

DESENVOLVIMENTO DE UM PÓS-PROCESSADOR PARA VISUALIZAÇÃO DAS  
JANELAS DE OPERAÇÃO DE RISERS DE PERFURAÇÃO

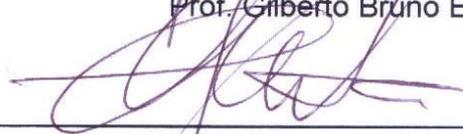
Aluizio de Amorim Pacheco

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

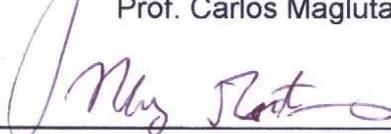
Aprovada por:



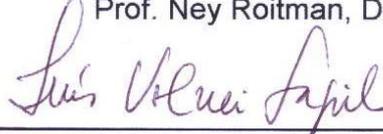
Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.



Prof. Carlos Magluta, D.Sc.



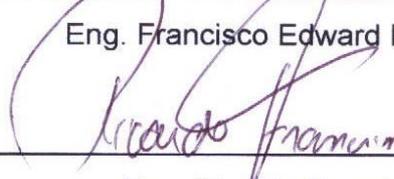
Prof. Ney Roitman, D.Sc.



Prof. Luis Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.



Eng. Francisco Edward Roveri, M.Sc.



Eng. Ricardo Franciss, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2004

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

PACHECO, ALUIZIO DE AMORIM

Desenvolvimento de um Pós-Processador  
para Visualização das Janelas de Operação de  
*Risers* de Perfuração [Rio de Janeiro] 2004

XIII, 138 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Civil, 2004)

Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Janela de Operação
2. Limite Operacional do *Riser* de Perfuração

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

Aos meus pais, minha irmã e minha adorada filha  
que sempre me apoiaram em todas  
as minhas decisões.

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me proporcionou a imensa felicidade em concretizar este trabalho.

A Carlos Magluta pela dedicação, preocupação e debates técnicos durante a orientação.

A Ney Roitman pela disposição, atenção e grandes observações para construção deste trabalho.

Ao Gilberto B. Ellwanger pelo depósito de confiança, estímulo na pesquisa, diretrizes técnicas, dicas e conselhos nas decisões mais importantes.

A Francisco E. Roveri e ao CENPES pela atenção, complementação técnica, apoio, enriquecimento de dados reais de engenharia e motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores da COPPE, em especial a Luis Volnei Sudati Sagrilo, Webe J. Mansur e Breno Pinheiro Jacob pelo ensino de excelência.

Aos amigos, colegas e funcionários do Laboratório de Estruturas que sempre estiveram dispostos a ajudar no que fosse preciso.

Aos amigos Fabrício Nogueira Corrêa e Fabrício M. Resende pelo incentivo, estímulo e grande apoio nos assuntos acadêmicos e pessoais.

Aos funcionários da secretaria e Laboratório de Computação, em especial a Jairo, Rita e Thelmo pelo atendimento sempre alegre, descontraído e cortês.

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

## DESENVOLVIMENTO DE UM PÓS-PROCESSADOR PARA VISUALIZAÇÃO DAS JANELAS DE OPERAÇÃO DE *RISERS* DE PERFURAÇÃO

Aluizio de Amorim Pacheco

Abril/2004

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

Carlos Magluta

Ney Roitman

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho desenvolve um pós-processador para executar o controle de qualidade dos dados de entrada e resultados oriundos de uma análise de *riser*, analisar o comportamento do *riser* de perfuração e construir as janelas de operação.

As janelas de operação são regiões pertencentes a gráficos bidimensionais, as quais apresentam os limites operacionais do *riser* de perfuração, na presença de condições ambientais de onda e corrente.

Para os leitores menos acostumados com os conceitos da perfuração de um poço de petróleo, a dissertação inclui os principais fundamentos da perfuração, os principais equipamentos, acessórios e operações de perfuração. Também estão incluídos os critérios de projeto e os diferentes tipos de janelas de operação.

O principal objetivo do pós-processador é propor a visualização das janelas de operação para facilitar e agilizar as decisões na escolha do par de *offset* e tração no topo do *riser*, de forma a manter o *riser* na faixa dos critérios permissíveis.

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

DEVELOPMENT OF A POST-PROCESSOR FOR VISUALIZATION  
OF OPERATION WINDOWS OF DRILLING RISERS

Aluizio de Amorim Pacheco

April/2004

Advisors: Gilberto Bruno Ellwanger

Carlos Magluta

Ney Roitman

Department: Civil Engineering

This work shows the development of a post-processor to execute the input and output data quality control from a riser analysis, to analyze the behavior of a drilling riser and to present the operation windows.

The operation windows are areas of graphics with two dimensions, which present the operational limits of the drilling riser within environmental conditions of wave and current.

To the readers with low knowledge about the assumptions of petroleum well drilling, the thesis includes the main fundamentals of drilling, the main equipment, features and drilling operations. Furthermore, it includes the design criteria and the different types of the operation windows.

The major objective of the post-processor is to propose the visualization of the operation window to facilitate and speed up the choice of offset and riser top tension so as to maintain the riser within permissible limits.

