cdot C_L \cdot sen(\omega t - \phi) \tag{3.5}$$

onde

ρ_w = massa específica do fluido externo;

D_h = Diâmetro hidrodinâmico;

$(V_C - V_{XC})$ = Velocidade relativa fluido/estrutura na direção da corrente;

C_L = Coeficiente de sustentação (ou lift), função da amplitude e freqüência de vibração;

ω = freqüência de vibração transversal da estrutura quando em lock-in e a freqüência de desprendimento de vórtices quando não está em lock-in, em rad/s;

ϕ = ângulo de fase aleatório quando a estrutura estiver fora da situação de lock-in mas pode também um valor nulo.

Porém, alem da força de lift, existe a força de arrasto na direção do fluxo que é dada por:

$$F_{amort} = \frac{1}{2} \cdot C_{DT} \cdot \rho_w \cdot D \cdot V_C |V_C| \tag{3.6}$$

onde

C_{DT} = Coeficiente de arrasto transversal

V_C = Velocidade da corrente

Na prática o VIM é um fenômeno não-linear difícil de predizer. Por este motivo, diferentes modelos numéricos foram desenvolvidos para o cálculo do movimento gerado pela passagem do fluido por um corpo flutuante. Para esta dissertação, foi utilizado um programa denominado VIME (2008) para estimar os parâmetros do movimento transversal à corrente.

3.2 Estruturas *offshore* submetidas aos movimentos do VIM

Como foi mencionado anteriormente, a busca de petróleo no mar em lâminas d'água cada vez maiores, levou ao desenvolvimento de estruturas cada vez mais complacentes, capazes de interagir dinamicamente com as ondas do mar, o vento e a corrente.

Alguns tipos de plataformas sujeitas aos movimentos induzidos por vórtices são constituídos por elementos estruturais circulares, os quais, conforme explicado no Item 3, sofrem, além dos movimentos gerados pela onda, movimentos causados pelo desprendimento de vórtices (HALKYARD *et. al*., 2005). A seguir, serão descritas as principais características de cada uma delas, destacando a descrição da plataforma do tipo Monocoluna por ser a unidade flutuante utilizada nos exemplos numéricos analisados neste trabalho.

Monocoluna

Trata-se de um conceito inovador que vem sendo estudado em alguns centros de desenvolvimento ao redor do mundo. Este tipo de construção prima pela segurança e flexibilidade, apresentando vantagens competitivas em relação aos conceitos atuais de plataformas sem armazenamento de petróleo. As plataformas do tipo monocoluna têm como característica marcante a utilização de um casco (ver Figura 3.10) com apenas uma coluna, diferentemente das semi-submersíveis. Neste sentido, o conceito

assemelha-se às plataformas do tipo *SPAR*, porém com calado menor (TN PETROLEO, 2004).

Em relação aos conceitos atuais, a plataforma monocoluna apresenta vantagens significativas, entre elas:

- Menores movimentos, possibilitando a utilização de *SCR* (*Steel Catenary Risers*) em catenária livre.
- Maior reserva de estabilidade na condição avariada.
- Flexibilidade operacional.
- Boa relação entre peso de convés e deslocamento.

Além do formato do casco, pode haver dispositivos redutores de movimento, chamados de "saia" e de moonpool, para melhorar ainda mais esta característica. A "saia" é uma estrutura na parte inferior do casco, que produz efeitos semelhantes às bolinas de navios, aumentando a massa adicional e o amortecimento do sistema. Por tratar-se de um sistema estacionário, sua dimensão não fica limitada à resistência ao avanço, mas tem limitações estruturais. O *moonpool* também é utilizado para a passagem de equipamentos. Seu dimensionamento usual é feito de modo que o movimento interno da água seja mínimo.

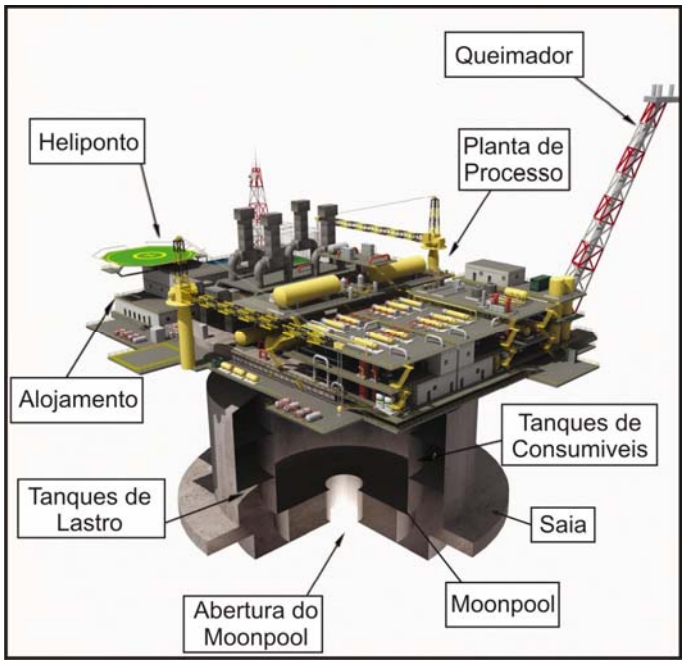

Figura 3.10: Plataforma tipo Monocoluna (TN PETROLEO, 2004)

Este tipo de plataformas pode pesar mais de 120.000 toneladas, podendo ter larguras de 70m no corpo principal e calado de aproximadamente 45m, suficientes para suportar uma planta de processo de mais de 35.000 toneladas (adequada para a produção de mais de 200.000 barris de óleo pesado por dia).

Um dos principais focos no desenvolvimento deste tipo de projetos é a obtenção de um excelente comportamento sob ação das ondas, superior a outras concepções equivalentes. Como resultado, obteve-se, na região de períodos de ondas até 18s, movimentos da ordem de 15% da altura das ondas. Isso significa que, para um mar de altura significativa centenária (8m), a plataforma terá movimento vertical de aproximadamente 1m, característica melhor que de uma semi-submersível (ver Figura 3.11).

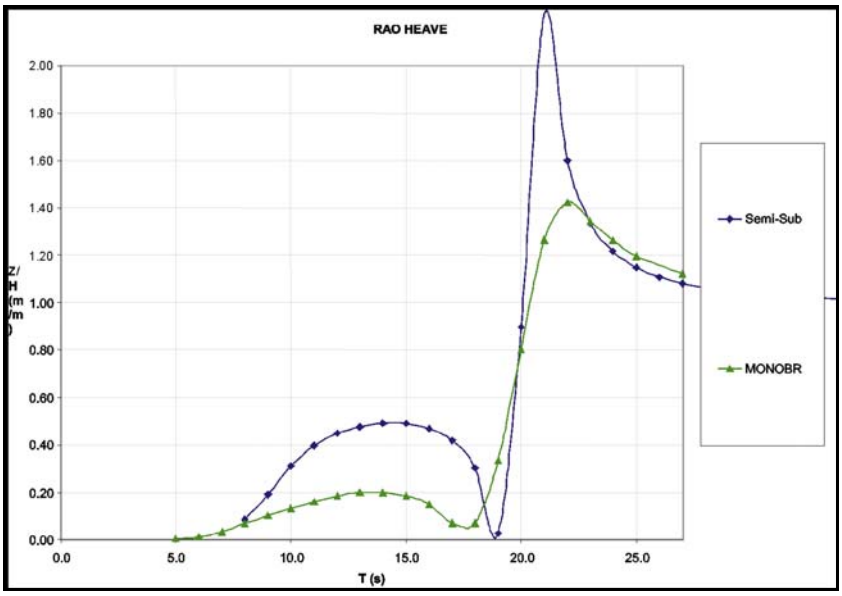

Figura 3.11: Comparação de RAO (*heave*) entre uma Monocoluna e uma Semi-submersivel (TN PETROLEO, 2004)

Para atingir tal característica, o casco foi desenvolvido com base em estudos hidrodinâmicos complexos, sendo sua forma concebida de modo que a força de ondas no casco fosse minimizada, em todos os graus de liberdade.

O *moonpool*, visto em forma esquemática na Figura 3.12, visa um comportamento distinto, atuando como um redutor passivo de movimentos, devido a

uma diferença de fase entre os movimentos de *heave* da plataforma e da água interna ao *moonpool*, semelhante a um sistema massa-mola (TN PETROLEO, 2004).

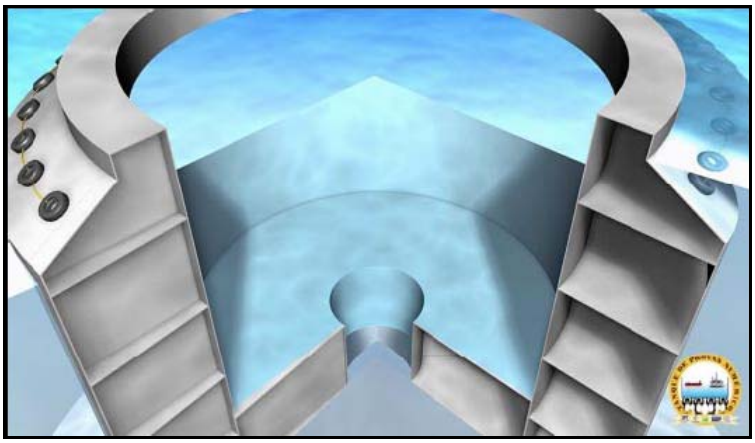

Figura 3.12: *Moonpool* para redução de movimentos (TN PETROLEO, 2004)

Essa defasagem é provocada pela inclusão de uma restrição de área no fundo do tanque, alterando a dinâmica da água interna. Com movimentos baixos viabilizados, além do aumento da vida à fadiga, existe a possibilidade de utilização de *risers* de maiores diâmetros e espessuras de isolamento térmico, sejam eles flexíveis ou SCRs (TN PETROLEO, 2004).

Devido à geometria descrita e por ser um sistema complacente a plataforma monocoluna pode experimentar o fenômeno de desprendimentos de vórtices causado pelo fluxo da corrente sofrendo assim movimentos de baixa freqüência (VIM). Este fenômeno tem sido observados em vários trabalhos publicados por SMITH (2004) e JIAO, G., MOAN, T., 1990. *Probabilistic analysis of fatigue due to Gaussian load processes.* Probabilistic Engineering Mechanics, Volume 5, Issue2, pp 76.

KOKKINIS (2004) assim como também em modelos experimentais por WAALS (2004).

Existem estudos numéricos e experimentais que mostram as grandes amplitudes alcançadas pelo VIM, por exemplo, LACERDA *et al*. (2009), que apresentam a influência destes movimentos no cálculo do dano à fadiga de *risers* conectados a este tipo de plataformas.

Semi-Submersível

As plataformas Semi-submersíveis de produção (ver Figura 3.13) podem ser classificadas em Convencional ou tipo *Taut-Leg* de acordo com o sistema de ancoragem. Ambos os tipos são de produção com completação molhada. O tipo convencional apresenta um sistema de ancoragem constituído por linhas em forma de catenária com cabos de aço ou amarras ou uma combinação de ambos. Por outro lado, o tipo *Taut-Leg* apresenta linhas esticadas. Estas linhas são constituídas nas suas extremidades por cabos de aço ou amarras e, no seu trecho intermediário, por cabos de poliéster. Os cabos de poliéster apresentam uma rigidez axial e um peso submerso por unidade de comprimento bem menor que os dos cabos de aço e das amarras com a mesma carga de ruptura nominal.

Figura 3.13: Plataforma Tipo Semi-submersivel

As linhas de ancoragem são fixas na sua extremidade inferior por meio de estacas de sucção. Outras opções de fundação podem ser utilizadas, tais como, âncora com resistência vertical (VLA) e estacas de fundeio.

Dentre as principais características de uma plataforma semi-submersível, têm-se:

- Movimentos reduzidos em condições extremas de mar na costa do Brasil: *heave* (movimento vertical) e *roll* (translação em torno do eixo x).
- Permite utilização de *risers* rígidos.
- Não possui capacidade de armazenamento de óleo.
- Permite mobilidade e mudança rápida de um campo para outro.

Como pode ser visto em RIJKEN, O. (2004), este tipo de plataforma também são susceptíveis à geração de movimentos causados pelo VIM. Para velocidades de corrente baixas (regime sub-critico), os movimentos carecem de importância, porém, para velocidades superiores podem aparecer movimentos transversais ao fluxo importantes. Trabalhos realizados por WAALS (2007) mostram que a resposta destas estruturas flutuantes com múltiples colunas se torna ainda mais complexa que para plataformas tipo monocoluna, dependendo da direção do fluxo relativa à configuração das colunas (ver Figura 3.14) já que existe uma interferência entre as esteiras de vórtices desprendidos ao redor das diferentes colunas que compõem a plataforma

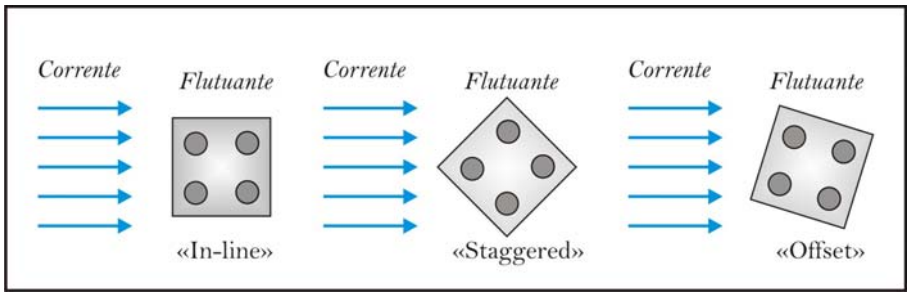

Figura 3.14: Direção relativa do fluxo em plataformas Semi Submersíveis

Spar

As plataformas tipo Spar caracterizam-se por ter um único cilindro vertical de aço operando com um calado de profundidade constante de cerca de 200 metros, o que gera apenas pequenos movimentos verticais e, conseqüentemente, possibilita a adoção de *risers* rígidos de produção.

As plataformas Spar possuem linhas de ancoragem em forma de catenária constituídas por diversos trechos de materiais diferentes, como amarras, cabos de aço ou

poliéster. Os *risers* são verticais, com grandes câmaras de flutuação na parte superior, que conferem a eles a resistência à tração necessária. A parte superior dos *risers* fica contida dentro do cilindro da Spar, protegendo os *risers* de ondas e correntes onde o efeito sobre os mesmos geralmente é maior (RIBEIRO, 1999).

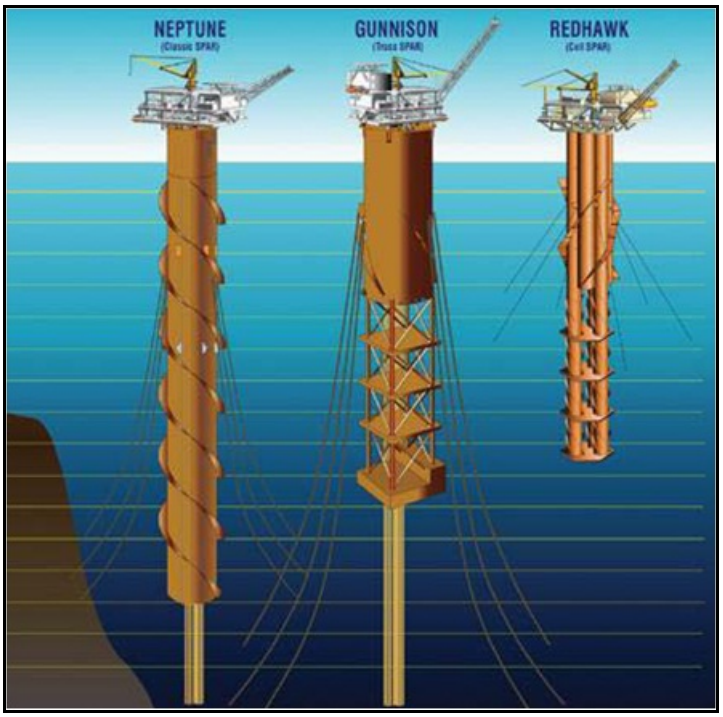

Figura 3.15: Diferentes tipos de plataformas Spar

Embora estas plataformas tenham excelente comportamento sob ação das ondas, são suscetíveis ao movimento induzidos por vórtices (VIM) podendo apresentar movimentos significativos tanto na direção transversal à corrente quanto na mesma direção do fluxo. O VIM pode assim diminuir significativamente a vida útil a fadiga tanto em *risers* (BAI *et al*, 2004) quanto em linhas de ancoragem (HUANG, K., *et al*, 2003) Para evitar ou diminuir a formação destes vórtices, utiliza-se uma treliça na parte inferior do cilindro (ver Figura 3.15). Uma alternativa para diminuir o efeito do VIM é o emprego de *strakes* ao longo do casco. Cabe destacar que estes tipos de plataforma foram durante longo tempo as únicas fontes de dados sobre o efeito VIM (IRANI, 2004).

TLP

As plataformas tipo TLP (*tension leg plataform*) caracterizam-se pelo empuxo maior que o peso, sendo a diferença deles absorvida por um conjunto de tendões tracionados com grande rigidez vertical, chamados *pontoons*, e cilindros verticais enrijecidos (ver Figura 3.16). O casco é constituído basicamente de seções tubulares retangulares horizontais.

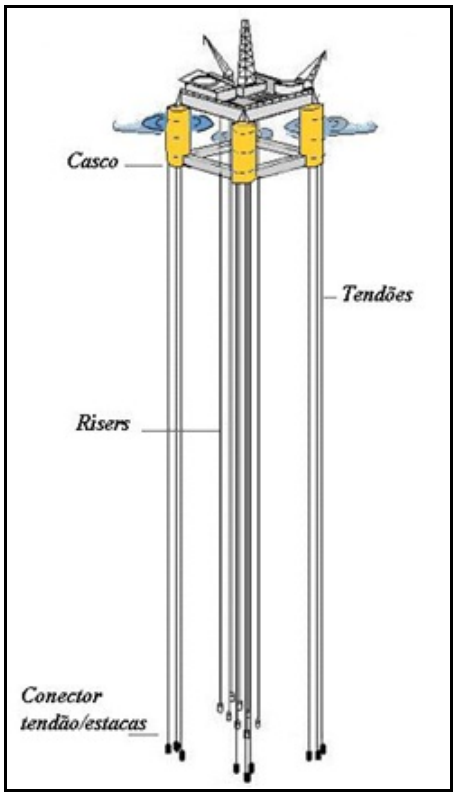

Figura 3.16: Esquema de plataforma TLP

Uma das vantagens da TLP é que ela permite a completação seca dos poços. A completação tipo 'seca' facilita o controle e as intervenções nos poços, sendo assim desnecessária a utilização de embarcações com posicionamento dinâmico para a intervenção nos poços, o que ocorre quando é utilizada a completação 'molhada', em que as árvores de natal ficam no fundo do mar. Outra vantagem é o fato de tornar mais simples e limpo o arranjo de fundo, pois não são necessárias linhas de ancoragem em catenária similares às utilizadas em plataformas semi-submersíveis e/ou spars/monocolunas.