## ÍNDICE

	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 - Introdução</b> .....	1
<b>1.2 - Divisão dos Capítulos</b> .....	3
<b>CAPÍTULO 2 - PRINCIPAIS CONCEITOS PARA ANÁLISE DO <i>RISER</i> DE PEFURAÇÃO</b> .....	4
<b>2.1 - Princípios de Operação</b> .....	4
<b>2.2 - Tração no Topo do <i>Riser</i></b> .....	5
<b>2.3 - Configurações do <i>Riser</i> de Perfuração</b> .....	7
<b>2.4 - Fatores de Operação</b> .....	7
<b>2.5 - Procedimentos Operacionais</b> .....	7
2.5.1 - Suspendendo as Operações com o <i>Riser</i> Conectado .....	8
2.5.2 - Desconectando o <i>Riser</i> .....	8
<b>2.6 - Modelagem para Projetos</b> .....	9
<b>2.7 - Janela de Operação</b> .....	16
<b>CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DO PÓS-PROCESSADOR</b> .....	21
<b>3.1 - Leitura dos Dados</b> .....	21
<b>3.2 - Controle de Qualidade dos Dados</b> .....	22
<b>3.3 - Análise dos Dados</b> .....	25
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS DO PÓS-PROCESSAMENTO</b> .....	34
<b>4.1 - Principais Considerações</b> .....	34

<b>4.2 - Controle de Qualidade, Análise e Construção das Janelas de Operação para Ondas Regulares .....</b>	<b>36</b>
4.2.1 - Controle de Qualidade dos Dados de Entrada e Saída do DERP .....	38
4.2.2 - Comportamento dos Ângulos da <i>Flex Joint</i> do Topo e Fundo e Máxima Relação das Tensões em Função dos Parâmetros de Entrada .....	48
4.2.3 - Janelas de Operação .....	65
 <b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....</b>	 <b>78</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>81</b>
 <b>ANEXOS .....</b>	 <b>84</b>
<b>1 - PERFURAÇÃO DE UM POÇO DE PETRÓLEO .....</b>	<b>85</b>
<b>2 - PRINCIPAIS EQUAÇÕES PARA ANÁLISE DE <i>RISER</i> .....</b>	<b>121</b>
<b>3 - INFORMAÇÕES ADICIONAIS DO <i>RISER</i> DE PERFURAÇÃO E SEUS COMPONENTES .....</b>	<b>137</b>

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 2.1** - Principais Parâmetros Envolvidos no Projeto e Análise do Sistema do *Riser* de Perfuração [7].

**Figura 2.2** - Ajuda para Otimização da Tração no Topo do *Riser* [7].

**Figura 2.3** - Excentricidade do BOP Resultando em Momento na Coluna do Condutor [7].

**Figura 2.4** - Exemplo do Efeito do *Offset* sobre a Tensão com Tração Constante [7].

**Figura 2.5** - Definição dos Ângulos da *Ball Joint* do Fundo e do *Riser*, Modificado de [10].

**Figura 2.6** - Sistema de Coordenadas e Convenção de Sinais para o Deslocamento, Rotação, Momento e Esforço Cortante do DERP [4].

**Figura 2.7** - Perfil de Corrente com Período de Retorno de 1 Ano [11].

**Figura 2.8** - Perfil de Corrente Triangular Iniciando do Fundo do Mar.

**Figura 2.9** - Janela de Operação com Tração no *Riser Versus Offset* da Embarcação [5].

**Figura 2.10** - Janela de Operação com Máximo *Offset Versus* Estado de Mar (Altura de Onda) [14].

**Figura 2.11** - Janela de Operação para um Perfil de Corrente Colinear [15].

**Figura 2.12** - Configurações do *Riser* de Perfuração.

**Figura 2.13** - Sensores de Deformação nas Extremidades Superior e Inferior do *Riser* [17].

**Figura 3.1** - Formulário de Leitura de Dados.

**Figura 3.2** - Formulário do Controle de Qualidade dos Dados.

**Figura 3.3** - Formulário do Gráfico do Controle de Qualidade dos Dados.

**Figura 3.4** - Formulário da Escala do Gráfico.

**Figura 3.5** - Formulário das Análises.

**Figura 3.6** - Formulário dos Critérios.

**Figura 3.7** - Formulário “Análise”, Tipo de Gráfico Critérios e/ou Valores - Curvas .

**Figura 3.8** - Formulário do Tipo de Gráfico Critérios e/ou Valores - Curvas .

**Figura 3.9** - Formulário “Editar Gráfico”.

**Figura 3.9** - Formulário do Tipo de Gráfico Critérios - Área.

**Figura 3.10** - Formulário “Análise”, Tipo de Gráfico Ângulos X *Static Offset*.

**Figura 3.11** - Formulário do Tipo de Gráfico Ângulos X *Static Offset*.

**Figura 3.12** - Formulário do Tipo de Gráfico Critérios - Contorno.

**Figura 4.1** - Plataforma Semi-submersível Stena Tay [10].

**Figura 4.2** - Modelo do Sistema BOP, LMRP e *Riser* de Perfuração, Modificado de [10].

**Figura 4.3** - Qualidade dos Dados de Entrada.

**Figura 4.4** - Qualidade do *offset*, Fluido de Perfuração e Tração no Topo.

**Figura 4.5** - Qualidade do Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

**Figura 4.6** - Qualidade do Ângulo da *Flex Joint* do Topo e Máxima Rotação do *Riser*.

**Figura 4.7** - Qualidade do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo e Máxima Rotação do *Riser*.

**Figura 4.8** - Ângulo da *Flex Joint* do Fundo e Máxima Rotação do *Riser* em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático.

**Figura 4.9** - Qualidade do Curso da Junta Telescópica e Máxima Rotação do *Riser*.

**Figura 4.10** - Curso da Junta Telescópica e Máxima Rotação do *Riser* em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático.

**Figura 4.11** - Qualidade da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento do *Riser*.

**Figura 4.12** - Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento e Máxima Rotação do *Riser* em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Tração no Topo e o *Offset* Estático.

**Figura 4.13** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Velocidade da Corrente e a Altura de Onda.

**Figura 4.14** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com a Velocidade da Corrente e o Fluido de Perfuração.