O efeito do VIM neste tipo de plataforma flutuante foi investigado ao igual que para plataformas tipo semi-submersíveis levando em consideração o efeito de interferência entre as esteiras de vórtices desprendidas pelo efeito do fluxo passando através das colunas que a TLP possui constituindo um efeito ainda mais complexo de analisar (WAALS *et al*, 2004)

Como foi visto anteriormente, existem diversos tipos de plataformas sujeitas ao efeito do VIM, que transmitem estes movimentos aos *risers* ligados a elas. Os *risers* são elementos estruturais utilizados para injeção de água, de gás, exportação de óleo e gás, etc. Algumas concepções estão sendo estudadas e outras têm sido desenvolvidas para sua utilização em águas profundas e ultra profundas. Os *risers* podem ser classificados em dois grupos: Rígidos ou Flexíveis.

Os *risers* flexíveis se caracterizam por ter diferentes camadas que conformam a sua estrutura (ver Figura 3.17). Essas camadas não-aderentes são independentes, isto é, são justapostas ou extrusadas umas sobre as outras, mas são dimensionadas para interagir, possibilitando, assim, que a linha resista à grande variedade de carregamentos a que é submetida. Assim, dependendo do tipo de aplicação para a qual o *riser* está sendo dimensionado, o fabricante poderá utilizar ou não determinado tipo de camada. (SOUSA, 2005).

Figura 3.17: Camadas que conformam um *riser* flexível

Os *risers* rígidos (ver Figura 3.18) são formados por seqüências de tubos metálicos geralmente unidos por solda no topo. Estas estruturas podem ser usadas tanto em atividades de perfuração como de produção e intervenção, e podem estar envolvidos por flutuadores para diminuir o seu peso. Existem diversas configurações para *risers* rígidos, tais como, em catenária livre, chamados de *SCR* (ver Figura 3.19); Top Tensioned Riser (TTR); Single Line Offset Riser (SLOR); Steel Lazy Wave Riser (SLWR); etc.

Figura 3.18: *Riser* rígido

Como será mostrado no modelo utilizado nesta dissertação, o *riser* rígido pode ser ligado à plataforma através de uma *stress joint* localizada no topo. Essa *stress joint* (BAZÁN *et al*., 2008) deve ter dimensões tais que as tensões máximas, desenvolvidas pelo carregamento mais desfavorável, atendam ao critério de projeto da estrutura, isto é, sejam inferiores a uma fração da tensão de escoamento dos materiais que compõem a mesma.

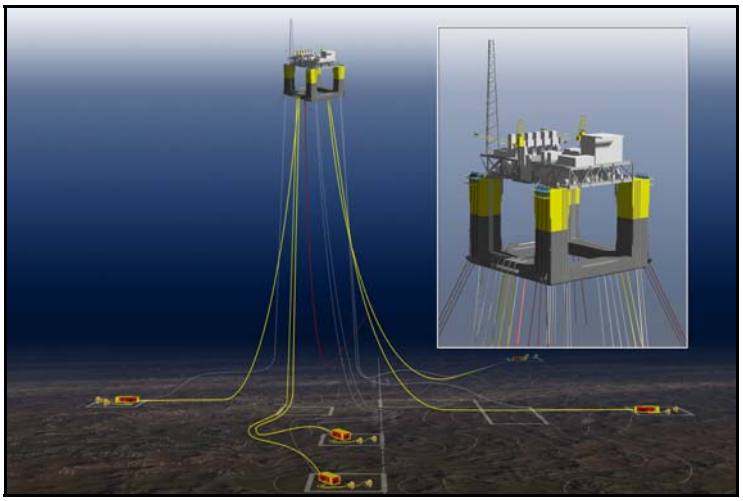

Figura 3.19: *Risers* em configuração de catenária livre (SCR)

Os movimentos impostos pelo flutuante constituem-se de um das principais fontes de carregamento para os *risers*. Neste sentido, os movimentos devidos ao VIM podem ser importantes tanto para a análise de tensões externas como na análise de fadiga.

4 Cálculo de Fadiga para espectros bi-modais

Quando o espectro de tensões apresenta duas faixas de energia bem definidas e separadas, i.e., um espectro bi-modal, é possível realizar um cálculo aproximado do dano à fadiga conforme a DNV-RP-F204.

Espectros de tensões com esta característica podem ser encontrados numa estrutura submetida simultaneamente a movimentos de baixa freqüência e movimentos na freqüência das ondas. Nestes casos, o processo pode ser assumido como sendo composto por dois processos independentes. Em estruturas *offshore*, um típico exemplo é o dano à fadiga provocado pelos movimentos impostos pela onda e pela baixa freqüência dos movimentos gerados pelo efeito VIM mencionados anteriormente. Cabe ressaltar que, devido às grandes amplitudes de movimentos que caracterizam este fenômeno, o VIM pode gerar danos importantes maiores que danos gerados pela onda nas diferentes regiões de um *riser*.

Analisando um ponto de um SCR conectado a um flutuante sob ação de onda e corrente (ver Figura 4.1), a série de tensões é composta por ciclos de baixa freqüência e ciclos na freqüência das ondas, sendo a corrente responsável pelos ciclos de tensões de baixa freqüência (VIM). Cabe ressaltar que a onda também gera séries de tensões de freqüências menores e maiores que as consideradas, devido a efeitos de ordem superior. Porém, neste trabalho, estes efeitos, como já foi mencionado, não foram considerados.

Estas séries temporais constituem-se de formas aleatórias originados pela onda e pela corrente. Como os parâmetros ambientais de onda e corrente são considerados como estacionários para um período de tempo de curto-prazo, usualmente 3-h, tem-se uma série temporal de tensões representativa para cada período de curto-prazo.

Assim para á analise de um riser, os parâmetros ambientais de onda e corrente são representados por um conjunto dados agrupados com base nos dados medidos que combinados entre si geram os diferentes estados de mar aos quais estará sujeito o flutuante.O cálculo do dano é feito para cada estado de mar e o dano final é feito pela

regra de Miner superpondo os danos individuais de todos os estados de mar no longo-prazo.

A identificação dos diferentes ciclos de tensões no curto prazo pode ser feita utilizando o método de Rainflow, que é capaz de detectar ciclos de diferentes freqüências em qualquer sinal analisado (Figura 4.1).

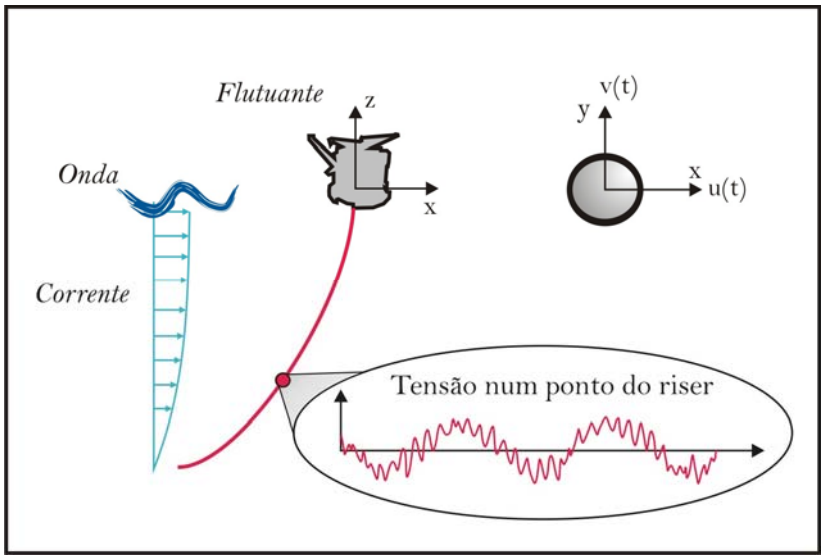

Figura 4.1: Série de tensões com espectro bi-modal

Como foi mencionado no parágrafo anterior, para o cálculo do dano a fadiga considerando o efeito de VIM, é necessário então levar em conta todas as combinações existentes de onda e corrente. Isto geralmente requer um elevado número de análises, o que se traduz num elevado tempo computacional, além do espaço em discos rígidos. Aqui reside a importância do estudo e desenvolvimento de metodologias confiáveis para a análise à fadiga que permitam poupar tempo de análise e processamento de resultados sem prejudicar a qualidade dos resultados obtidos.

A seguir, apresenta-se o método proposto pela norma DNV-RP-F204. Este método simples permite o cálculo do dano a fadiga a partir dos danos individuais devido às ondas e devido à corrente. O dano final é obtido por uma combinação destes resultados.

Partindo-se de N ondas (Hs, Tz) e M correntes, o número de análises estruturais usados para o cálculo do dano à fadiga pode ser feito para N ondas e M correntes e não

para N vezes M combinações. Em resumo, a metodologia que será explicada no próximo item, combina os danos de ondas e correntes calculados separadamente, eliminando a necessidade do cálculo das séries temporais de tensões para todas as combinações de estados de mar, i.e., número de ondas vezes número de correntes.

4.1 Metodologia da DNV para cálculo de fadiga considerando espectros de tensões bi-modais.

Como foi dito anteriormente, o objetivo desta dissertação é a avaliação da metodologia proposta na norma DNV-RP-F204 utilizada para o cálculo simplificado do dano à fadiga considerando espectros de tensões bi-modais.

Como se observa na Figura 4.2, podemos separar uma série de tensões bi-modal em duas séries de tensões independentes, uma contendo unicamente os ciclos na freqüência das ondas e, a outra, unicamente os ciclos de baixa freqüência.

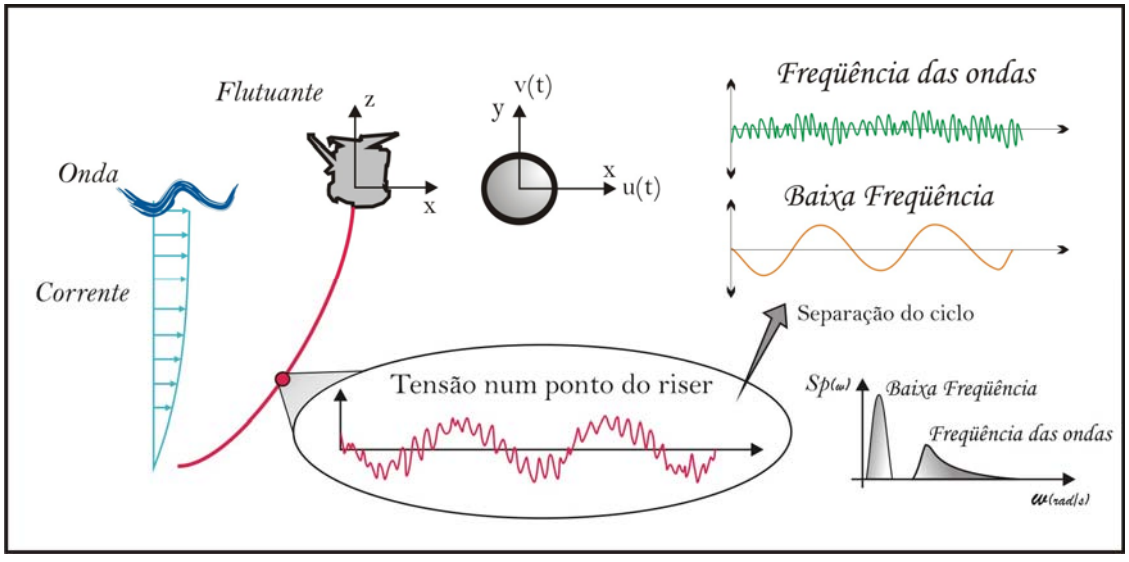

Figura 4.2: Separação do ciclo de tensões de bi-modal em baixa freqüência e freqüência das ondas

A seguir apresenta-se a metodologia proposta pela DNV-RP-F204, partindo-se dos conceitos básicos e chegando-se finalmente na expressão que representa o dano combinado à fadiga.

Conforme já visto no item 2.1 desta dissertação, a expressão logarítmica para uma curva S-N de uma única inclinação é dada por:

$$LogN = \log(\bar{a}) - m\log(S) \tag{4.1}$$

ou

$$N = \bar{a}S^{-m} \tag{4.2}$$

onde:

Log($\bar{a}$) = intersecção com o eixo Log N;

m = tangente inversa negativa da curva S-N;

S = amplitude de tensão.

O dano à fadiga calculado com base na regra de Miner é dado por:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \tag{4.3}$$

O número de ciclos para uma série temporal determinística está relacionado à freqüência de ciclos, ν, através da seguinte expressão:

$$n = \nu\ T_d \tag{4.4}$$

onde T_d = vida de projeto em segundos.

Das equações (4.3) e (4.4) podemos escrever o dano a fadiga como:

$$D\ = \frac{\nu\ T_d \left(S\ \right)^m}{\bar{a}} \tag{4.5}$$

Conhecendo-se o dano, a variação de tensões que cause tal dano pode ser determinado por:

$$S = \left(\frac{D\ \overline{a}}{\nu\, T_d} \right)^{1/m} \tag{4.6}$$

Conhecendo-se o dano à fadiga causado por um processo aleatório de banda estreita, D_{BS}, e a freqüência de cruzamento zero, ν_0, deste processo, a expressão 4.6 pode ser também utilizada para determinar uma série determinística de tensões que causam um dano equivalente, i.e.,

$$S^E = \left(\frac{D_{BS}\ \overline{a}}{\nu_0\, T_d} \right)^{1/m} \tag{4.7}$$

onde Ts é a duração do processo de banda estreita.

A idéia básica do procedimento apresentado pela DNV-RP-F204 é inicialmente representar as duas faixas do espectro de tensões por duas séries determinísticas que causam os mesmos danos de cada faixa e depois calcular o dano final baseado na combinação destas duas séries harmônicas (ver Figura 4.3)

Analisando uma serie de tensões obtida pela superposição linear de uma série harmônica de tensões de baixa freqüência e uma série harmônica com freqüência de onda, vemos que a variação (range) de tensões dos ciclos de baixa freqüência detectados na série combinada de tensões bi-modal encontra-se incrementada pela variação dos ciclos de freqüência da onda (ver Figura 4.3).

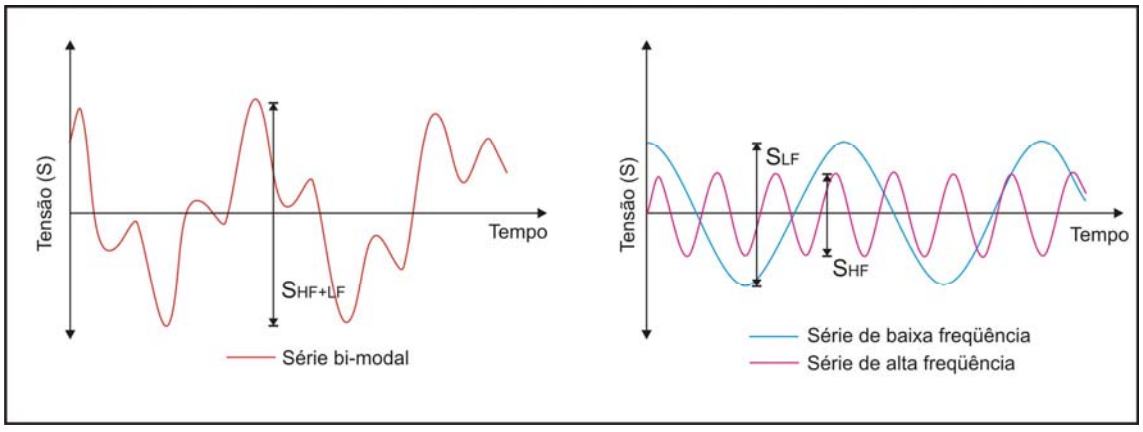

Figura 4.3: Variação de Tensões

Assim, o dano identificado pelo método Rainflow para contar ciclos na série de tensões combinada seria:

$$D = D_{WF} + D^{*}_{LF} \tag{4.8}$$

Da Eq. (4.5) vemos que

$$D_{WF} = \frac{\nu_{WF}\, T_d \left(S_{WF}\right)^m}{\overline{a}} \tag{4.9}$$

e

$$D^{*}_{LF} = \frac{\nu_{LF}\, T_d \left(S_{WF} + S_{LF}\right)^m}{\overline{a}} \tag{4.10}$$

Podemos reescrever D^{*}_{LF} como:

$$D^{*}_{LF} = \frac{\nu_{LF}\, T_d}{\overline{a}} \frac{S^m_{LF}}{S^m_{LF}} \left(S_{WF} + S_{LF}\right)^m = \frac{\nu_{LF}\, T_d S^m_{LF}}{\overline{a}} \left(\frac{S_{WF} + S_{LF}}{S_{LF}} \right)^m \tag{4.11}$$

e como:

$$D_{LF} = \frac{\nu_{LF}\, T_d \left(S_{LF}\right)^m}{\overline{a}} \tag{4.12}$$

Podemos finalmente escrever D^{*}_{LF} como:

$$D^{*}_{LF} = D_{LF} \left(\frac{S_{WF} + S_{LF}}{S_{LF}} \right)^m \tag{4.13}$$

Substituindo a Eq. (4.13) na Eq. (4.8) fica:

$$D = D_{WF} + D_{LF} \left(\frac{S_{WF} + S_{LF}}{S_{LF}} \right)^m \tag{4.14}$$

Como foi visto, a Eq. (4.14) contempla uma variação de tensão maior para os ciclos de baixa freqüência detectados (aumentados pela variação de ciclos de freqüência da onda) e por isto devemos subtrair o dano correspondente ao número de ciclos de

baixa freqüência detectados, mas de variação de tensão correspondente aos ciclos de freqüência da onda.