**Figura 4.15** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com o Fluido de Perfuração e a Máxima Rotação do *Riser*.

**Figura 4.16** - Esquema do Efeito da Posição da Embarcação em Relação ao Sentido da Corrente.

**Figura 4.17** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático da Embarcação.

**Figura 4.18** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Velocidade da Corrente e a Altura de Onda.

**Figura 4.19** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com a Velocidade da Corrente e o Fluido de Perfuração.

**Figura 4.20** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com o Fluido de Perfuração e a Máxima Rotação do *Riser*.

**Figura 4.21** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático da Embarcação.

**Figura 4.22** - Efeitos da Tração no Topo do *Riser* no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.

**Figura 4.23** - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Velocidade da Corrente e a Altura de Onda.

**Figura 4.24** - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com a Velocidade da Corrente e o Fluido de Perfuração.

**Figura 4.25** - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com o Fluido de Perfuração e a Máxima Rotação do *Riser*.

**Figura 4.26** - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático da Embarcação.

**Figura 4.27** - Janela de Operação Visualizando os Ângulos da *Flex Joint* do Topo e Fundo.

**Figura 4.28** - Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Função da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação.

**Figura 4.29** - Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Função da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação.

**Figura 4.30** - Curso da Junta Telescópica em Função da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação.

**Figura 4.31** - Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento do *Riser*.

**Figura 4.32** - Janela de Operação Visualizando os Limites Operacionais.

**Figura 4.33** - Janela de Operação Visualizando o Preenchimento da Região Válida.

**Figura 4.34** - Janela de Operação com os Parâmetros de Entrada Alterados.

**Figura 4.35** - Janela de Operação sem Região Válida.

**Figura 4.36** - Comportamento das Janelas de Operação em Função da Onda.

**Figura 4.37** - Comportamento das Janelas de Operação em Função da Corrente.

**Figura 4.38** - Comportamento das Janelas de Operação em Função do Fluido de Perfuração.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 4.1** - Valores dos Parâmetros de Entrada para o Estudo Paramétrico.

**Tabela 4.2** - 27 Casos com 3.159 Simulações.

**Tabela 4.3** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

**Tabela 4.4** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

**Tabela 4.5** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

**Tabela 4.6** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Tração no Topo e *Offset* no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

**Tabela 4.7** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.

**Tabela 4.8** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.

**Tabela 4.9** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.

**Tabela 4.10** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Tração no Topo e *Offset* no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.

**Tabela 4.11** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.

**Tabela 4.12** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.

**Tabela 4.13** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.

**Tabela 4.14** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Tração no Topo e *Offset* na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.

**Tabela 4.15** - Critérios para as Janelas de Operação.

**Tabela 4.16** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Alteração da Janela de Operação.

**Tabela 4.17** - Valores dos Parâmetros de Entrada da Janela de Operação sem Região Válida.

**Tabela 4.18** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda nas Janelas de Operação.

**Tabela 4.19** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente nas Janelas de Operação.

**Tabela 4.20** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração nas Janelas de Operação.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Introdução

Com o progresso da exploração *offshore*, cada vez mais poços com lâminas d'água mais profundas são descobertos e com isto novos desafios são propostos ao mundo científico. Um destes desafios é manter o posicionamento da embarcação suportando o carregamento lateral imposto pelas condições ambientais sem interferir nas operações de perfuração.

FIGUEIREDO [1] descreve o progresso da exploração *offshore* e destaca que a partir do surgimento dos Navios Sonda em 1955 começam a surgir problemas com o posicionamento da embarcação devido às condições de onda, corrente e vento. A partir deste ponto os projetos para embarcações flutuantes passam a dar mais atenção às condições ambientais, pois a Sonda de perfuração deveria ter um sistema de ancoragem capaz de suportar o carregamento ambiental para garantir segurança as operações de perfuração.

O problema do movimento da embarcação reflete diretamente nos limites operacionais do *riser* de perfuração, ou seja, nos ângulos da *ball/flex joint* do topo e fundo, tensão permissível e curso da junta telescópica.

Ao final da década de 60 surgiram as primeiras embarcações com Sistema de Posicionamento Dinâmico (DPS), com a finalidade de manter o Navio numa posição favorável durante as operações de perfuração.

Atualmente existem Sistemas de Posicionamento Dinâmicos (DPS) [2], com modelos dinâmicos tridimensionais, com propulsores fixos ao longo do *riser* para melhorar a inclinação, metas arrojadas de perfurar a 4.000 metros, etc.

A técnica desenvolvida neste trabalho é a da janela de operação que apresenta de forma clara e simples os limites operacionais do *riser* de perfuração para uma faixa de valores máximos e mínimos de tração no topo do *riser* e *offset* estático da embarcação. Cada janela de operação é específica para uma condição ambiental, fluido de perfuração e lâmina d'água. E o conjunto de dados utilizados para construção destas janelas se originam da análise de *riser*.

A análise de *riser* é uma ferramenta utilizada pelos projetistas para verificar os detalhes do projeto e determinar os limites operacionais do *riser* de perfuração. As principais etapas de uma análise de *riser* são: coletar e revisar os parâmetros de entrada, especificar os critérios permissíveis de projeto e operação, executar análise dinâmica do *riser*, aplicar os critérios de projeto e operação aos resultados de saída da

análise de *riser* para construção de gráficos, realizar análise de fadiga, verificar a performance dos componentes com os carregamentos calculados do *riser* e preparar a saída e a documentação das análises.

Após os resultados da saída de uma análise de *riser*, que gera centenas de seqüências de dados oriundos de cálculos computacionais, ao invés de analisar este conjunto de dados em tabelas, opta-se por resumi-los num estudo paramétrico e exibi-los em gráficos x-y que são denominados janelas de operação.

A idéia central do presente trabalho é criar um pós-processador para o DERP [3] e [4]. O DERP [3] e [4] é um programa computacional utilizado pela PETROBRAS para executar análises de *riser*. O pós-processador empregará a janela de operação para estabelecer as regiões permissíveis ou não em gráficos bidimensionais, com possibilidade de analisar duas configurações do *riser* : 1) com o *riser* conectado e 2) com o *riser* conectado, mas sem rotação da coluna de perfuração. A visualização através de gráficos facilita a escolha da combinação de tração no topo com *offset*, pertencente à região permissível. Desta forma, mantém-se a integridade do sistema do *riser* de perfuração. Além disso, o pós-processador será capaz de avaliar a qualidade dos dados de saída de uma análise de *riser* e executar análises do comportamento estrutural do mesmo.

A API RP 17G [5], na seção 4 expõe que critérios e análises recomendados ao *riser* de perfuração possam ser empregados em *risers* de completação, lembrando que algumas diferenças chave entre eles devem ser consideradas tipo: requisitos funcionais, retenção de pressão, dimensão estrutural, comportamento dinâmico, níveis de tração, vida de fadiga, sistema de empuxo e interação solo/estrutura do poço. Nesta mesma seção 4, é definido *Operating Envelope Chart*, que no contexto deste trabalho foi incorporado com o título de janela de operação e adaptado para *riser* de perfuração, ao invés de *riser* de completação.

O motivo que se presta o desenvolvimento deste trabalho é a necessidade da perfuração de petróleo em águas ultraprofundas associada aos altos investimentos nos projetos. O Brasil tem investido pesado nas pesquisas de perfuração em águas ultraprofundas e um grande exemplo é o Procap 3000 [6], Programa Tecnológico Empresarial de Desenvolvimento em Exploração de Águas Ultraprofundas, que foi criado em agosto de 2000 pela Petrobras para alcançar a auto-suficiência na produção de petróleo. O desafio é produzir tecnologia para perfurar a profundidades até 3 mil metros. Os investimentos iniciais são da ordem de US\$ 128 milhões, que correspondem quase ao total das duas primeiras etapas do Procap que consumiram US\$ 130 milhões. Hoje, profundidades acima de 1.000 metros são consideradas como águas ultraprofundas e representam 75% das reservas totais. Desta forma, o sistema

de posicionamento dinâmico e a determinação dos limites de operação do *riser* de perfuração são de extrema importância, pois à medida que se aumenta a lâmina d'água, aumentam-se também as limitações dos equipamentos.

Com a finalidade de ampliar o conhecimento dos leitores menos acostumados com os conceitos da perfuração de um poço de petróleo foi incorporado ao trabalho o Anexo 1, o qual discorre sobre os principais equipamentos, acessórios, operações e manobras da perfuração. Além disso, constam: a definição de *riser* de perfuração, alguns comentários sobre sistema de posicionamento dinâmico e ilustrações dos tipos de unidades marítimas.

A janela de operação pode ser utilizada como parte de um sistema de posicionamento dinâmico, para estabelecer os limites operacionais do *riser* de perfuração e para analisar a influência do carregamento devido à correnteza, onda e fluido de perfuração nas operações de perfuração. Para este trabalho, a primeira finalidade não será desenvolvida, o que pode ser feito em trabalhos futuros.

## **1.2 - Divisão dos Capítulos**

Após o capítulo introdutório seguem os seguintes capítulos:

O capítulo 2 relata os principais conceitos para análise do *riser* de perfuração quando submetido ao esforço devido à corrente, onda e movimento da embarcação. Também encontram-se neste capítulo os critérios de projeto, procedimentos operacionais e a modelagem para projetos.

O capítulo 3 descreve o sistema computacional proposto para a visualização da janela de operação, mostrando as principais telas e menus, tipos de gráficos e abertura de arquivos com dados para análise.

O capítulo 4 mostra os resultados do pós-processamento através do controle de qualidade dos dados de entrada e saída das simulações numéricas, as análises de alguns parâmetros de saída do DERP [4] e a construção das janelas de operação.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### PRINCIPAIS CONCEITOS PARA ANÁLISE DO RISER DE PERFURAÇÃO

O *riser* de perfuração (ver Anexo 1) serve de canal para o tubo de perfuração. Assim, o tubo de perfuração passa pelo interior do *riser* de perfuração, desde a superfície até a cabeça de poço. As colunas de *risers* são suspensas por altas trações no topo para prevenir a flambagem devido ao peso próprio e a geometria esbelta.

Geralmente os *risers* (*riser main tube*) de perfuração são fabricados em aço, com as seguintes especificações: X-52, X-65 e X-80, onde os números representam a mínima tensão de escoamento (ksi) de cada grau. Os *risers* devem ser cuidadosamente analisados durante o projeto [7], para assegurar níveis aceitáveis de deformações, tensões e vida de fadiga, devido às forças impostas pelas correntes, ondas e movimentos da embarcação. A pressão hidrostática interna (fluido de perfuração) e a externa (água do mar) também são fundamentais nas equações da análise de *riser* (Anexo 2), assim como, a influência do fluxo de corrente e onda ao redor do tubo (Figura 2.1).