Ou seja,

$$D^* = \frac{\nu_{LF}\, T_d \left(S_{WF}\right)^m}{\overline{a}} \tag{4.15}$$

Podemos escrever a Eq. (4.15) como:

$$D^* = \frac{\nu_{LF}\, T_d \left(S_{WF}\right)^m}{\overline{a}} \frac{\nu_{WF}\, T_d}{\nu_{WF}\, T_d} = D_{WF}\, \frac{n_{LF}}{n_{WF}} \tag{4.16}$$

Subtraindo D* na Eq. (4.16) obtemos a equação:

$$D = D_{WF} + D_{LF} \left(\frac{S_{WF} + S_{LF}}{S_{LF}} \right)^m - D_{WF}\, \frac{n_{LF}}{n_{WF}} \tag{4.17}$$

onde:

D = dano total à fadiga (combinação dos danos devido às parcelas de baixa freqüência e freqüência da onda da série de tensões);

S_{WF} = faixa de tensões representativa da parcela de freqüência da onda;

S_{LF} = faixa de tensões representativa da parcela de baixa freqüência;

n_{WF} = número de ciclos de tensões correspondente à parcela de freqüência da onda do espectro;

n_{LF} = número de ciclos de tensões correspondente à parcela de baixa freqüência do espectro;

m = tangente da curva S-N utilizada;

Usando a expressão da tensão equivalente (Eq. (4.6)) e a expressão que relaciona o número de ciclos à freqüência de cruzamento zero na Eq. (4.17), obtemos através de uma simples dedução a equação para o cálculo de fadiga para espectros de baixa freqüência e freqüência da onda combinados, como mostrado a seguir.

Substituindo as Eqs. (4.4) e (4.6) em (4.17) obtemos:

$$D = D_{WF} + D_{LF} \cdot \left[\frac{\left(\frac{D_{WF}\,\bar{a}}{\nu_{WF} T_d} \right)^{1/m} + \left(\frac{D_{LF}\,\bar{a}}{\nu_{LF} T_d} \right)^{1/m}}{\left(\frac{D_{LF}\,\bar{a}}{\nu_{LF} T_d} \right)^{1/m}} \right]^m - D_{WF} \cdot \frac{\nu_{LF} T_d}{\nu_{WF} T_d} \tag{4.18}$$

Simplificando $\bar{a}$ e T_d, a Eq. (4.18) fica:

$$D = D_{WF} - D_{WF} \cdot \frac{\nu_{LF}}{\nu_{WF}} + D_{LF} \cdot \left[\frac{\left(\frac{D_{WF}}{\nu_{WF}} \right)^{1/m} + \left(\frac{D_{LF}}{\nu_{LF}} \right)^{1/m}}{\left(\frac{D_{LF}}{\nu_{LF}} \right)^{1/m}} \right]^m \tag{4.19}$$

Agrupando os termos:

$$D = D_{WF} \cdot \left(1 - \frac{\nu_{LF}}{\nu_{WF}} \right) + D_{LF} \cdot \frac{\left[\left(\frac{D_{WF}}{\nu_{WF}} \right)^{1/m} + \left(\frac{D_{LF}}{\nu_{LF}} \right)^{1/m} \right]^m}{\left(\frac{D_{LF}}{\nu_{LF}} \right)} \tag{4.20}$$

Finalmente, simplificando D_{LF}, chega-se à expressão que é fornecida pela norma DNV-RP-F204:

$$D = D_{WF} \cdot \left(1 - \frac{\nu_{LF}}{\nu_{WF}} \right) + \nu_{LF} \cdot \left[\left(\frac{D_{WF}}{\nu_{WF}} \right)^{1/m} + \left(\frac{D_{LF}}{\nu_{LF}} \right)^{1/m} \right]^m \tag{4.21}$$

onde:

D = dano total à fadiga (combinação dos danos devidos às parcelas de baixas freqüências e freqüência da onda da série espectro de tensões);

D_{wF} = dano à fadiga calculado considerando somente a parcela de Freqüência da onda;

D_{LF} = dano à fadiga calculado considerando somente a parcela de baixa freqüência;

ν_{WF} = freqüência de cruzamento zero da parcela de freqüência da ondado espectro;

ν_{LF} = freqüência de cruzamento zero da parcela de baixa freqüência do espectro;

m = tangente da curva S-N utilizada;

Pela expressão (4.21) o dano à fadiga de um sinal composto pode ser calculado a partir dos danos calculados individualmente para cada componente do sinal de tensões. Entretanto, esta expressão que foi deduzida para curvas S-N com uma única inclinação pode ser utilizada para curvas S-N bilineares, isto é, com dois coeficientes angulares m. Nesses casos, a norma DNV-RP-F204 propõe duas alternativas. Uma delas consiste em calcular os danos à fadiga para os espectros de baixa freqüência e freqüência da onda usando a curva S-N de duas inclinações e depois utilizar na Eq. (4.20) o coeficiente m correspondente ao trecho da faixa de tensões que mais contribui para o dano à fadiga. Por exemplo, como se observa na Figura 4.4, em 10^7 ciclos a curva passa de m = 3 para m = 5. Se o maior dano ocorre na faixa de tensões correspondente a mais de 10^7 ciclos de vida útil, então a Eq. (4.20) para a combinação dos danos dados pelos espectros de baixa freqüência e freqüência da onda é utilizada com um coeficiente angular m = 5.

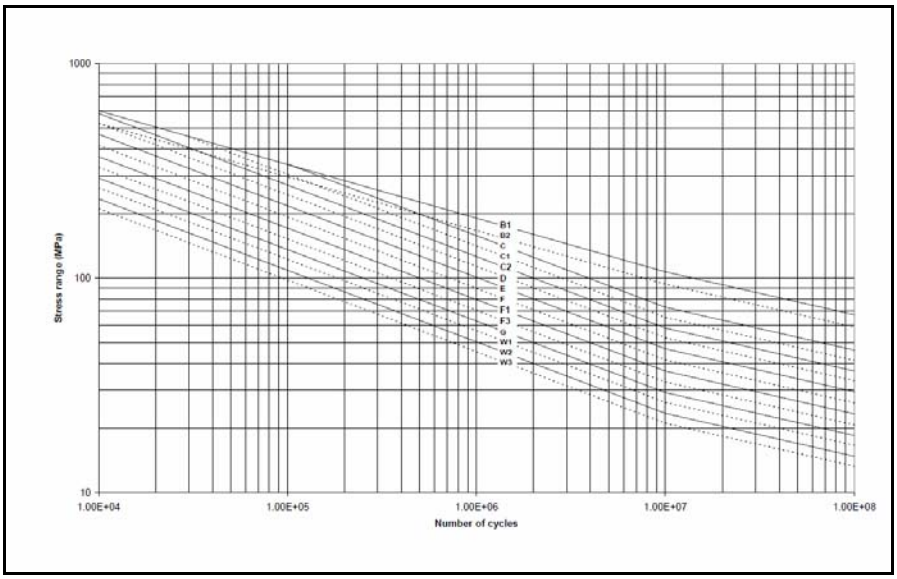

Figura 4.4: Curva S-N

A segunda alternativa proposta pela norma consiste em calcular o dano à fadiga para o espectro de baixa freqüência utilizando uma curva S-N de uma tangente única com coeficiente *m* igual ao coeficiente do primeiro trecho da curva (no caso da curva S-N apresentada, seria $m = 3$). O dano à fadiga para o espectro de freqüência da onda é calculado com a curva S-N de dois trechos e, finalmente, na combinação de danos através da Eq. (4.21), utiliza-se o coeficiente *m* empregado no cálculo de fadiga do espectro de baixa freqüência.

5 Estudo de casos

Neste capítulo é analisada a fadiga de dois SCRs conectados a uma plataforma do tipo monocoluna instalados numa lâmina d água de 1700 m. Nesta análise são contemplados os efeitos de primeira ordem das ondas e os efeitos dinâmicos devido aos movimentos induzidos por vórtices devido a passagem da corrente pela unidade flutuante.

5.1 Metodologia de Avaliação da Fadiga

Para análise da vida á fadiga será considerado que os parâmetros ambientais que caracterizam a corrente e as ondas são estatisticamente independentes. Além disto, assume-se que para a locação em estudo a corrente possa ser representada por Nc perfis discretos (velocidade superficial e direção de incidência), cada um com sua relativa freqüência de ocorrência, e por Nw estados de mar discretos. Cada estado de mar é representado por um par de valores (Hs, Tz) e uma dada direção de incidência. Além disto, cada estado de mar apresenta uma freqüência relativa de ocorrência. A Tabela 5.1 apresenta 72 perfis de correnteza utilizados no presente trabalho. A Tabela 5.2 apresenta os 32 estados de mar utilizados e suas freqüências relativas.

Tabela 5.1: Freqüência relativa (%) das velocidades superficiais de correntes, por direção

Velocidade [m/seg]	Direção de incidência							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
0.05	0.919900	0.952500	1.032000	1.445000	2.879800	2.496000	1.349000	0.992500
0.15	0.827200	0.661800	1.185000	3.313000	7.729400	5.130000	1.456000	0.818100
0.25	0.580900	0.482800	1.068000	4.238000	9.368532	4.451000	0.869500	0.431000
0.35	0.375200	0.356800	0.894800	4.380000	7.834100	2.453000	0.398100	0.188600
0.45	0.223000	0.265600	0.718200	3.957000	4.940400	0.939200	0.150700	0.072800
0.55	0.135700	0.198600	0.559400	3.224000	2.430500	0.259200	0.048900	0.025400
0.75	0.144700	0.345800	0.977200	5.155000	1.316100	0.061390	0.018190	0.011390
1.05	0.022900	0.149000	0.376100	1.207200	0.017510	0.000765	0.000195	0.000237
1.35	0.003550	0.117100	0.189300	0.180200	0.000036	0.000000	0.000001	0.000003
Total parcial	3.23	3.53	7.00	27.10	36.52	15.79	4.29	2.54
Total	100.00							

Tabela 5.2: Freqüência relativa dos pares Hs e Tz associados

Direção da onda (de onde vem)	Hs [m]	Tz [seg]	Freqüência Relativa [%]
N	1.547	4.624	3.834
N	1.547	6.143	2.255
N	2.794	5.415	1.302
N	2.794	7.185	1.028
NE	1.503	4.691	10.020
NE	1.503	6.181	6.679
NE	2.634	5.493	3.614
NE	2.634	7.159	3.154
E	1.473	4.918	6.418
E	1.473	6.504	6.557
E	2.686	5.864	2.189
E	2.686	7.381	2.677
SE	1.601	5.443	5.866
SE	1.601	7.327	5.088
SE	3.109	6.499	1.732
SE	3.109	8.404	1.874
S	1.677	5.694	9.896
S	1.677	7.905	8.226
S	3.285	6.915	2.856
S	3.285	9.182	2.991
SW	2.103	6.014	4.618
SW	2.103	8.505	3.877
SW	4.194	7.387	1.281
SW	4.194	9.93	1.354
W	1.371	4.91	0.088
W	1.371	6.034	0.094
W	2.322	5.6	0.035
W	2.322	6.658	0.044
NW	1.556	4.908	0.150
NW	1.556	6.675	0.100
NW	2.746	5.856	0.054
NW	2.746	7.834	0.046

Assumindo-se que o período de curto prazo das ações ambientais é de 3-h, o dano anual de fadiga num dado ponto de um riser é dado por:

$$D_{1ano} = \sum_{i=1}^{Nc} \sum_{j=1}^{Nw} D_{i,j} 2920 p_{i,j} \tag{5.1}$$

Onde $p_{i,j}$ é a probabilidade de ocorrência da i-ésima corrente com a j-ésima onda (que é produto das freqüências relativas individuais destes parâmetros uma vez que eles são considerados estatisticamente independentes) e $D_{i,j}$ é o respectivo dano de fadiga que contempla os efeitos dinâmicos da onda e da corrente (VIM) sobre o riser.

O dano $D_{i,j}$ pode ser calculado a partir de uma série temporal de tensões obtida de uma análise dinâmica aleatória do riser, que considere os movimentos prescritos no topo devido a onda j e a corrente i (VIM). Desta forma o número de análises dinâmicas aleatórias necessárias para análise de fadiga é Nc x Nw (no presente caso, 72 x 32 = 2304). Neste trabalho esta forma de cálculo do dano foi denominada como análise "completa" de fadiga e foi efetuada para fins de avaliar a forma baseada na metodologia da DNV.

Observa-se que o número de análises aleatórias para a análise de fadiga denominada de completa é excessivamente grande. Para diminuir este número de análises pode-se assumir que o sinal de tensões é composto pela superposição de uma componente de baixa freqüência devida a corrente (VIM) com outra série temporal com o mesmo conteúdo de freqüências do espectro das ondas do mar.

Além disto, com esta hipótese a expressão da DNV (Eq. (4.20)) pode ser utilizada para calcular o dano combinado de uma corrente i com um estado de mar j. Em resumo, calcula-se separadamente a resposta do riser para os movimentos induzidos (VIM) para cada corrente i e para cada estado de mar j, avalia-se o dano a fadiga devido a corrente D_i e o dano devido a onda D_j e finalmente calcula-se o dano Di,j com a metodologia de combinação de dano proposta pela DNV e discutida no Capítulo 3.

Desta forma, o número de análises aleatórias reduz-se para Nw + Nc (72 + 32 = 104, no presente caso), o que resulta numa significativa redução de custo computacional

assim como uma diminuição importante no volume de dados a serem armazenados. A redução de custo computacional está relacionada ao fato de que estas análises aleatórias (no presente trabalho) demandam no mínimo duas horas de processamento cada uma delas para um tempo de simulação de 3600s.

Este procedimento será identificado neste trabalho como modelo combinado para análise de fadiga. A Figura 5.1 ilustra o número de análises dinâmicas aleatórias realizadas para cada um dos *risers* investigados neste trabalho.

Figura 5.1: Número de análises dinâmicas para cada riser

Entretanto, como a resposta estrutural de um riser não é linear, a superposição de efeitos assumida no modelo combinado constitui-se de uma aproximação. É objetivo deste trabalho verificar, através da comparação dos resultados das análises completa e combinada, quanto significativo é o erro desta aproximação para casos práticos de análise. Ao longo do texto esta comparação será feita pela seguinte expressão:

$$F = \frac{D_{Combinado}}{D_{Completo}} \tag{5.2}$$

onde

$D_{Combinado}$ = dano calculado pelo modelo combinado

$D_{Completo}$ = dano calculado pelo modelo composto

Todos os cálculos dos danos neste trabalho, exceto o dano combinado dado pela Eq. (4.20), foram calculados pelo método Rainflow.

5.2 Ferramentas Computacionais utilizadas

Os programas utilizados para a execução deste trabalho foram:

DYNASIM (2008): utilizado para o cálculo dos offsets estáticos a serem impostos na análise dinâmica dos *risers*. Para a análise de fadiga, somente considerou-se o offset estático devido à corrente.

VIME (2009): utilizada para o cálculo dos movimentos induzidos por vórtices (VIM) devido à passagem da corrente pelo flutuante.

ANFLEX (2009): utilizada para a análise dinâmica aleatórias no domínio do tempo, i.e., este é o programa que gera as séries temporais de esforços ao longo do riser que posteriormente são utilizados para geração de séries de tensões.

POSFAL (2009): este programa processa as séries temporais de esforços, calcula as séries temporais de tensões ao longo do riser e calcula o dano a fadiga, no presente caso, pelo método Rainflow.

COMBFAD(2009): programa que combina os danos gerados pela onda e pelo efeito do VIM separadamente, utilizando a formulação proposta pela norma DNV-RP-F204.

5.3 Características da Monocoluna e dos *Risers* Analisados

Foi analisado neste trabalho um modelo com dados aproximados para fines acadêmicos de uma plataforma do tipo Monocoluna, instalada numa lâmina d'água de 1700 m e submetida a condições ambientais descritas anteriormente. Esta plataforma é ancorada no leito marinho por meio de 15 linhas de ancoragem e possui 48 *risers* ligados a ela (ver Figura 5.2).

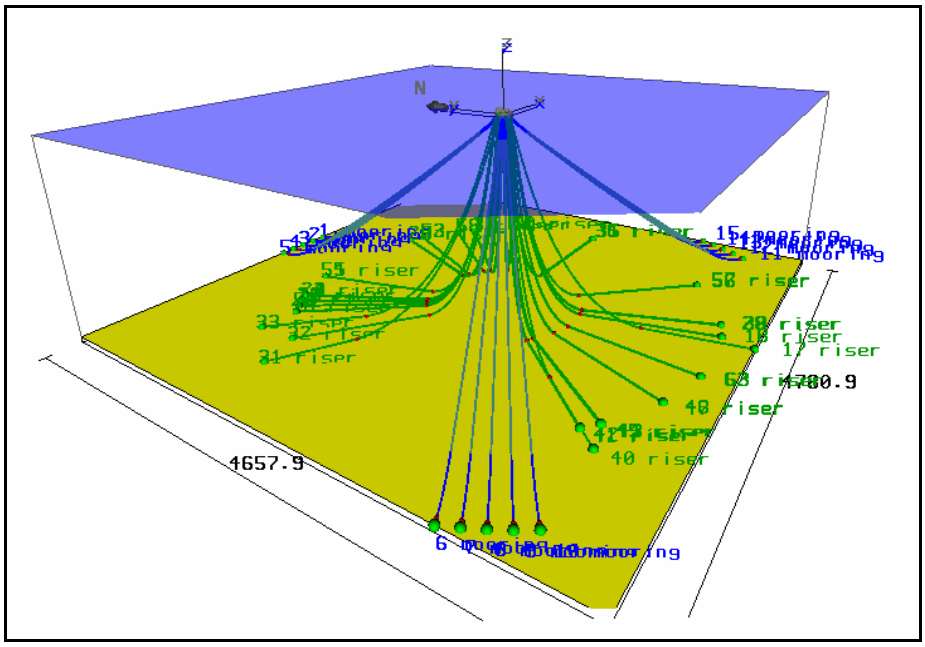

Figura 5.2: Modelo da monocoluna utilizado

Nas Tabelas 5.1 a 5.3 são apresentadas as propriedades principais da plataforma monocoluna e das suas linhas de ancoragem.

Tabela 5.3: Propriedades da Plataforma do tipo Monocoluna utilizada

Característica	Valores	Unidades
Diâmetro	118.60	m
Calado Médio de operação	32.12	m
Deslocamento	293315	ton

Tabela 5.4: Propriedades das linhas de ancoragem

Material	Comprimento (m)	HD (m)	Diâmetro Externo (m)	EA (kN)	Peso Seco (kN/m)	Peso na Água (kN/m)	CM	CD
Amarra de topo	200	0.114	0.114	771137.0	0.550	0.218	2.0	1.7
Poliéster	2400	0.210	0.210	187129.0	0.284	0.075	2.0	1.2
Amarra de Fundo	450	0.120	0.120	854427.0	0.825	0.458	2.0	1.7

Tabela 5.5: Características Geométricas das linhas de ancoragem

Linha	Azimute (Graus)	Coordenadas do topo			Pré-Tração (kN)
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
1	6.00	12.00	66.57	4.00	2153.50
2	3.00	6.00	66.57	4.00	2153.30
3	0.00	0.00	66.57	4.00	2153.10
4	357.00	-6.00	66.57	4.00	2153.10
5	354.00	-12.00	66.57	4.00	2153.40
6	246.00	-63.65	-22.89	4.00	2251.70
7	243.00	-60.65	-28.09	4.00	2255.70
8	240.00	-57.65	-33.29	4.00	2259.40
9	237.00	-54.65	-38.48	4.00	2263.00
10	234.00	-51.65	-43.68	4.00	2266.70
11	126.00	51.65	-43.68	4.00	2268.50
12	123.00	54.65	-38.48	4.00	2265.00
13	120.00	57.65	-33.29	4.00	2261.50
14	117.00	60.65	-28.09	4.00	2257.80
15	114.00	63.65	-22.89	4.00	2253.90

Os *SCRs* (*Steel Catenary Risers*) escolhidos para a análise de fadiga são os de números 17 e 36 (ver Figura 5.3 e Figura 5.4). Nas Tabelas 5.4 a 5.6, são apresentadas as características principais dos *risers* selecionados. Estes *risers* tem uma *stress joint* de titânio no topo. A Figura 5.5 ilustra os detalhes destas *stress joints*.

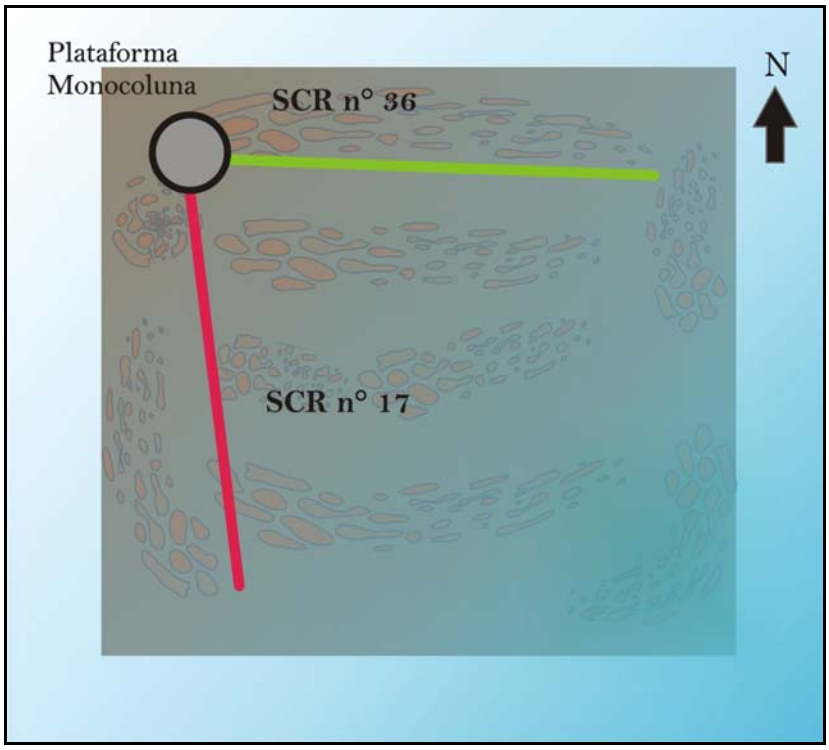

Figura 5.3: SCRs selecionados para análise à fadiga. Vista superior

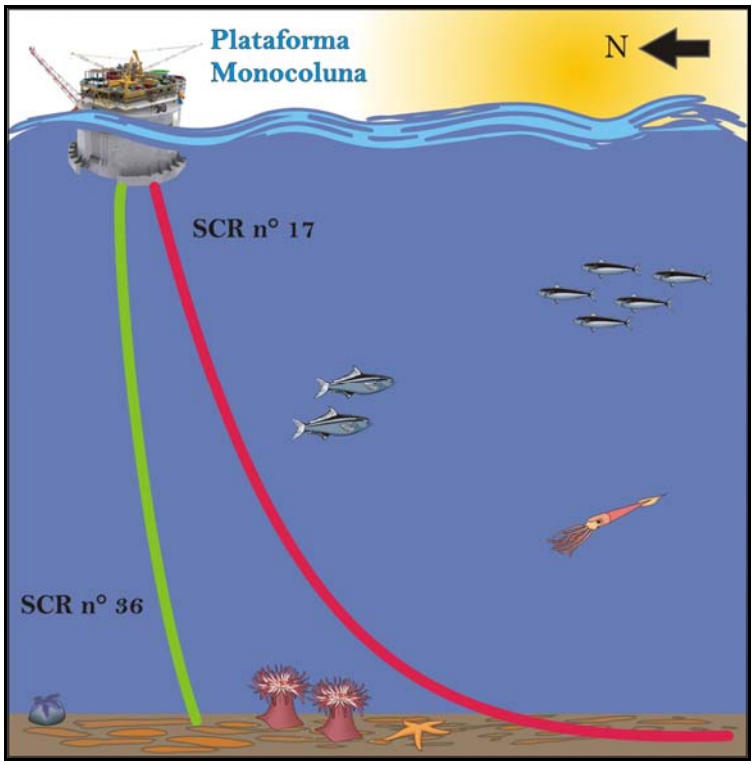

Figura 5.4: SCRs selecionados para análise à fadiga. Vista lateral

Tabela 5.6: Posição dos SCRs analisados

SCR	Azimute [Graus]	Coordenadas do topo			Ângulo de topo [graus]
		X [m]	Y [m]	Z [m]	
17	170	0	-71	5	15
36	90.4	66.57	-0.51	1	7

Tabela 5.7: Propriedades dos *Risers* n° 17 e n° 36. Parte 1

Trecho	Fluido Interno [kN/m³]	Comprimento da linha [m]	Diâmetro Externo [m]	Diâmetro Interno [m]	Coef. de Poisson	E [kN/m²]
Stress Joint	10.055	20	0.27305	0.2318	0.3	1.1E+08
Topo	10.055	100	0.27305	0.2318	0.3	2.1E+08
Inter.	10.055	880	0.27305	0.2318	0.3	2.1E+08
Fundo	10.055	2250	0.27305	0.2318	0.3	2.1E+08

Tabela 5.8: Propriedades dos *Risers* n° 17 e n° 36. Parte 2

Trecho	Peso Específico [kN/m²]	Peso Flutuador [kN/m]	Empuxo Flutuador [kN/m]	C_M	C_D	C_A	HD [m]
Stress Joint	43.4583	0.389	0.3524	2	1	1	0.27305
Topo	77.0085	0.389	0.3524	3	2	1	0.3339
Inter.	77.0085	0.3601	0.3266	3	2	1	0.3299
Fundo	77.0085	0.02297	0.02616	2	1	1	0.27905

Cabe destacar que foi considerada na região intermediária do *riser* a utilização de *strakes*, o que reduz os movimentos gerados pelo efeito do VIM ao "romper" a freqüência de desprendimentos de vórtices ao longo do mesmo.

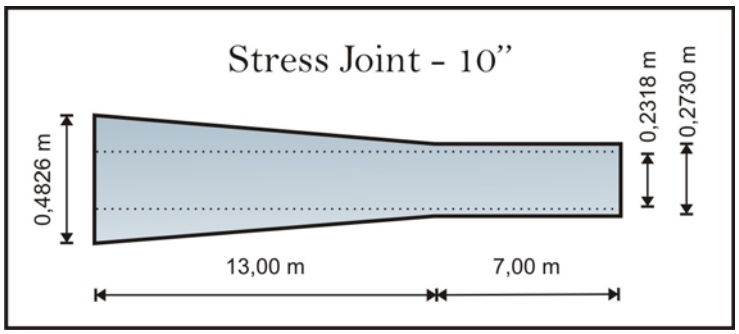

Figura 5.5: Detalhe da *Stress Joint* usada na modelagem dos SCRs

5.4 Curva S-N

Na região do topo dos SCRs, onde utiliza-se uma stress joint de titânio, foi utilizada a seguinte curva S-N [SOUSA, 2005]

$$\log(N) = -3.4 \times \log(S) + 13.4$$

Fora da região do topo, utiliza-se a curva S-N bi-linear "E" para aço com proteção catódica (DNV-RP-C203, 2008), destacada na Figura 5.6, cuja expressão é:

$$\log(N) = -3.0 \times \log(S) + 11.610; \quad \text{Para } N < 10^6 \text{ ciclos}$$
$$\log(N) = -5.0 \times \log(S) + 15.35; \quad \text{Para } N > 10^6 \text{ ciclos}$$

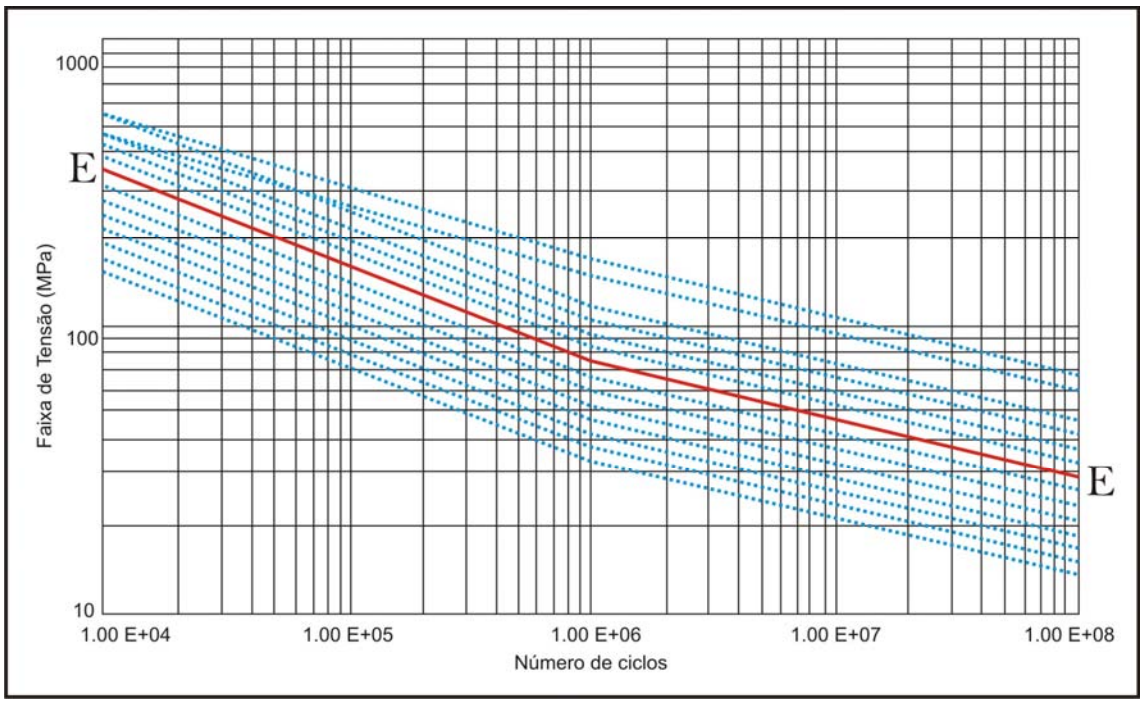

Figura 5.6: Curva S-N bi-linear utilizada no cálculo do dano à fadiga

5.5 Offsets Estáticos e Movimentos Induzidos pela Corrente (VIM).

A Tabela 5.9 apresenta os offsets estáticos para as correntes principais com relação a geração de movimentos induzidos por vórtices. A

Tabela 5.10 apresenta um resumo dos movimentos harmônicos gerados pela passagem da corrente (VIM). Observa-se que estes movimentos foram obtidos pelo programa VIME considerando o valor da corrente superficial. Na análise dinâmica dos *risers* e dos offsets foi utilizado um perfil triangular com velocidade nula no fundo.

Para as demais velocidades de corrente (menores que 0.65 m/seg), não incluídas na Tabela, os movimentos induzidos por vórtices (VIM) não foram significativos.

Tabela 5.9: *Offsets* calculados por velocidade e direção de corrente

Velocidade da Corrente	Direção da Corrente	*Offset* no sentido X global	*Offset* no sentido Y global
0.75	N	-7.71	12.70
1.05	N	-6.84	24.96
1.35	N	-5.84	40.84
0.75	NE	1.09	9.52
1.05	NE	8.88	18.07
1.35	NE	17.19	28.40
0.75	E	4.54	0.11
1.05	E	16.31	-0.45
1.35	E	30.53	-2.35
0.75	SE	0.97	-9.40
1.05	SE	10.45	-17.74
1.35	SE	23.26	-27.75
0.75	S	-8.83	-12.74
1.05	S	-8.98	-23.33
1.35	S	-9.13	-35.30
0.75	SW	-18.1939	-9.9044
1.05	SW	-27.6275	-18.6271
1.35	SW	-40.0790	-29.1043
0.75	W	-20.3927	-1.3210
1.05	W	-31.0142	-3.1451
1.35	W	-44.1781	-6.4101
0.75	NW	-16.2297	8.3676
1.05	NW	-22.4029	15.9421
1.35	NW	-29.1727	25.3947

Tabela 5.10: Movimentos de baixa freqüência gerados pela corrente

Velocidade superficial de corrente [m/s]	Direção [ponto cardinal]	Movimento X			Movimento Y			
		Média [m]	Amplitude [m]	Período [seg]	Média [m]	Amplitude [m]	Período [seg]	Fase [°]
0.75	N	-7.12	3.44	819.19	9.49	0.46	819.19	331.44
1.05	N	-6.57	10.04	585.02	15.90	1.38	585.02	318.46
1.35	N	-5.06	28.15	455.30	23.15	2.82	455.30	271.08
0.75	NE	-2.24	2.37	819.19	7.76	2.28	819.19	180.00
1.05	NE	2.55	7.78	585.02	12.25	8.20	585.02	185.86
1.35	NE	8.79	20.56	455.30	17.97	20.63	455.30	176.95
0.75	E	-0.65	0.66	819.19	2.79	3.68	819.19	33.83
1.05	E	6.34	0.97	585.02	2.63	12.30	585.02	237.53
1.35	E	14.44	3.06	455.30	2.82	29.04	455.30	282.50
0.75	SE	-2.98	2.41	819.19	-2.33	2.59	819.19	0.00
1.05	SE	2.20	9.41	585.02	-6.68	8.31	585.02	14.47
1.35	SE	8.01	20.55	455.30	-11.84	21.03	455.30	11.07
0.75	S	-7.83	3.45	819.19	-4.62	0.16	819.19	325.80
1.05	S	-7.72	13.09	585.02	-10.87	0.51	585.02	305.80
1.35	S	-8.28	26.32	455.30	-18.89	1.21	455.30	279.90
0.75	SW	-12.63	2.14	819.19	-2.88	2.22	819.19	180.00
1.05	SW	-17.26	6.56	585.02	-7.59	6.20	585.02	189.87
1.35	SW	-21.67	19.33	455.30	-13.78	19.74	455.30	349.20
0.75	W	-14.34	0.37	819.19	2.02	3.55	819.19	20.75
1.05	W	-20.46	2.07	585.02	1.44	11.22	585.02	45.54
1.35	W	-27.81	6.45	455.30	0.28	26.11	455.30	73.59
0.75	NW	-12.01	2.43	819.19	7.19	2.56	819.19	0.00
1.05	NW	-15.78	8.96	585.02	11.45	9.91	585.02	357.83
1.35	NW	-20.98	18.01	455.30	16.22	19.21	455.30	171.96

5.6 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises à fadiga realizadas para os dois *SCRs* n° 17 e n° 36 sob as condições ambientais detalhadas nos itens anteriores. Serão analisados e comentados os resultados obtidos e apresentadas as conclusões pertinentes.

A fim de facilitar o entendimento dos resultados foram adotadas diferentes nomenclatura (descritas mais adiante) para evitar confusões entre os distintos modelos utilizados. Cabe aqui ressaltar mais uma vez, que o objetivo principal desta dissertação é avaliar o uso prático nos projetos de *risers* da metodologia apresentada na DNV-RP-F204, que propõe um método simplificado para a combinação de danos gerados por séries temporais de tensões de frenquencia na faixa da freqüência das ondas e baixa freqüência.

A Figura 5.7 apresenta o esquema dos modelos utilizados, que são detalhados mais adiante.