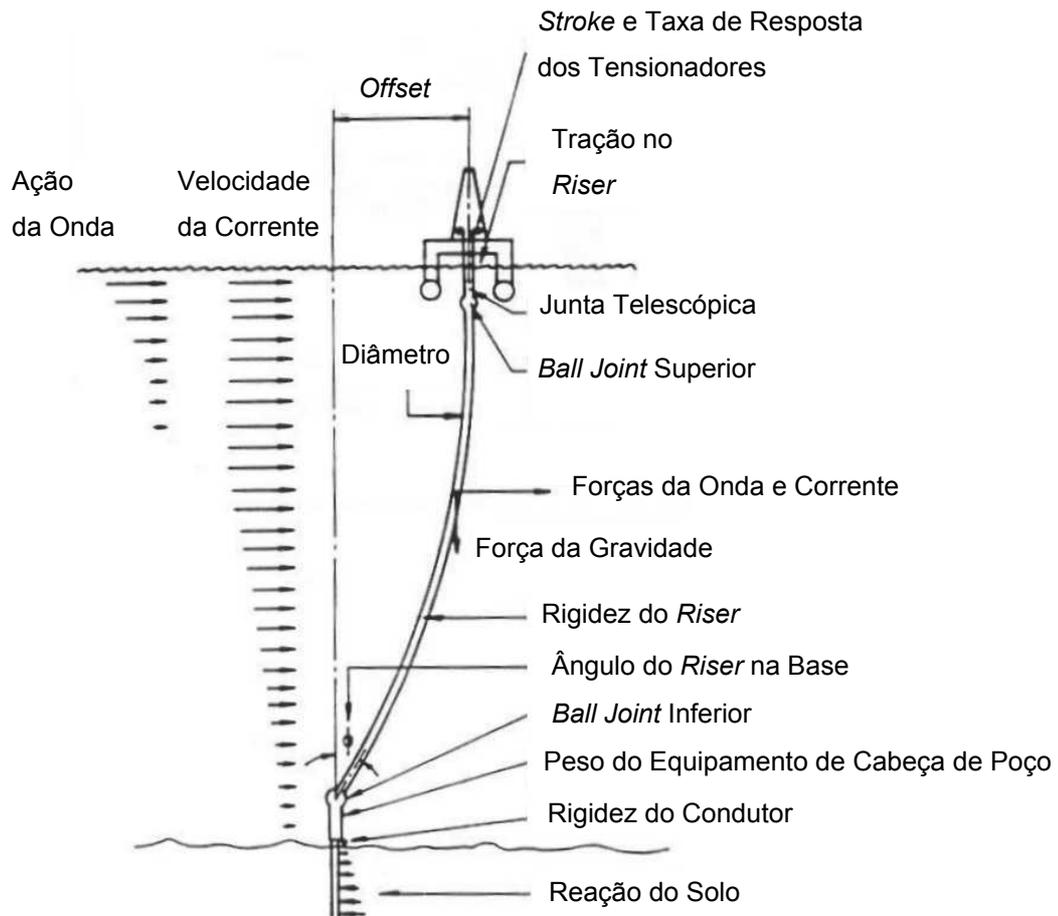
A descrição detalhada dos principais equipamentos mostrados na Figura 2.1 pode ser encontrada no Anexo 1.

#### 2.1 - Princípios de Operação

O *riser* de perfuração é projetado para resistir às estimativas das condições de carregamentos. Estas condições incluem as forças ambientais e se aplicável, movimento na superfície. As análises incluem o comportamento estático e dinâmico. As principais causas das falhas são o escoamento local do material e a flambagem da coluna de Euler.

O projeto do *riser* tracionado é afetado por:

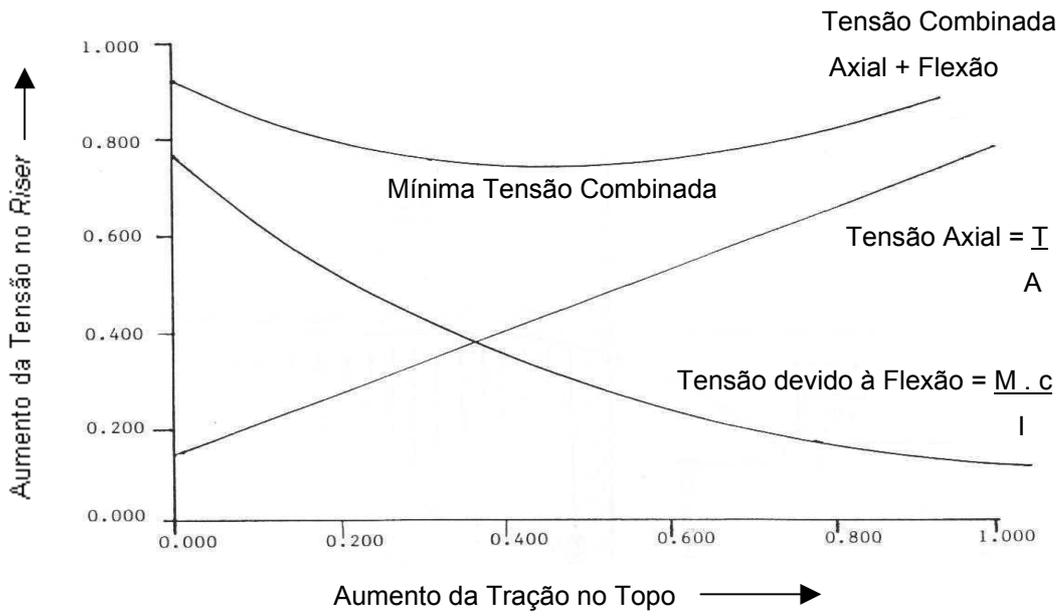
- Movimento estático e dinâmico da superfície da embarcação;
- Limites do curso (*stroke*) dos tensionadores e taxa de resposta;
- Limites do ângulo da conexão de fundo;
- Distribuição dos módulos de empuxo;
- Densidade do fluido de perfuração (lama, ver Anexo 1);
- Possível pressão de fluido (gás) anormal.