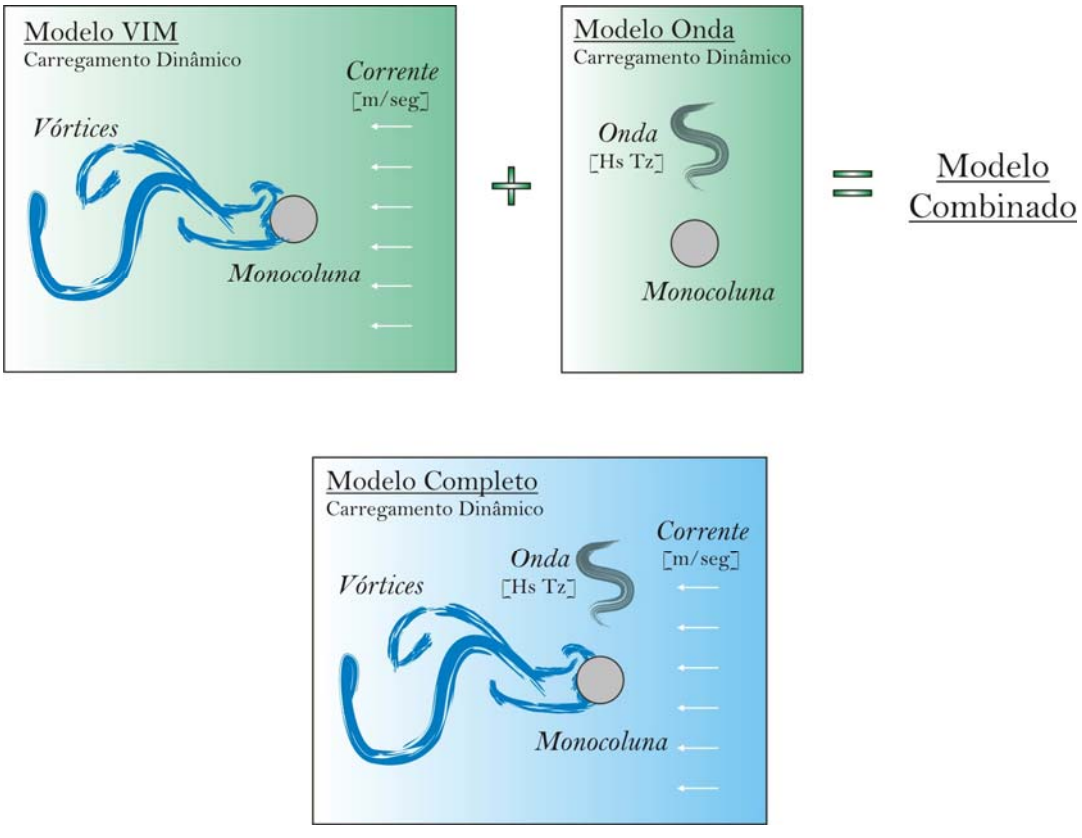

Figura 5.7: Tipos de Modelos Utilizados

As nomenclaturas utilizadas para apresentação dos resultados são:

Modelo *VIM*: o carregamento dinâmico devido ao efeito da corrente na estrutura, i.e., movimento de baixa freqüência. Os resultados de fadiga obtidos dos diferentes casos deste tipo de carregamento constituem a parcela do espectro de tensões de baixa freqüência.

Modelo *ONDA*: o carregamento dinâmico neste modelo corresponde ao efeito da onda na estrutura, i.e., movimento de alta freqüência. Os resultados de fadiga obtidos dos diferentes casos deste tipo de carregamento formam a parcela do espectro de tensões de alta freqüência.

Modelo *Combinado*: modelo para análise de fadiga combinando, através da formulação da DNV, os resultados de dano do Modelo *VIM* e Modelo *Onda*. Cabe ressaltar que a combina

Modelo *Completo*: este modelo engloba todas as combinações possíveis de estados de mar e correntes, sendo o espectro de tensões resultante um espectro do tipo bi-modal que apresenta ambas as parcelas de alta freqüência e baixa freqüência.

Os cálculos das séries de tensões (e dano a fadiga) são feitos pelo POSFAL (2009) para oito pontos em cada seção transversal do riser, conforme a Figura 5.8. São avaliadas seções ao longo de todo riser. Na sua vez, a combinação dos danos para obter o dano à fadiga do modelo combinado será feita utilizando a ferramenta computacional denominada COMBFAD (2009). Neste trabalho, os resultados serão focados nas regiões de maior interesse para este tipo de análise, i.e., a região do TDP (*Touch Down Point*) e a região do topo.

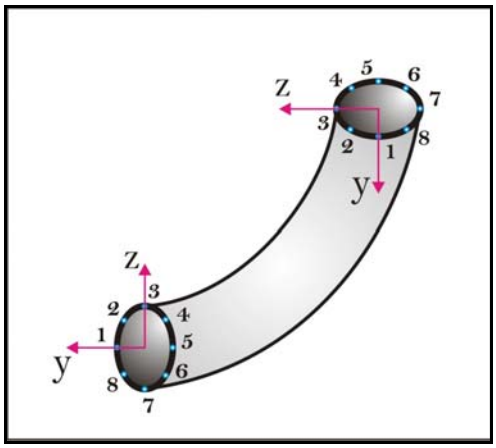

Figura 5.8: Pontos da seção transversal dos risers analisados

Os valores comentados a seguir são feitos com base no Modelo *Completo* que, como mencionado anteriormente, se constitui na referência para avaliar o nível de precisão obtido com o Modelo *Combinado*. Além disso, as figuras apresentam esquematicamente os danos obtidos para esses dois modelos, que serão depois analisados detalhadamente.

A Figura 5.9, apresenta os resultados obtidos para o SCR n° 17. Observa-se nesta figura que a vida útil na região do topo é de 1512 anos, na região intermediaria do *riser* a vida útil é maior que 300.000 anos e evidencia a pouca relevância do dano nesta região que não justifica um estudo pormenorizado do trecho. Entretanto, no TDP do riser foi registrada uma vida útil de 817 anos. Esse valor corresponde à menor vida útil ao longo de todo o riser. Entre o TDP e a ancora é registrado um dano muito pequeno já que a influencia dos movimentos impostos na plataforma é quase nula.

Como já mencionado, o topo e o TDP são as regiões mais críticas deste *riser* para a análise do dano à fadiga, sendo o TDP a região com menor vida à fadiga.

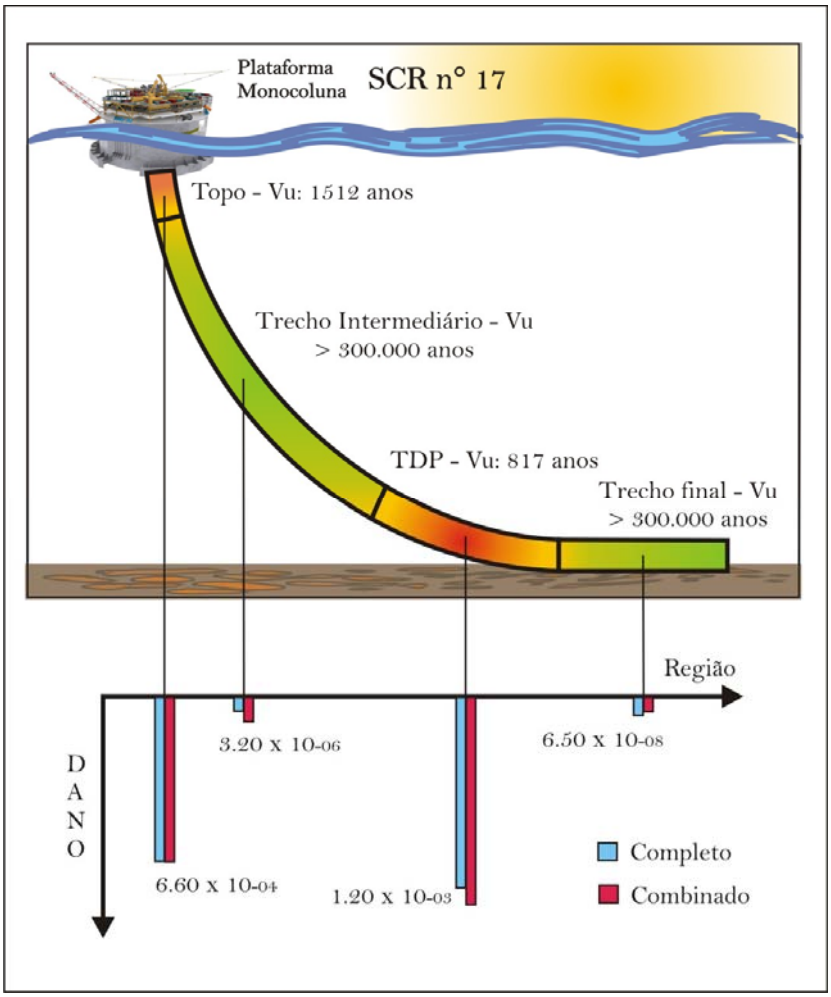

Figura 5.9: Vida Útil e Dano nos diferentes trechos do SCR n° 17

Os resultados para o SCR n° 36 encontram-se apresentados na Figura 5.10. Da mesma forma que no outro riser analisado, a menor vida útil foi registrada na região do TDP, sendo igual a 928 anos.

No topo, a vida útil calculada é de 1931 anos, cerca de 27% maior que a vida útil observado no riser 17.

Tanto a região intermediária, quanto a região entre o TDP e a âncora registraram danos muito pequenos (mais de 200.000 anos de vida) evidenciando novamente a pouca relevância destes trechos para o estudo das linhas à fadiga.

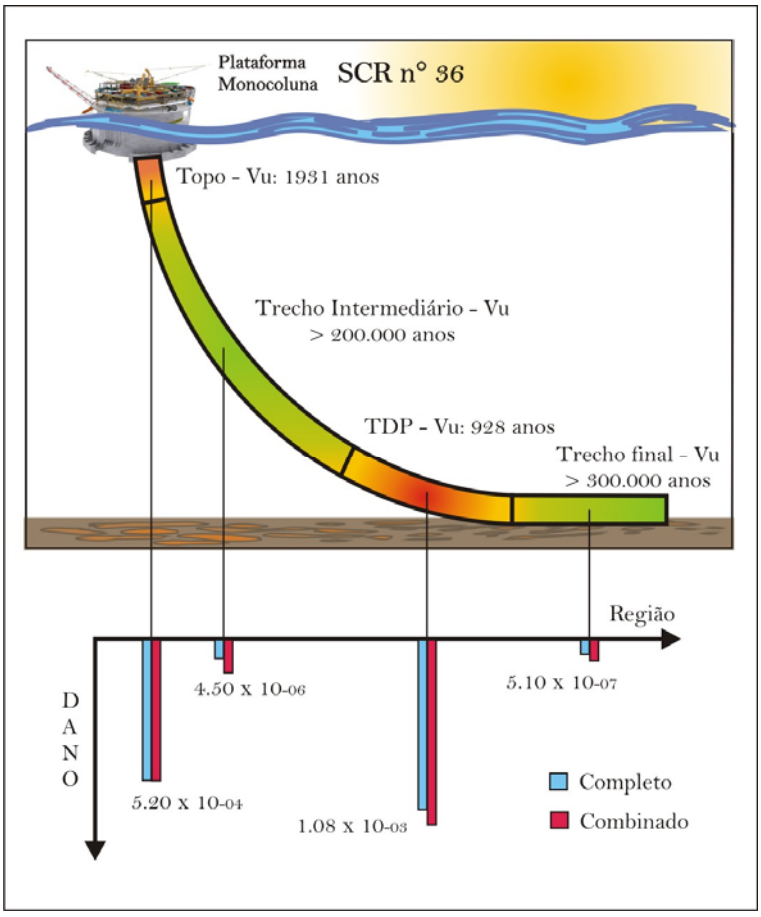

Figura 5.10: Vida Útil e Dano nos diferentes trechos do SCR n° 36

Analisando-se os resultados dos *risers*, pode-se observar que ambos apresentaram valores para o dano na mesma ordem de grandeza. Porém, no topo, os danos mais críticos não acontecem no mesmo ponto da seção transversal dos *risers* (ver Figura 5.11). Isto ocorre porque, tendo as linhas azimutes diferentes, o sistema local de eixos localiza-se em posições diferentes em relação ao sistema global de referência.

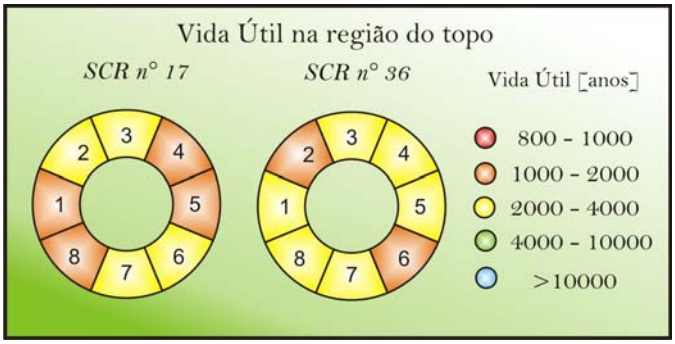

Figura 5.11: Danos no Topo dos SCRs analisados

Entretanto, o maior dano no TDP ocorre no mesmo ponto da seção transversal em ambas as linhas (ver Figura 5.12), já que a curvatura imposta nos *risers* é determinada pelo contato com o solo gerando assim em ambos os *risers* as maiores tensões devido á maior curvatura nos mesmos pontos.

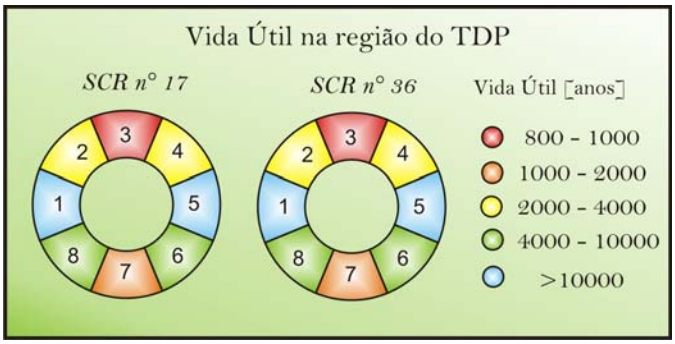

Figura 5.12: Dano no TDP dos SCRs analisados

As Figura 5.9 e Figura 5.10 também incluem os resultados de dano à fadiga obtidos pelo método combinado. Entretanto, para uma melhor compreensão dos resultados, eles serão melhor detalhados a seguir. Os resultados serão comentados com base no fator F, calculado da seguinte forma:

$$F = \frac{D_{Combinado}}{D_{Completo}} \tag{5.3}$$

Observa-se que um valor próximo a 1 significa que o resultado obtido pelo Modelo *Combinado* é muito próximo ao resultado do Modelo *Completo*. Quando este valor é maior que 1 o resultado do Modelo *Combinado* é conservador, e não conservador no caso contrario.

As Figura 5.13 e Figura 5.14 apresentam um resumo da comparação de resultados para a região do topo dos dois *risers* investigados, respectivamente, SCR n° 17 e SCR n° 36. As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam os resultados para a região do TDP.