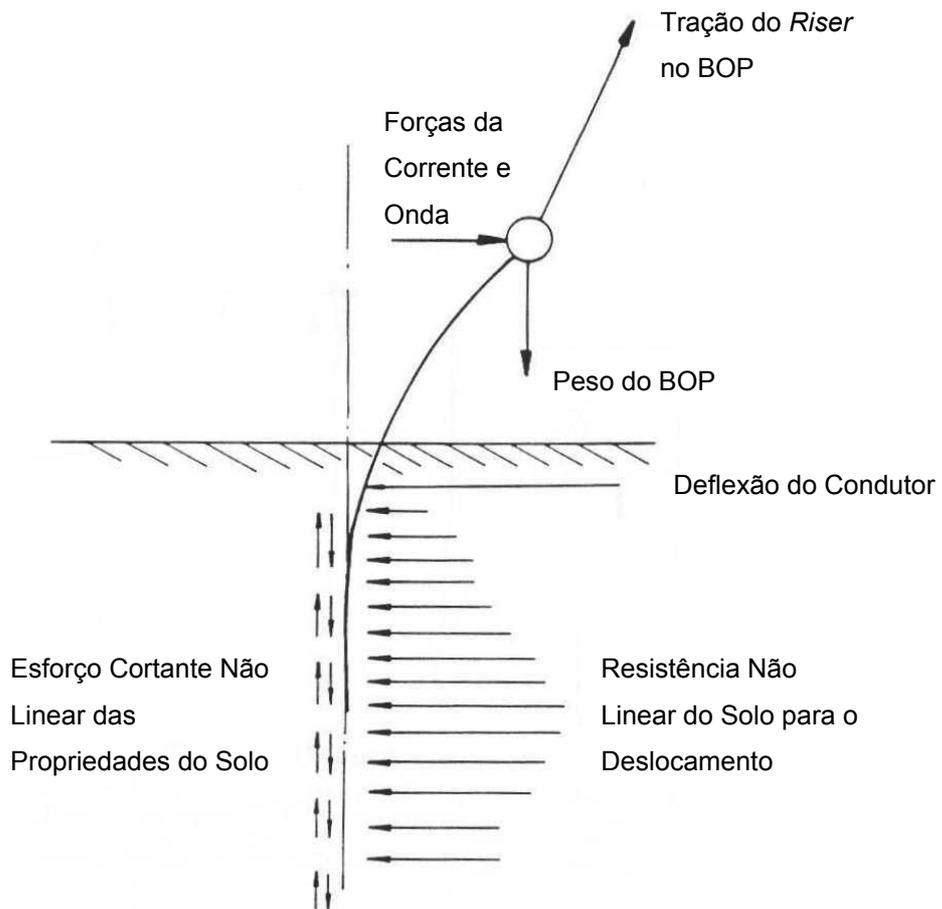
**Figura 2.1** - Principais Parâmetros Envolvidos no Projeto e Análise do Sistema do Riser de Perfuração [7].

## 2.2 - Tração no Topo do Riser

A escolha aproximada da tração ótima no topo pode ser obtida pelo cálculo da soma da redução da tensão devido ao momento fletor e aumento da tensão axial com o aumento da tração no topo (Figura 2.2). Deve-se tomar cuidado com a componente lateral da tração no topo para que não provoque deflexão horizontal excessiva no BOP *stack* (Figura 2.3). O momento devido ao peso do BOP e à excentricidade podem ocasionar a falha por flexão da coluna do condutor. A redução da tração no topo pode acarretar compressão local, que é mais provável de acontecer próximo a cabeça de poço.



**Figura 2.2** - Ajuda para Otimização da Tração no Topo do Riser [7].



**Figura 2.3** - Excentricidade do BOP Resultando em Momento na Coluna do Condutor [7].

### **2.3 - Configurações do *Riser* de Perfuração**

Normalmente existem três tipos de configurações nas operações de perfuração no mar:

#### **a) Modo com Perfuração**

Neste modo a combinação das condições do poço e ambientais permitem que as operações normais de perfuração possam ser seguramente conduzidas. Recomenda-se ângulos inferiores a 4° para a *ball joint* (Anexo 1), que é a combinação da experiência com dados experimentais. Normalmente para manter este ângulo, a embarcação não deve ultrapassar *offset* de 6% da lâmina d'água.

#### **b) Modo sem Perfuração**

Nem todas as operações de perfuração podem ser conduzidas, a coluna de perfuração não deve girar e o poço deve estar preparado para ser fechado e desconectado se necessário.

#### **c) Modo Desconectado**

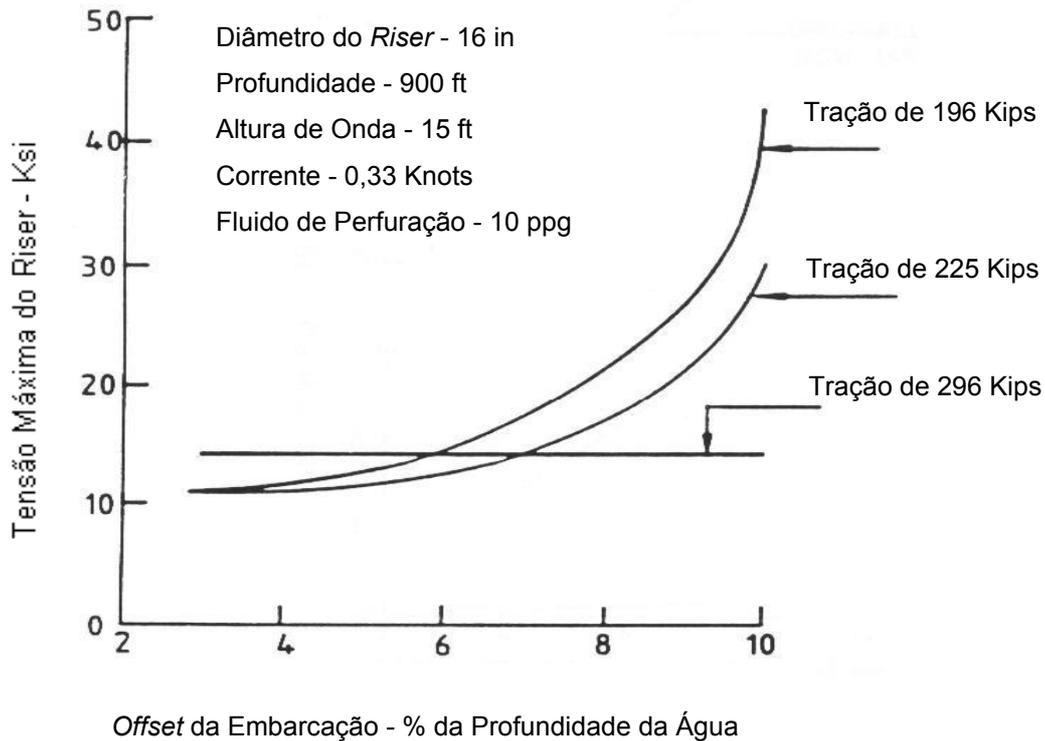
Caso as condições ambientais excedam os limites para operação segura no modo sem perfuração, mas conectado, o *riser* deve ser desconectado do BOP para evitar possíveis danos aos equipamentos da superfície ou de subsuperfície.

### **2.4 - Fatores de Operação**

Já que o *riser* é sensível ao *offset* da embarcação, o sistema de ancoragem (amarras) e o sistema de posicionamento dinâmico são considerados como fatores chave para manter o *riser* próximo da vertical, alinhado com a cabeça de poço. Nas operações sem perfuração, mas com o *riser* conectado, trações muito baixas com *offsets* excessivos podem causar escoamento e deformação permanente no *riser*. A Figura 2.4 mostra um exemplo do aumento da tensão com o aumento do *offset* da embarcação com tração constante. O aumento do *offset* requer um aumento da tração para que não ocorra aumento excessivo da tensão.

### **2.5 - Procedimentos Operacionais**

O projetista deve considerar os procedimentos normais, os de desconexão de emergência e os de *hang-off*; sendo que os dois últimos procedimentos acontecem na presença de tempestades. O *hang-off* é o procedimento que ocorre quando o *riser* e LMR são desconectados do BOP *stack* e ficam suspensos pelo *diverter*, *spider* ou outro equipamento específico até as condições do tempo melhorarem.



**Figura 2.4** - Exemplo do Efeito do *Offset* sobre a Tensão com Tração Constante [7].

### 2.5.1 - Suspendendo as Operações com o Riser Conectado

No caso de condições ambientais desfavoráveis ou falha de algum equipamento, a operação de perfuração deve ser suspensa. Se a situação não for tão crítica ao ponto de desconectar o *riser*, então recomenda-se os seguintes passos:

- Monitorar os seguintes parâmetros: ângulo da *flex/ball joint*, *offset* da embarcação, densidade do fluido de perfuração e tração no *riser*;
- Se o ângulo médio da *flex/ball joint* estiver excedendo 3° e não puder ser corrigido pelo ajuste da tração do *riser* e *offset* da embarcação, então deve-se preparar um plano de suspensão de algumas operações que envolvam movimento de tubos no interior do poço;
- Se as condições continuarem a piorar, etapas apropriadas precisam ser traçadas para uma desconexão controlada.

A falha dos tensionadores do *riser* e a perda de empuxo também são duas situações críticas que podem causar danos ao *riser*. Assim, planos de emergência devem ser traçados.

### 2.5.2 - Desconectando o Riser

Se a situação que causou suspensão das operações de perfuração tornar-se muito severa e não puder ser controlada pelos passos da seção 2.5.1, então procede-se da seguinte forma:

**a) Desconexão Normal** - Seguem-se os procedimentos da seção 2.5.1, controlando o ângulo da *flex/ball joint* do fundo. Procura-se manter um ângulo pequeno da *flex/ball joint* para facilitar a liberação do conector do *riser*. Se as condições permitirem, o *riser* e o LMR podem ser retirados e armazenados na embarcação. Caso contrário, o *riser* deve ser suspenso o máximo possível e permanecer em *hang-off*.

**b) Desconexão de Emergência** - Ocorre na presença de excursões, *offsets*, excessivas a partir de posições afastadas da vertical da cabeça de poço ou às vezes em casos de *blowout*. O *riser* de perfuração pode ser rapidamente desconectado, tipicamente em 30 segundos, do BOP *stack* e suspenso pela embarcação.

## 2.6 - Modelagem para Projetos

Os *risers* são estruturas esbeltas que estão sujeitas a forças internas e externas. Exemplos de forças internas são o peso próprio e pressão hidrostática interna. As forças externas originam-se da ação da pressão hidrostática do fluido externo e das forças exercidas pelo movimento da embarcação, ondas e correntes.

A análise de *riser* (*riser analysis*) pode ser utilizada através de programas específicos de computador para prever o comportamento do *riser* nas condições de projeto, determinar a faixa de tração no topo (*riser top tension*), *offsets* máximos permissíveis e carregamentos máximos sobre o *riser*. A análise de *riser* deve ser executada para uma faixa de parâmetros ambientais e operacionais.

Existem duas categorias de análise de *riser*, uma que considera somente condições de estado estacionário (estática) e outra que considera os efeitos da mudança dos parâmetros com o tempo (dinâmica).