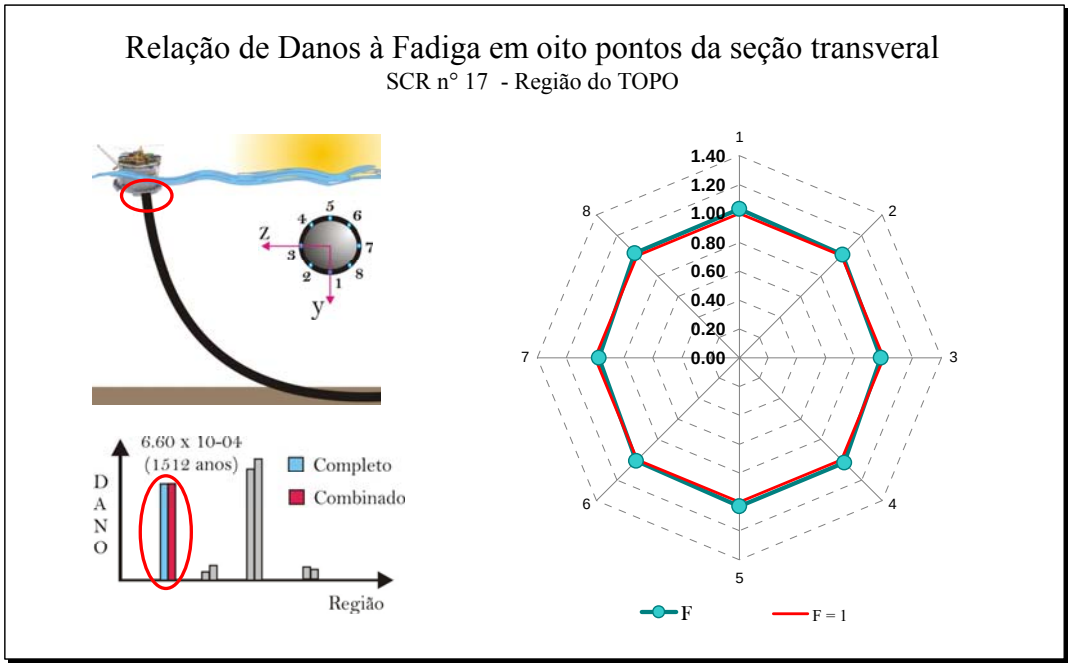

Figura 5.13: Relação de danos na seção transversal do Topo. SCR n° 17

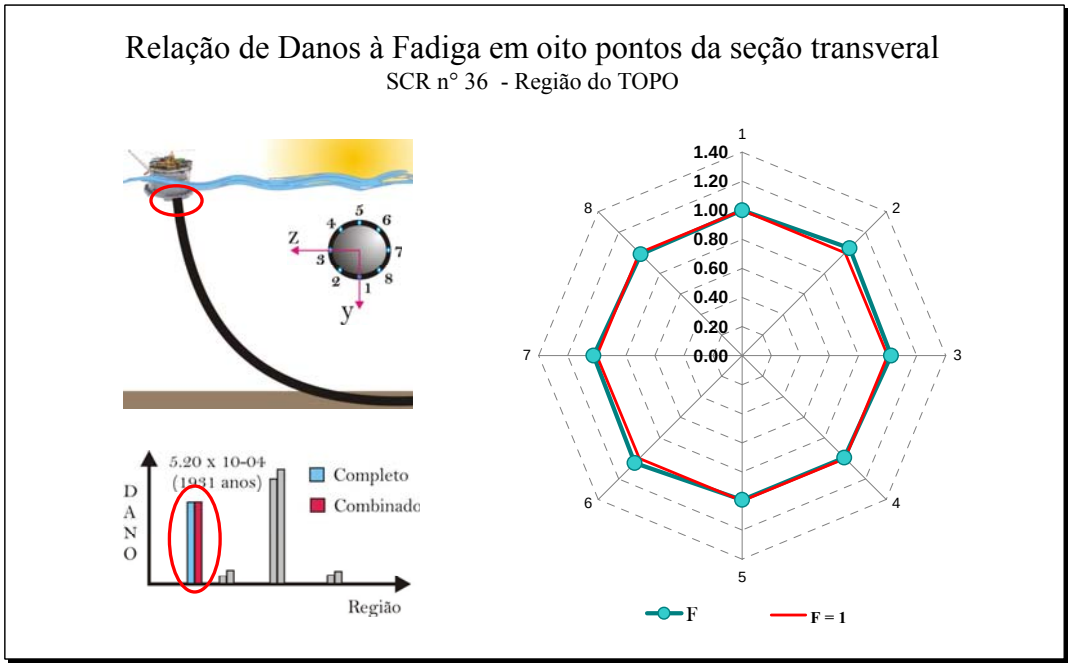

Figura 5.14: Relação de danos na seção transversal do Topo. SCR n° 36

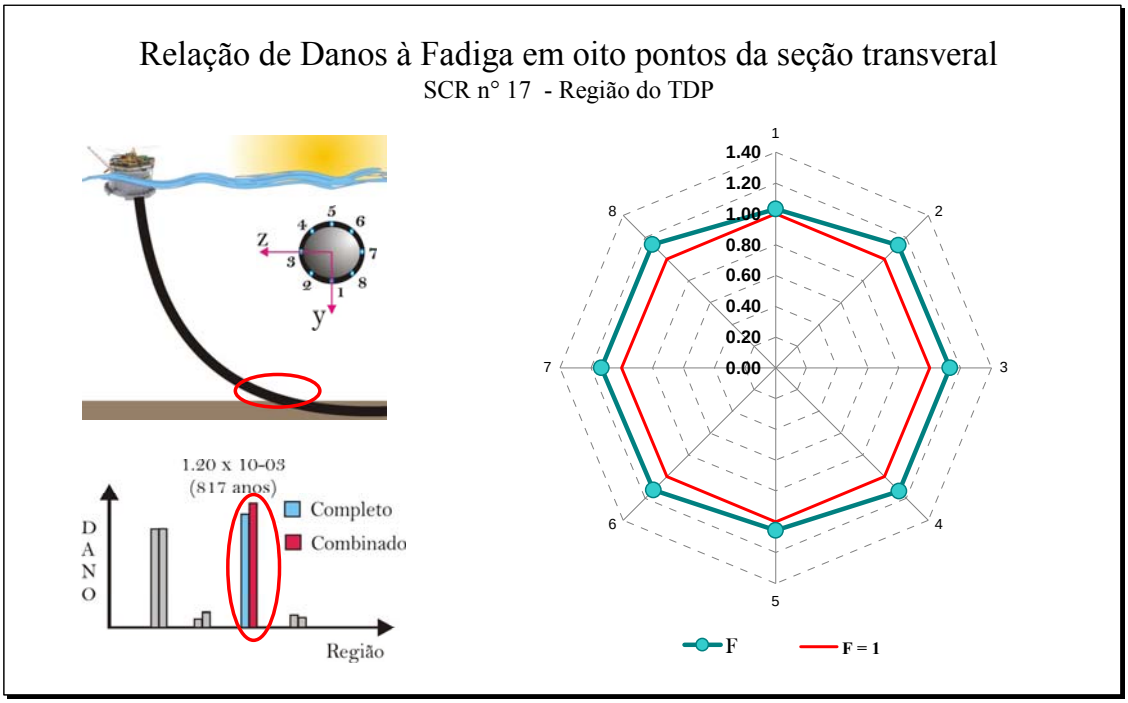

Figura 5.15: Relação de danos na seção transversal do TDP. SCR n° 17

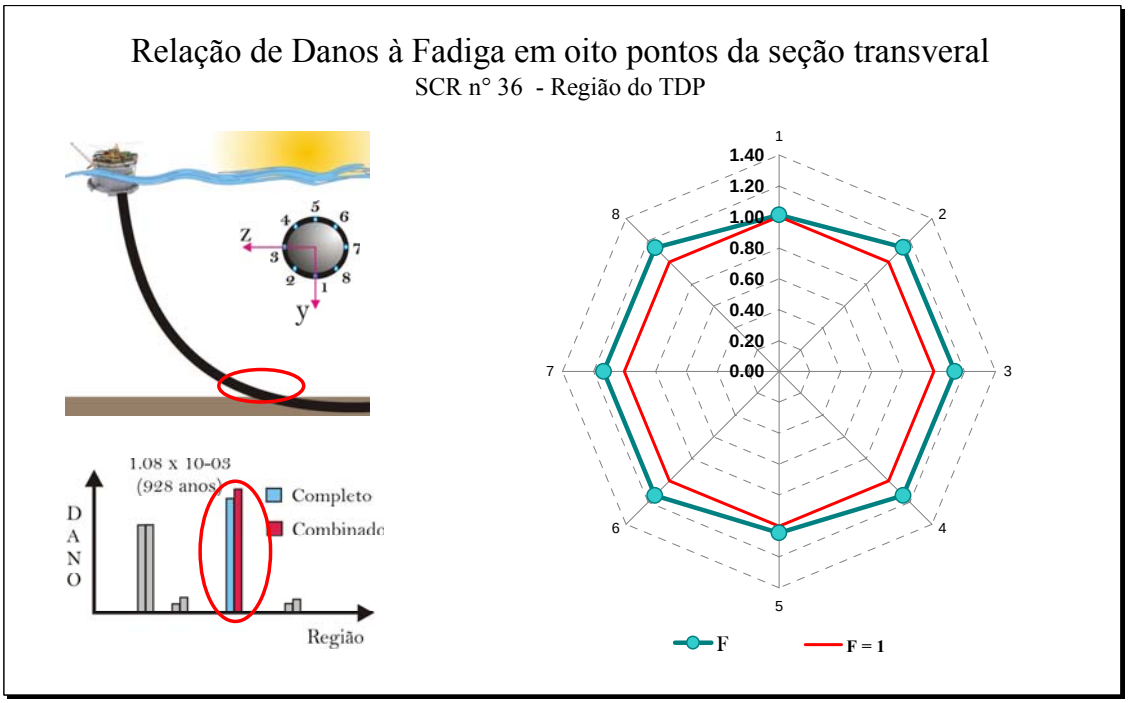

Figura 5.16: Relação de danos na seção transversal do TDP. SCR n° 36

Como se observa nas Figura 5.13 e Figura 5.14, a região do topo dos *risers* apresenta fatores próximos a 1, o que mostra o excelente desempenho da expressão avaliada. Esses fatores variam entre 0.97 e 1.05 podendo-se assim classificar os resultados do Modelo *Combinado* como "quase idênticos" aos do Modelo *Completo*.

Pelas Figura 5.15 e Figura 5.16 observa-se que na região do TDP o Modelo *Combinado* apresenta resultados um pouco maiores que o Modelo *Completo*, i.e., um conservadorismo de 10% a 20%.

Em resumo, pode-se observar que nas regiões críticas dos *risers*, onde foram encontrados os maiores danos, i.e., o topo e o TDP, o Modelo *Combinado* apresentou resultados satisfatórios sendo confiável como metodologia alternativa para o cálculo do dano à fadiga e requer um custo computacional bem menor.

5.7 Resultados Adicionais

Outro ponto importante a salientar é a influência dos movimentos de baixa freqüência e alta freqüência na vida à fadiga nas diferentes regiões dos *risers*, i.e., qual desses movimentos produz maior dano e se existe uma importância relativa apreciável.

Com esta finalidade, as Figuras 5.17 e 5.18 apresentam, na região do TDP, a vida útil obtida para o Modelo *VIM* e para o Modelo *Onda*. Observa-se que, nesta região, a vida útil calculada no Modelo *Onda* é de 800 anos aproximadamente, consideravelmente menor que a vida útil calculada considerando só o efeito do VIM (mais de 10000 anos).

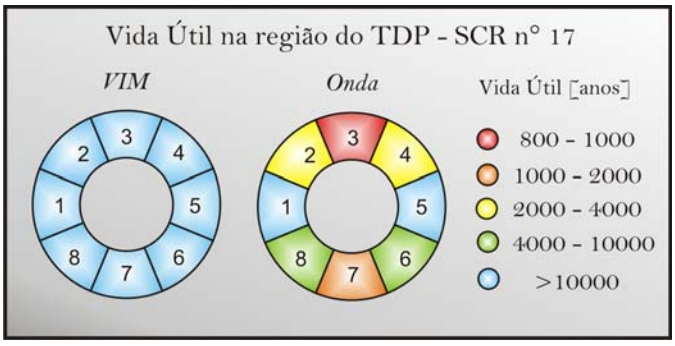

Figura 5.17: Vida Útil do SCR n° 17 na região do TDP. Modelo VIM e Modelo Onda

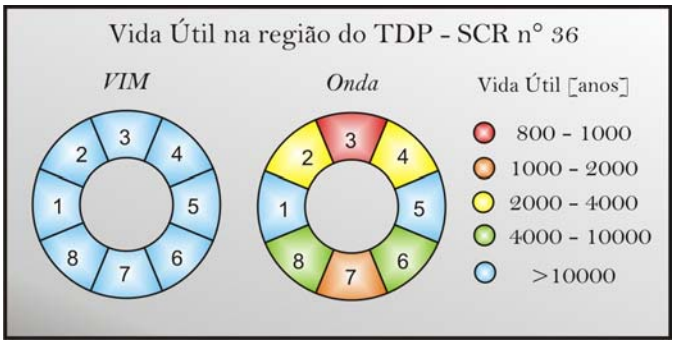

Figura 5.18: Vida Útil do SCR n° 36 na região do TDP. Modelo VIM e Modelo Onda

Assim, observa-se que as ondas são determinantes para o cálculo da vida útil do *riser* nesta região. Isto se deve à importância do movimento do *heave* que levanta e pousa o *riser* no solo marinho em forma cíclica danificando em grande medida os pontos de maior curvatura da região. Embora os movimentos do VIM sejam grandes e significativos na superfície, eles representam uma porcentagem pequena da lâmina d'água, sendo assim pouco relevantes a tão grandes profundidades.

As Figura 5.19 e Figura 5.20 ilustram os resultados do Modelo *Onda* e Modelo *VIM* para o topo dos *risers*. Para a região do topo, nos dois *SCRs*, a vida útil está perto de 8000 anos quando considera-se só a onda agindo na estrutura. E no caso em que considera-se só o efeito do VIM, a vida útil é de 2000 anos aproximadamente.

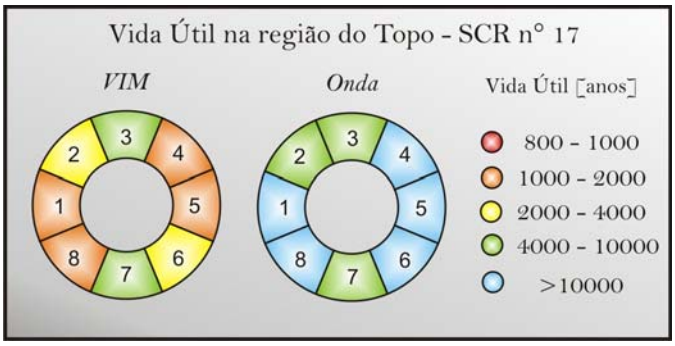

Figura 5.19: Vida Útil do SCR n° 17 na região do Topo. Modelo VIM e Modelo Onda

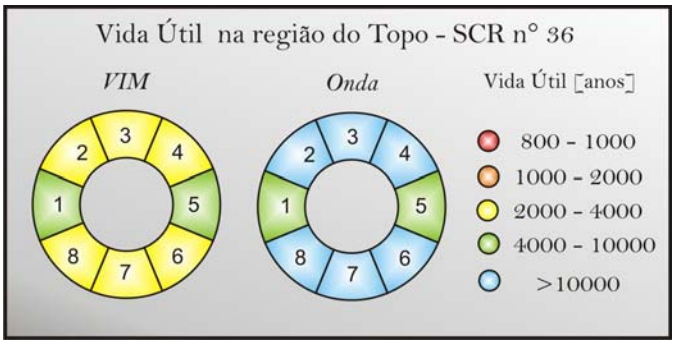

Figura 5.20: Vida Útil do SCR n° 36 na região do Topo. Modelo VIM e Modelo Onda

Nesta região o dano final constitui-se de contribuição de ambos os efeitos. Pode-se ver que, contrariamente ao ocorrido no TDP, na região do topo o efeito do VIM tem maior importância e não pode ser desconsiderado para a análise do dano à fadiga. Esse dano elevado obtido no topo deve-se à rigidez da união entre a linha e a plataforma monocoluna. Desta forma, o movimento cíclico do VIM gera tensões elevadas que não seriam observadas no caso de uma conexão rotulada no topo.

6 Considerações finais

6.1 Conclusões

O objetivo desta dissertação foi a avaliação de um modelo simplificado (denominado ao longo do texto como Modelo *Combinado*), baseado numa metodologia de combinação de danos proposta pela DNV-RP-F204, para a avaliação de fadiga de SCRs considerando o efeito de movimentos reduzidos por vórtices (VIM) e movimentos de primeira ordem do flutuante devido as ondas. A combinação destes dois efeitos gera séries temporais de tensões cujo espectro apresenta duas faixas distintas de freqüências, i.e., um espectro bi-modal, o que permite o uso da metodologia proposta na DNV-RP-F204.

Além da metodologia proposta pela DNV, o Modelo *Combinado* assume simplificadamente que a série temporal de tensões pode ser obtida pela superposição dos efeitos calculados separadamente. Isto permite uma redução simplificativa no número de análises aleatórias no domínio do tempo para avaliação dos danos à fadiga.

No presente trabalho, foram analisados dos SCRs conectados a uma plataforma do tipo monocoluna instalados numa lâmina d'água de 1700 m.

Na região do topo, observa-se nos casos analisados que o Modelo *Combinado* produz resultados quase idênticos aos resultados obtidos com uma formulação completa, i.e., sem simplificações. No primeiro *riser*, o modelo simplificado forneceu uma vida útil de 1466 anos e o Modelo *Completo* 1512 anos. No segundo caso esta relação foi de 1851 anos para 1931 anos.

Na região do TDP dos *risers*, o Modelo *Combinado* mostrou-se um pouco mais conservador, na ordem de 10% a 20%. No primeiro *riser*, a vida útil nesta região foi avaliada em 722 anos pelo método combinado, enquanto que o Modelo Completo resultou em 917 anos. No segundo caso esta relação foi de 817 anos para 928 anos.

Pelos resultados obtidos, observa-se que o método combinado, embora envolva simplificações, pode ser utilizado na avaliação preliminar de fadiga. A redução no número de análises estruturais é, no mínimo, da ordem de 90%.

Adicionalmente, foi possível também observar que o dano no topo dos SCRs é fortemente influenciado pela ação da corrente, sendo a correta avaliação do VIM determinante para uma determinação adequada da vida útil do *riser* nesta região. Entretanto, na região do TDP, a onda tem uma influência muito maior, sendo o dano provocado por esta mais de 10 vezes maior que o dano provocado pelo VIM. Desta forma, pode-se concluir que os movimentos com freqüência na faixa das freqüências das ondas têm maior influência no TDP dos *risers*. Isto se deve ao movimento do *heave* que levanta e pousa a linha no solo marinho em forma cíclica, gerando ciclos de tensões importantes nos pontos de maior curvatura da região. Embora os movimentos do VIM sejam grandes e significativos na superfície, a tão grandes profundidades eles não são significativos comparados ao movimento vertical imposto pela onda. Em contraposição, devido à rigidez da união do topo dos SCRs com a plataforma, o movimento cíclico do VIM gera tensões elevadas devido aos deslocamentos superficiais, sendo o dano gerado pela onda menor que aquele gerado por este movimento de baixa freqüência e grandes amplitudes.

A principal vantagem na utilização do Modelo *Combinado* reside na significativa redução da quantidade de casos analisados, o que se traduz num ganho considerável de tempo, tanto na execução das análises quanto no armazenamento e na compilação de resultados. No cálculo do dano a fadiga dos *risers* analisados neste trabalho através do Modelo *Combinado*, foram executados somente 4.5% do total de análises consideradas no cálculo tradicional do dano à fadiga sem perda de qualidade ou precisão, resultando assim em uma ótima opção para o cálculo rápido e simplificado do dano à fadiga de *SCRs* submetidos a movimentos baixa e alta freqüência.

.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros.

Uma possível linha de pesquisa para futuros trabalhos consiste em analisar, nos *risers* estudados, a não utilização de *strakes* na região intermediaria do *riser*, para analisar o aumento ou não dos danos registrados, a fim de poder avaliar nessa região o comportamento do modelo combinado.

Como foi visto, a influência do VIM no dano calculado no TOPO foi importante devido à união rígida da *stress joint* considerada. Outros tipos de uniões (menos rígidas) podem ser avaliadas, analisando a variação do dano e a importância do efeito VIM.

Nesta dissertação, foi analisada somente uma configuração de *riser*, i.e., SCR. Resultaria de interessante avaliar diferentes configurações de *risers*, por exemplo: *Lazy Wave Riser* (SLWR).

É possível também a combinação de efeitos de VIM com movimentos de baixa e alta freqüência gerados pelas ondas. Nesta dissertação, não foram considerados efeitos de segunda ordem gerados pela ação da onda sobre a plataforma. Porém, estes movimentos podem aumentar o dano em *risers*, sendo necessária a avaliação dos mesmos para determinar a importância da sua consideração na análise de fadiga.

Considerar estes efeitos de segunda ordem exige um estudo diferente da formulação apresentada, que foi utilizada para combinar somente dois tipos de movimentos, i.e., movimentos de baixa freqüência gerados pelo VIM e movimentos na freqüência das ondas gerados pela onda. Ao considerar efeitos de segunda ordem da onda, devem ser analisados mais de dois tipos de movimentos, aumentando a complexidade da combinação de danos.

É de interesse a investigação da possibilidade de fazer análise de tensões no domínio da freqüência (por exemplo, utilizando o programa ALFREQ, de propriedade da PETROBRAS). A utilização deste tipo de análise reduz significativamente o tempo das análises, sendo uma boa opção para determinar o dano no Modelo Completo, que requer rodar as análises correspondentes a todas as combinações de ondas e correntes consideradas.

Finalmente, podem ser estudadas outras fórmulas de combinação de dano, e.g., a apresentada por JIAO e MOAN (1990). Estes autores propõem uma forma diferente de combinação de danos para espectros de tensões bi-modais.

Referências bibliográficas

ANFLEX, 2009, *Programa para Análise Não Linear de Risers e Linhas de Ancoragem. Manual de Entrada de Dados*. Versão 7.0. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CENPES/PETROBRAS.

ANP, 2009, Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

API RP 1111, 1999, Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines - Limit State Design, American Petroleum Institute.

BAI, I., TANG, A, O'SULLIVAN, E., UPPU, K.C., RAMAKRISHNAN, S., 2004, "Steel Catenary Riser Fatigue Due to Vortex Induced Spar Motions", OTC16629, Houston, USA.

BAZÁN, F. A. V., SIQUEIRA, M. Q., LIMA, E. C. P., SIQUEIRA, E. F. N., 2008, "Metodologia de Análise de Stress Joint para Risers de Aço". In: Proceedings of the XXIX Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), PAP0115, Maceió, AL, Brazil, 4-7 November.

BLEVINS, R. D., 2001, Flow-Induced Vibration, 2 ed , , Malabar, FL. Kreiger Publishing

COMBFAD, 2009, Manual do Usuário, PETROBRAS/CENPES – COPPE/UFRJ /LACEO.

DNV-OS-F201, 2001, *Dynamic Risers*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway.

DNV-RP-F204, 2005, *Risers Fatigue*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway.

DNV-RP-F205, 2004, *Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway.

DNV-RP-C203, 2008, *Fatigue Design of Offshore Steel Structures*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway.

DNV-RP-C205, 2005, *Environmental Conditions and Environmental Loads*, Det Norske Veritas, Hovik, Norway.

DYNASIM, 2008, *Programa para Análise de Offset*. Versão 4.0. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CENPES/PETROBRAS.

HALKYARD, J., SIRNIVAS, S., HOLMES, S., et al., 2005 "Benchmarking of Truss Spar Vortex Induced Motions Derived From CFD With Experiments", International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2005-67252, Halkidiki, Grécia.

HUANG, K., CHEN, X., 2003, "The Impact of Vortex-Induced Motions on Mooring System Design for Spar-based Installations", OTC15245, Houston, USA.

IRANI, M. B. AND FINN, L. D., 2004, "Model Testing for Vortex Induced Motions of Spar Platforms", International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2004-51315, Vancouver, Canadá.

JAAP DE WILDE, 2007, "Exploratory free standing riser VIM model test", Maritime Research Institute Netherlands, Haagsteeg 2 / P.O. Box 28, Wageningen, The Netherlands.

JIAO, G., MOAN, T., 1990. *Probabilistic analysis of fatigue due to Gaussian load processes*. Probabilistic Engineering Mechanics, Volume 5, Issue2, pp 76.

KOKKINIS, T., SANDSTRÖM, R.E., JONES, H.T., THOMPSON, H.M., GREINER, W.L., 2004, "Development of a Stepped Line Tensioning

Solution for Mitigation VIM Effects in Loop/Eddy Currents for the Genesis Spar, OMAE2004-51546, Vancouver, Canada.

LACERDA, T.A.G., GARAT, P.C.L., SAGRILO, L.V.S., SIQUEIRA, M.Q., SIQUEIRA, E.F.N., 2009, "Fatigue Damage Evalutation for Steel Risers Connected to a Monocolunm Platform". Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Búzios, Brasil.

MUNSON, B.R., YOUNG, D.F., OKIISHI, T.H., 2004, Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. 1ed, São Paulo, Blucher.

NEWLAND, D. E., 1986, An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis. 2ed, United States of America, Longman.

OLAGNON, M, ZAKOUA, G, 2008, "Rainflow fatigue analysis for loads with multimodal power spectral densities", *Marine Structures*, v.21, n. 2-3 (abril, junho), pp. 160-176.

PAPALEO, A., 2009, Metodologia para definição de casos de carregamentos ambientais equivalentes para o projeto de risers em catenária, Rio de Janeiro, Brasil.

POSFAL, 2009, *Programa para Análise Aleatória de Fadiga. Manual de Entrada de Dados*. Versão 15. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CENPES/PETROBRAS.

RIBEIRO, E. J. B., 1999, *Análise de Risers de Plataformas Marítimas Tipo Spar-Buoy*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RIBEIRO, E.O., LIMA, J.A.M., NUNES, LMP, GUERRA, L.A., 2005, "Distribuição Conjunta de Alturas Significativas e Períodos de Pico de Ondas na Bacia de Campos". IBP2005, Rio de Janeiro, Brasil.

RIJKEN, O., LEVERETTE, S., DAVIES, K., 2004, "Vortex Induced Motions of Semi Submersible with Four Square Columns, DOT2004, 12-1.

SAGRILO, L.V.S., SIQUEIRA, M.Q., LIMA E.C.P., et al, 2009. Vim and wave-frequency fatigue damage analysis for SCRs connected to monocolumn platforms - PETROBRAS/CENPES – COPPE/UFRJ.

SANTOS, A.L.F, 1997, *Âncoras de Sucção*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SMITH, D. W., THOMPSON, H. M., KOKKINIS, T., GREINER, W. L., 2004. "Hindcasting VIM-Induced Mooring Fatigue for the Genesis Spar", OMAE2004-51547. Vancouver, Canada.

SOUSA, F.J.M., 2005, Estatística de longo prazo aplicada à análise de risers metálicos, Rio de Janeiro, Brazil

TN PETROLEO,2004 , Editorial Benicio Biz, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, n°36.

VIME, 2008, Manual do Usuário, PETROBRAS/CENPES – COPPE/UFRJ /LACEO.

WAALS, O. J., PHADKE, A. C., BULTEMA, S., 2007, "Flow Induced Motions of Multi Column Floaters", OMAE2007-29539, California, USA.

Apêndice A – Resultados complementares aos apresentados no Item 5.6.

Resultados Obtidos nos diferentes elementos finitos que conformam o SCR n°17 para o Modelo Completo (2304 estados de mar).

Joint	Ponto da Seção Transversal								MAXIMO	Vida Util
	1	2	3	4	5	6	7	8		
topo	6.6E-04	4.5E-04	4.4E-04	6.4E-04	6.6E-04	4.4E-04	4.2E-04	6.3E-04	6.6E-04	1512
L17B0090130	6.6E-04	4.5E-04	4.3E-04	6.4E-04	6.5E-04	4.3E-04	4.2E-04	6.3E-04	6.6E-04	1526
L17B0090129	6.5E-04	4.4E-04	4.3E-04	6.3E-04	6.5E-04	4.3E-04	4.1E-04	6.2E-04	6.5E-04	1540
L17B0090128	6.4E-04	4.4E-04	4.3E-04	6.3E-04	6.4E-04	4.3E-04	4.1E-04	6.2E-04	6.4E-04	1554
L17B0090127	6.4E-04	4.4E-04	4.2E-04	6.2E-04	6.4E-04	4.2E-04	4.1E-04	6.1E-04	6.4E-04	1566
L17B0090126	6.3E-04	4.3E-04	4.2E-04	6.2E-04	6.3E-04	4.2E-04	4.0E-04	6.1E-04	6.3E-04	1581
L17B0090125	6.0E-04	4.0E-04	3.8E-04	5.8E-04	6.0E-04	4.1E-04	4.0E-04	5.9E-04	6.0E-04	1657
L17B_seg009	6.6E-05	5.9E-05	6.9E-05	7.6E-05	5.8E-05	3.4E-05	3.7E-05	6.1E-05	7.6E-05	13188
L17B0080130	5.8E-05	5.3E-05	6.2E-05	6.7E-05	5.1E-05	3.0E-05	3.2E-05	5.3E-05	6.7E-05	14865
L17B0080129	4.5E-05	2.7E-05	2.9E-05	4.7E-05	5.2E-05	4.8E-05	5.6E-05	6.0E-05	6.0E-05	16717
L17B0040186	3.2E-06	3.2E-06	3.1E-06	3.0E-06	2.9E-06	2.9E-06	3.0E-06	3.1E-06	3.2E-06	310167
L17B0040185	2.9E-06	2.9E-06	3.0E-06	3.1E-06	3.2E-06	3.2E-06	3.1E-06	3.0E-06	3.2E-06	309985
L17B0040181	3.1E-06	3.2E-06	3.1E-06	2.9E-06	2.9E-06	2.9E-06	2.9E-06	3.0E-06	3.2E-06	316102
L17B0040180	2.9E-06	2.9E-06	2.9E-06	3.0E-06	3.1E-06	3.2E-06	3.1E-06	2.9E-06	3.2E-06	315957
L17B0020676	2.1E-06	3.6E-05	6.5E-05	9.9E-06	2.1E-06	3.8E-05	7.5E-05	2.1E-05	7.5E-05	13395
L17B0020675	2.1E-06	4.0E-05	7.8E-05	2.1E-05	2.1E-06	3.9E-05	7.0E-05	1.0E-05	7.8E-05	12876
L17B0020671	2.2E-06	4.5E-05	8.2E-05	1.1E-05	2.0E-06	4.4E-05	8.6E-05	2.2E-05	8.6E-05	11619
L17B0020670	2.0E-06	4.5E-05	8.7E-05	2.2E-05	2.2E-06	4.6E-05	8.3E-05	1.2E-05	8.7E-05	11534
L17B0020666	2.2E-06	4.9E-05	8.4E-05	1.2E-05	2.0E-06	4.6E-05	8.7E-05	2.2E-05	8.7E-05	11473
L17B0020665	2.0E-06	4.6E-05	8.7E-05	2.3E-05	2.2E-06	4.9E-05	8.3E-05	1.2E-05	8.7E-05	11511
L17B0020661	2.2E-06	4.8E-05	7.9E-05	1.3E-05	1.9E-06	4.6E-05	8.5E-05	2.3E-05	8.5E-05	11728
L17B0020660	1.9E-06	4.6E-05	8.5E-05	2.3E-05	2.2E-06	4.8E-05	7.8E-05	1.3E-05	8.5E-05	11784
L17B0020656	2.0E-06	4.6E-05	7.5E-05	1.3E-05	1.9E-06	4.5E-05	8.3E-05	2.3E-05	8.3E-05	12005
L17B0020655	1.9E-06	4.5E-05	8.3E-05	2.3E-05	2.0E-06	4.6E-05	7.4E-05	1.3E-05	8.3E-05	12070
L17B0020651	1.9E-06	4.3E-05	7.2E-05	1.4E-05	1.8E-06	4.4E-05	8.1E-05	2.3E-05	8.1E-05	12307
L17B0020650	1.8E-06	4.3E-05	8.1E-05	2.3E-05	1.9E-06	4.3E-05	7.1E-05	1.4E-05	8.1E-05	12368
L17B0020646	1.9E-06	4.0E-05	6.9E-05	1.5E-05	1.8E-06	4.1E-05	8.0E-05	2.3E-05	8.0E-05	12570
L17B0020645	1.8E-06	4.1E-05	7.9E-05	2.3E-05	1.9E-06	3.9E-05	6.9E-05	1.5E-05	7.9E-05	12592
L17B0020641	2.0E-06	3.6E-05	6.7E-05	1.6E-05	1.8E-06	3.8E-05	7.8E-05	2.4E-05	7.8E-05	12853
L17B0020640	1.8E-06	3.7E-05	7.7E-05	2.4E-05	2.0E-06	3.5E-05	6.7E-05	1.7E-05	7.7E-05	12974
L17B0020636	2.0E-06	3.2E-05	6.7E-05	1.8E-05	1.8E-06	3.4E-05	7.5E-05	2.4E-05	7.5E-05	13329
L17B0020635	1.8E-06	3.3E-05	7.4E-05	2.4E-05	2.0E-06	3.1E-05	6.7E-05	1.8E-05	7.4E-05	13456
L17B0020631	1.9E-06	2.8E-05	6.7E-05	1.9E-05	1.8E-06	2.9E-05	7.1E-05	2.3E-05	7.1E-05	14065
L17B0020630	1.8E-06	2.9E-05	7.0E-05	2.3E-05	1.9E-06	2.7E-05	6.6E-05	1.9E-05	7.0E-05	14192
L17B0020626	1.9E-06	2.5E-05	6.9E-05	2.0E-05	1.8E-06	2.5E-05	6.7E-05	2.2E-05	6.9E-05	14490
L17B0020625	1.7E-06	2.5E-05	6.6E-05	2.1E-05	1.9E-06	2.4E-05	7.0E-05	2.0E-05	7.0E-05	14216
L17B0020621	1.7E-06	2.3E-05	7.6E-05	2.1E-05	1.6E-06	2.2E-05	6.7E-05	2.0E-05	7.6E-05	13163
L17B0020620	1.6E-06	2.2E-05	6.7E-05	2.0E-05	1.6E-06	2.4E-05	7.8E-05	2.2E-05	7.8E-05	12809
L17B0020616	1.5E-06	2.5E-05	8.9E-05	2.4E-05	1.4E-06	2.1E-05	7.0E-05	2.0E-05	8.9E-05	11199
L17B0020615	1.4E-06	2.1E-05	7.2E-05	2.0E-05	1.5E-06	2.6E-05	9.2E-05	2.5E-05	9.2E-05	10815

Joint	Ponto da Seção Transversal								MAXIMO	Vida Util
	1	2	3	4	5	6	7	8		
L17B0020611	1.5E-06	2.9E-05	1.1E-04	2.8E-05	1.4E-06	2.1E-05	7.6E-05	2.0E-05	1.1E-04	9439
L17B0020610	1.3E-06	2.1E-05	7.6E-05	2.0E-05	1.5E-06	3.0E-05	1.1E-04	2.9E-05	1.1E-04	9255
L17B0020606	1.6E-06	3.5E-05	1.2E-04	3.2E-05	1.3E-06	2.2E-05	8.4E-05	2.0E-05	1.2E-04	8153
L17B0020605	1.3E-06	2.2E-05	8.7E-05	2.0E-05	1.6E-06	3.7E-05	1.3E-04	3.3E-05	1.3E-04	7834
L17B0020601	1.6E-06	5.2E-05	1.6E-04	4.0E-05	1.3E-06	2.8E-05	1.1E-04	2.1E-05	1.6E-04	6199
L17B0020600	1.3E-06	3.0E-05	1.2E-04	2.1E-05	1.6E-06	5.7E-05	1.7E-04	4.3E-05	1.7E-04	5782
L17B0020596	1.7E-06	7.8E-05	2.3E-04	5.8E-05	1.3E-06	3.7E-05	1.5E-04	2.6E-05	2.3E-04	4362
L17B0020595	1.3E-06	3.9E-05	1.6E-04	2.8E-05	1.7E-06	8.4E-05	2.5E-04	6.3E-05	2.5E-04	4076
L17B0020591	1.8E-06	1.1E-04	3.0E-04	8.7E-05	1.2E-06	4.6E-05	2.0E-04	3.8E-05	3.0E-04	3333
L17B0020590	1.2E-06	4.8E-05	2.2E-04	4.0E-05	1.8E-06	1.1E-04	3.2E-04	9.3E-05	3.2E-04	3143
L17B0020586	1.8E-06	1.3E-04	3.9E-04	1.3E-04	1.2E-06	5.7E-05	2.6E-04	5.0E-05	3.9E-04	2561
L17B0020585	1.2E-06	6.0E-05	2.7E-04	5.2E-05	1.8E-06	1.4E-04	4.1E-04	1.3E-04	4.1E-04	2434
L17B0020581	1.8E-06	1.7E-04	4.9E-04	1.6E-04	1.3E-06	6.9E-05	3.2E-04	5.8E-05	4.9E-04	2033
L17B0020580	1.4E-06	7.1E-05	3.2E-04	6.1E-05	1.8E-06	1.7E-04	5.1E-04	1.7E-04	5.1E-04	1958
L17B0020576	1.7E-06	2.0E-04	6.0E-04	1.9E-04	1.6E-06	7.6E-05	3.6E-04	6.8E-05	6.0E-04	1653
L17B0020575	1.6E-06	7.8E-05	3.6E-04	7.0E-05	1.8E-06	2.0E-04	6.2E-04	2.0E-04	6.2E-04	1605
L17B0020571	1.9E-06	2.3E-04	7.4E-04	2.2E-04	1.9E-06	8.8E-05	4.1E-04	7.8E-05	7.4E-04	1346
L17B0020570	2.0E-06	9.2E-05	4.4E-04	8.0E-05	1.9E-06	2.3E-04	7.7E-04	2.3E-04	7.7E-04	1303
L17B0020566	2.3E-06	2.5E-04	8.7E-04	2.6E-04	2.5E-06	1.0E-04	5.0E-04	9.4E-05	8.7E-04	1154
L17B0020565	2.6E-06	1.1E-04	5.1E-04	9.9E-05	2.4E-06	2.5E-04	8.9E-04	2.7E-04	8.9E-04	1120
L17B0020561	3.0E-06	2.7E-04	1.0E-03	2.9E-04	3.3E-06	1.2E-04	5.6E-04	1.1E-04	1.0E-03	978
L17B0020560	3.5E-06	1.2E-04	5.7E-04	1.2E-04	3.1E-06	2.7E-04	1.0E-03	3.0E-04	1.0E-03	954
L17B0020556	3.9E-06	2.9E-04	1.1E-03	3.2E-04	4.3E-06	1.3E-04	6.5E-04	1.3E-04	1.1E-03	871
L17B0020555	4.5E-06	1.3E-04	6.6E-04	1.3E-04	4.1E-06	2.9E-04	1.2E-03	3.2E-04	1.2E-03	854
L17B0020551	4.7E-06	3.0E-04	1.2E-03	3.3E-04	5.2E-06	1.4E-04	7.2E-04	1.4E-04	1.2E-03	817
L17B0020550	5.3E-06	1.4E-04	7.2E-04	1.5E-04	4.9E-06	3.0E-04	1.2E-03	3.3E-04	1.2E-03	819
L17B0020546	5.2E-06	2.7E-04	1.1E-03	2.8E-04	5.5E-06	1.2E-04	5.9E-04	1.2E-04	1.1E-03	949
L17B0020545	5.4E-06	1.1E-04	5.5E-04	1.1E-04	5.1E-06	2.5E-04	9.8E-04	2.7E-04	9.8E-04	1024
L17B0020541	3.8E-06	1.8E-04	6.5E-04	1.9E-04	4.2E-06	7.0E-05	3.3E-04	7.4E-05	6.5E-04	1542
L17B0020540	3.8E-06	5.9E-05	2.9E-04	6.4E-05	3.3E-06	1.6E-04	5.7E-04	1.7E-04	5.7E-04	1745
L17B0020536	2.2E-06	1.1E-04	3.9E-04	1.2E-04	2.6E-06	3.9E-05	1.7E-04	4.1E-05	3.9E-04	2542
L17B0020535	2.5E-06	3.5E-05	1.6E-04	3.9E-05	2.0E-06	1.1E-04	3.7E-04	1.2E-04	3.7E-04	2720
L17B0020531	1.6E-06	8.6E-05	2.9E-04	9.2E-05	2.0E-06	2.5E-05	1.1E-04	2.8E-05	2.9E-04	3475
L17B0020530	1.9E-06	2.3E-05	1.0E-04	2.6E-05	1.5E-06	8.2E-05	2.7E-04	8.7E-05	2.7E-04	3700
L17B0020526	1.4E-06	6.3E-05	2.0E-04	6.6E-05	1.6E-06	1.6E-05	7.2E-05	1.6E-05	2.0E-04	4962
L17B0020525	1.5E-06	1.4E-05	6.3E-05	1.5E-05	1.4E-06	5.8E-05	1.9E-04	6.1E-05	1.9E-04	5395
L17B0020521	1.3E-06	4.1E-05	1.2E-04	4.2E-05	1.3E-06	8.8E-06	3.6E-05	8.6E-06	1.2E-04	8126
L17B0020520	1.3E-06	7.6E-06	3.2E-05	7.4E-06	1.3E-06	3.6E-05	1.1E-04	3.7E-05	1.1E-04	9198
L17B0020516	1.3E-06	2.1E-05	5.8E-05	2.1E-05	1.2E-06	3.7E-06	1.4E-05	3.6E-06	5.8E-05	17160
L17B0020515	1.2E-06	3.2E-06	1.1E-05	3.0E-06	1.3E-06	1.9E-05	4.8E-05	1.8E-05	4.8E-05	20789
L17B0020511	1.3E-06	8.6E-06	1.9E-05	7.8E-06	1.1E-06	1.8E-06	4.6E-06	1.6E-06	1.9E-05	51994
L17B0020510	1.1E-06	1.7E-06	3.8E-06	1.6E-06	1.3E-06	6.8E-06	1.5E-05	6.1E-06	1.5E-05	68192
L17B0020004	6.7E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.7E-08	15027019
L17B0020003	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.7E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.6E-08	6.7E-08	15034429
L17B0020002	6.6E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.6E-08	15227978
L17B_seg002	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	15327973
L17B0010145	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	6.5E-08	15330698
L17B0010002	2.8E-09	2.8E-09	2.8E-09	2.8E-09	2.8E-09	2.8E-09	2.8E-09	2.8E-09	2.8E-09	355560992
L17B_anchor	2.9E-09	2.9E-09	2.8E-09	2.7E-09	2.6E-09	2.7E-09	2.8E-09	2.9E-09	2.9E-09	341343645

Resultados obtidos nos diferentes elementos finitos que conformam o SCR n°17 mediante a metodologia DNV (104 estados de mar).

Joint	Ponto da Seção Transversal								MAXIMO	Vida Util
	1	2	3	4	5	6	7	8		
topo	6.8E-04	4.6E-04	4.3E-04	6.6E-04	6.8E-04	4.4E-04	4.1E-04	6.5E-04	6.8E-04	1466
L17B0090130	6.8E-04	4.5E-04	4.2E-04	6.5E-04	6.7E-04	4.4E-04	4.0E-04	6.4E-04	6.8E-04	1480
L17B0090129	6.7E-04	4.5E-04	4.2E-04	6.5E-04	6.6E-04	4.3E-04	4.0E-04	6.4E-04	6.7E-04	1493
L17B0090128	6.6E-04	4.4E-04	4.2E-04	6.4E-04	6.6E-04	4.3E-04	4.0E-04	6.3E-04	6.6E-04	1507
L17B0090127	6.6E-04	4.4E-04	4.1E-04	6.4E-04	6.5E-04	4.3E-04	3.9E-04	6.3E-04	6.6E-04	1518
L17B0090126	6.5E-04	4.4E-04	4.1E-04	6.3E-04	6.5E-04	4.2E-04	3.9E-04	6.2E-04	6.5E-04	1532
L17B0090125	6.2E-04	4.0E-04	3.7E-04	5.9E-04	6.2E-04	4.2E-04	3.9E-04	6.0E-04	6.2E-04	1606
L17B_seg009	7.3E-05	7.0E-05	8.3E-05	8.9E-05	6.7E-05	4.1E-05	4.4E-05	6.7E-05	8.9E-05	11214
L17B0080130	6.5E-05	6.4E-05	7.5E-05	8.0E-05	6.0E-05	3.7E-05	3.9E-05	6.0E-05	8.0E-05	12517
L17B0080129	5.3E-05	3.3E-05	3.5E-05	5.3E-05	5.9E-05	5.8E-05	6.8E-05	7.2E-05	7.2E-05	13931
L17B0040186	4.8E-06	4.9E-06	4.9E-06	4.6E-06	4.4E-06	4.3E-06	4.3E-06	4.5E-06	4.9E-06	202725
L17B0040185	4.4E-06	4.3E-06	4.3E-06	4.5E-06	4.8E-06	4.9E-06	4.9E-06	4.6E-06	4.9E-06	202992
L17B0040181	4.6E-06	4.8E-06	4.7E-06	4.5E-06	4.2E-06	4.1E-06	4.2E-06	4.4E-06	4.8E-06	207870
L17B0040180	4.2E-06	4.1E-06	4.2E-06	4.3E-06	4.6E-06	4.8E-06	4.7E-06	4.5E-06	4.8E-06	208182
L17B0020676	2.1E-06	2.9E-05	4.6E-05	6.3E-06	2.1E-06	3.5E-05	6.3E-05	2.0E-05	6.3E-05	15891
L17B0020675	2.1E-06	3.6E-05	6.6E-05	2.0E-05	2.2E-06	3.2E-05	5.2E-05	6.6E-06	6.6E-05	15046
L17B0020671	2.2E-06	4.0E-05	6.7E-05	7.7E-06	2.1E-06	4.1E-05	7.7E-05	2.1E-05	7.7E-05	12972
L17B0020670	2.0E-06	4.2E-05	7.8E-05	2.1E-05	2.2E-06	4.1E-05	6.9E-05	8.0E-06	7.8E-05	12769
L17B0020666	2.3E-06	4.4E-05	6.9E-05	8.4E-06	2.0E-06	4.4E-05	7.9E-05	2.2E-05	7.9E-05	12704
L17B0020665	2.0E-06	4.4E-05	7.8E-05	2.2E-05	2.3E-06	4.4E-05	6.9E-05	8.4E-06	7.8E-05	12778
L17B0020661	2.2E-06	4.3E-05	6.4E-05	8.3E-06	1.9E-06	4.4E-05	7.7E-05	2.2E-05	7.7E-05	13044
L17B0020660	1.9E-06	4.4E-05	7.6E-05	2.2E-05	2.1E-06	4.3E-05	6.3E-05	8.3E-06	7.6E-05	13136
L17B0020656	2.0E-06	4.1E-05	5.8E-05	8.1E-06	1.8E-06	4.4E-05	7.5E-05	2.2E-05	7.5E-05	13411
L17B0020655	1.8E-06	4.3E-05	7.4E-05	2.2E-05	2.0E-06	4.0E-05	5.7E-05	8.1E-06	7.4E-05	13499
L17B0020651	1.9E-06	3.7E-05	5.2E-05	8.1E-06	1.8E-06	4.2E-05	7.2E-05	2.2E-05	7.2E-05	13912
L17B0020650	1.8E-06	4.1E-05	7.1E-05	2.2E-05	1.9E-06	3.6E-05	5.1E-05	8.1E-06	7.1E-05	14050
L17B0020646	1.9E-06	3.2E-05	4.5E-05	7.9E-06	1.8E-06	3.9E-05	6.8E-05	2.2E-05	6.8E-05	14769
L17B0020645	1.8E-06	3.8E-05	6.7E-05	2.2E-05	1.9E-06	3.0E-05	4.3E-05	7.8E-06	6.7E-05	15008
L17B0020641	1.9E-06	2.5E-05	3.6E-05	7.4E-06	1.8E-06	3.5E-05	6.2E-05	2.2E-05	6.2E-05	16256
L17B0020640	1.8E-06	3.4E-05	6.0E-05	2.1E-05	1.9E-06	2.4E-05	3.5E-05	7.3E-06	6.0E-05	16664
L17B0020636	1.9E-06	1.8E-05	2.7E-05	6.4E-06	1.8E-06	3.0E-05	5.3E-05	2.1E-05	5.3E-05	18763
L17B0020635	1.7E-06	2.8E-05	5.1E-05	2.0E-05	1.9E-06	1.7E-05	2.5E-05	6.1E-06	5.1E-05	19432
L17B0020631	1.9E-06	1.1E-05	1.7E-05	4.6E-06	1.8E-06	2.4E-05	4.4E-05	1.9E-05	4.4E-05	22745
L17B0020630	1.8E-06	2.3E-05	4.2E-05	1.8E-05	1.9E-06	9.7E-06	1.5E-05	4.2E-06	4.2E-05	23759
L17B0020626	1.8E-06	5.1E-06	7.5E-06	2.4E-06	1.7E-06	1.8E-05	3.5E-05	1.6E-05	3.5E-05	28511
L17B0020625	1.7E-06	1.7E-05	3.4E-05	1.6E-05	1.8E-06	4.2E-06	6.1E-06	2.0E-06	3.4E-05	29830
L17B0020621	1.7E-06	1.5E-06	2.1E-06	9.1E-07	1.6E-06	1.4E-05	2.8E-05	1.4E-05	2.8E-05	35314
L17B0020620	1.5E-06	1.4E-05	2.7E-05	1.4E-05	1.6E-06	1.1E-06	1.7E-06	7.8E-07	2.7E-05	36582
L17B0020616	1.5E-06	7.2E-07	3.0E-06	1.3E-06	1.4E-06	1.2E-05	2.6E-05	1.2E-05	2.6E-05	39043
L17B0020615	1.4E-06	1.2E-05	2.6E-05	1.2E-05	1.5E-06	9.0E-07	4.1E-06	1.6E-06	2.6E-05	38888
L17B0020611	1.5E-06	2.5E-06	1.1E-05	3.0E-06	1.4E-06	1.1E-05	2.7E-05	1.2E-05	2.7E-05	36857
L17B0020610	1.3E-06	1.1E-05	2.7E-05	1.1E-05	1.6E-06	3.1E-06	1.2E-05	3.4E-06	2.7E-05	36638
L17B0020606	1.6E-06	7.8E-06	2.2E-05	6.2E-06	1.3E-06	1.1E-05	2.9E-05	1.0E-05	2.9E-05	34709
L17B0020605	1.3E-06	1.1E-05	3.1E-05	9.9E-06	1.6E-06	1.0E-05	2.6E-05	7.5E-06	3.1E-05	32544
L17B0020601	1.7E-06	2.7E-05	6.6E-05	1.7E-05	1.3E-06	1.7E-05	5.4E-05	1.1E-05	6.6E-05	15174
L17B0020600	1.3E-06	1.9E-05	6.4E-05	1.2E-05	1.7E-06	3.3E-05	8.0E-05	2.1E-05	8.0E-05	12455

Joint	Ponto da Seção Transversal								MAXIMO	Vida Util
	1	2	3	4	5	6	7	8		
L17B0020596	1.8E-06	6.2E-05	1.6E-04	4.2E-05	1.3E-06	3.0E-05	1.2E-04	2.0E-05	1.6E-04	6197
L17B0020595	1.3E-06	3.2E-05	1.3E-04	2.2E-05	1.8E-06	7.0E-05	1.8E-04	4.8E-05	1.8E-04	5422
L17B0020591	1.9E-06	1.0E-04	2.7E-04	7.9E-05	1.2E-06	4.2E-05	1.8E-04	3.5E-05	2.7E-04	3764
L17B0020590	1.2E-06	4.5E-05	2.1E-04	3.8E-05	1.9E-06	1.1E-04	2.9E-04	8.7E-05	2.9E-04	3440
L17B0020586	1.9E-06	1.4E-04	3.9E-04	1.3E-04	1.2E-06	5.8E-05	2.7E-04	5.1E-05	3.9E-04	2567
L17B0020585	1.2E-06	6.2E-05	2.9E-04	5.4E-05	1.9E-06	1.4E-04	4.2E-04	1.4E-04	4.2E-04	2403
L17B0020581	1.8E-06	1.8E-04	5.2E-04	1.7E-04	1.3E-06	7.3E-05	3.4E-04	6.2E-05	5.2E-04	1922
L17B0020580	1.4E-06	7.5E-05	3.5E-04	6.6E-05	1.8E-06	1.9E-04	5.4E-04	1.8E-04	5.4E-04	1839
L17B0020576	1.8E-06	2.2E-04	6.6E-04	2.1E-04	1.5E-06	8.1E-05	3.9E-04	7.5E-05	6.6E-04	1517
L17B0020575	1.6E-06	8.5E-05	3.9E-04	7.7E-05	1.8E-06	2.2E-04	6.8E-04	2.2E-04	6.8E-04	1466
L17B0020571	1.9E-06	2.5E-04	8.3E-04	2.5E-04	1.9E-06	9.6E-05	4.5E-04	8.6E-05	8.3E-04	1211
L17B0020570	2.0E-06	1.0E-04	4.9E-04	8.9E-05	2.0E-06	2.6E-04	8.6E-04	2.6E-04	8.6E-04	1168
L17B0020566	2.4E-06	2.8E-04	9.7E-04	2.9E-04	2.6E-06	1.2E-04	5.6E-04	1.1E-04	9.7E-04	1027
L17B0020565	2.7E-06	1.2E-04	5.7E-04	1.1E-04	2.5E-06	2.8E-04	1.0E-03	3.0E-04	1.0E-03	995
L17B0020561	3.2E-06	3.1E-04	1.2E-03	3.3E-04	3.5E-06	1.3E-04	6.3E-04	1.3E-04	1.2E-03	865
L17B0020560	3.7E-06	1.3E-04	6.5E-04	1.3E-04	3.4E-06	3.1E-04	1.2E-03	3.4E-04	1.2E-03	844
L17B0020556	4.0E-06	3.2E-04	1.3E-03	3.6E-04	4.5E-06	1.5E-04	7.3E-04	1.5E-04	1.3E-03	770
L17B0020555	4.7E-06	1.5E-04	7.5E-04	1.5E-04	4.2E-06	3.3E-04	1.3E-03	3.6E-04	1.3E-03	755
L17B0020551	4.8E-06	3.4E-04	1.4E-03	3.7E-04	5.3E-06	1.6E-04	8.1E-04	1.6E-04	1.4E-03	722
L17B0020550	5.5E-06	1.6E-04	8.1E-04	1.6E-04	4.9E-06	3.4E-04	1.4E-03	3.7E-04	1.4E-03	724
L17B0020546	5.0E-06	3.0E-04	1.2E-03	3.2E-04	5.5E-06	1.3E-04	6.6E-04	1.4E-04	1.2E-03	841
L17B0020545	5.3E-06	1.2E-04	6.1E-04	1.3E-04	4.8E-06	2.8E-04	1.1E-03	3.0E-04	1.1E-03	908
L17B0020541	3.4E-06	2.0E-04	7.3E-04	2.1E-04	3.9E-06	7.8E-05	3.7E-04	8.3E-05	7.3E-04	1368
L17B0020540	3.4E-06	6.6E-05	3.2E-04	7.2E-05	3.0E-06	1.8E-04	6.5E-04	1.9E-04	6.5E-04	1548
L17B0020536	1.9E-06	1.3E-04	4.4E-04	1.4E-04	2.4E-06	4.3E-05	2.0E-04	4.6E-05	4.4E-04	2257
L17B0020535	2.2E-06	3.9E-05	1.8E-04	4.4E-05	1.8E-06	1.2E-04	4.1E-04	1.3E-04	4.1E-04	2415
L17B0020531	1.5E-06	9.7E-05	3.2E-04	1.0E-04	1.8E-06	2.8E-05	1.2E-04	3.2E-05	3.2E-04	3092
L17B0020530	1.7E-06	2.5E-05	1.2E-04	2.9E-05	1.4E-06	9.2E-05	3.0E-04	9.7E-05	3.0E-04	3294
L17B0020526	1.4E-06	7.0E-05	2.3E-04	7.4E-05	1.5E-06	1.7E-05	8.0E-05	1.8E-05	2.3E-04	4436
L17B0020525	1.4E-06	1.6E-05	7.0E-05	1.6E-05	1.4E-06	6.5E-05	2.1E-04	6.8E-05	2.1E-04	4830
L17B0020521	1.4E-06	4.5E-05	1.4E-04	4.7E-05	1.3E-06	9.3E-06	3.8E-05	9.2E-06	1.4E-04	7343
L17B0020520	1.2E-06	7.9E-06	3.4E-05	7.9E-06	1.4E-06	4.0E-05	1.2E-04	4.1E-05	1.2E-04	8343
L17B0020516	1.3E-06	2.3E-05	6.2E-05	2.3E-05	1.1E-06	3.5E-06	1.4E-05	3.6E-06	6.2E-05	16001
L17B0020515	1.1E-06	2.9E-06	1.1E-05	2.9E-06	1.4E-06	2.0E-05	5.1E-05	1.9E-05	5.1E-05	19602
L17B0020511	1.3E-06	8.4E-06	1.8E-05	7.6E-06	1.1E-06	1.4E-06	3.3E-06	1.3E-06	1.8E-05	54687
L17B0020510	1.1E-06	1.3E-06	2.3E-06	1.3E-06	1.3E-06	6.4E-06	1.3E-05	5.7E-06	1.3E-05	76535
L17B0020004	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	16107988
L17B0020003	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	6.2E-08	16108247
L17B0020002	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	16322533
L17B_seg002	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	16431153
L17B0010145	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	6.1E-08	16431423
L17B0010002	2.4E-09	2.5E-09	2.5E-09	2.5E-09	2.5E-09	2.5E-09	2.5E-09	2.4E-09	2.5E-09	402317348
L17B_anchor	2.6E-09	2.6E-09	2.5E-09	2.4E-09	2.3E-09	2.4E-09	2.4E-09	2.5E-09	2.6E-09	386772384