Normalmente a análise de *riser* pode ser utilizada para duas funções diferentes: 1) uma delas é no projeto de um *riser* novo, onde uma série de análises são executadas para estabelecer as especificações de projeto. As condições ambientais são escolhidas para refletir as máximas condições operacionais esperadas. Critérios de projeto para a tensão máxima e alternada são utilizados para a escolha de parâmetros tipo espessura de parede e propriedades do material. A performance da embarcação e os requisitos do sistema de tensionadores também são analisados. 2) outra função da análise de *riser* é a preparação das operações de um *riser* e de uma embarcação já existentes para o uso em um novo ambiente. O objetivo é estabelecer os requisitos da tração no topo para as condições ambientais e densidades do fluido de perfuração propostos. Além disso, a análise indica em quais condições ambientais a perfuração deve parar ou permanecer em *hang-off* (seção 2.5).

O programa computacional utilizado neste trabalho para executar as análises estruturais do *riser* foi o DERP [3] e [4], de propriedade da PETROBRAS. A formulação da solução numérica utiliza o método das diferenças finitas no domínio da frequência e podem ser consideradas ondas regulares ou irregulares. O Programa assume que os movimentos ocorrem no plano, ou seja, onda, corrente e movimentos impostos atuam na mesma direção em todos os pontos ao longo do *riser*. Outro comentário importante é que resultados imprecisos podem surgir com rotações acima de 15°, pois o programa considera pequenas rotações.

O objetivo da análise e do programa [3] é prever movimentos e tensões significantes de um *riser* tracionado sob a ação das ondas, corrente e movimento da embarcação. No intuito de reduzir o tempo computacional e prever efeitos significantes do fenômeno, algumas suposições são incorporadas ao programa:

- a) Os deslocamentos e rotações são suficientemente pequenos de forma que:  $\sin \theta \cong \theta$ ,  $\cos \theta \cong 1$  e  $\theta^2$  é negligenciado em comparação com a unidade;
- b) Os planos perpendiculares ao eixo longitudinal do *riser* permanecem perpendiculares e planos quando submetidos à flexão;
- c) O material é linearmente elástico.

Com relação aos assuntos dos itens (a), (b) e (c) desta seção 2.6, o momento e a curvatura se relacionam segundo a equação fundamental da viga de Bernoulli-Euler:

$$M = EI \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

Onde:

$M \Rightarrow$  Momento fletor agindo no *riser*;

$EI \Rightarrow$  Rigidez à flexão do *riser*.

Inserindo as equações de equilíbrio de força e momento de um elemento do *riser* na equação 2.1, então a formulação da análise do *riser* assemelha-se àquela descrita no Anexo 2.

O carregamento hidrodinâmico inclui a soma da parcela de arrasto com a de inércia. Para as velocidades horizontal e vertical da partícula de fluido, assume pequenas amplitudes de onda (comprimento da onda muito maior do que a altura), Teoria Linear de Airy [3] e [8]. O coeficiente de arrasto é função do número de Reynolds e obtido através de gráficos x-y. O gráfico apresenta o coeficiente de arrasto no eixo y e o número de Reynolds no eixo x. O resultado deste gráfico apresenta duas curvas, uma para cilindro liso e outra para rugoso. O coeficiente de inércia também

pode ser obtido de forma semelhante ao coeficiente de arrasto, mas um valor de  $C_M = 2$  é normalmente usado.

Para as ondas irregulares, YOUNG *et al.* [3] utilizam o espectro de densidade de energia e fazem referência às formulações do espectro de onda de Pierson-Moskowitz [9], *International Ship Structure Congress*, *International Towing Tank Conference* e Minkenberg e Gie. A fórmula para o espectro de onda se origina de Minkenberg e Gie; e pode ser definida como:

$$S(\omega) = 172,8 \cdot H_s^2 \cdot T_m^{-4} \cdot \omega^{-5} \cdot \text{Exp}[-691 \cdot T_m^{-4} \cdot \omega^{-4}] \quad (2.2)$$

Onde:

$H_s \Rightarrow$  Altura significativa da onda, também conhecida como  $H_{1/3}$ ;

$T_m \Rightarrow$  Período médio;

$\omega \Rightarrow$  Frequência angular.

A técnica da análise espectral prevê com precisão propriedades estatísticas importantes, como os valores máximos e significantes das alturas de onda, movimentos e forças. E requer o conhecimento das respostas do movimento e força, das ondas regulares, de uma grande faixa de frequências. Este conhecimento é obtido através de simulações computacionais do programa do *riser* para um número suficiente de ondas, que compreende o mar irregular em questão.

Dentre outras alternativas, o DERP [4] possibilita estudo paramétrico onde todos os parâmetros pertinentes podem ser variados numa mesma simulação numérica (rodada). Estes parâmetros podem ser: estado de mar, perfil de corrente, profundidade da água, densidade do fluido de perfuração, tração no topo e *offset* estático. Os resultados podem ser salvos em arquivos para pós-processamento com programas de tabulação. Uma destas saídas de dados do DERP [4] exhibe informações de soluções estática, dinâmica e estática mais dinâmica. O programa faz a adição das respostas estática e dinâmica dos parâmetros, através da soma do valor absoluto da parcela estática com a parcela do valor absoluto dinâmico, com exceção dos parâmetros que se relacionam com: a tensão axial, *hoop* e radial (Anexo 2) que são adicionados somente uma vez. Esta saída de dados do DERP [4] foi utilizada como entrada para o pós-processador desenvolvido no trabalho e contém informações dos parâmetros de entrada e dos resultados. As definições de cada parâmetro de entrada e dos resultados são:

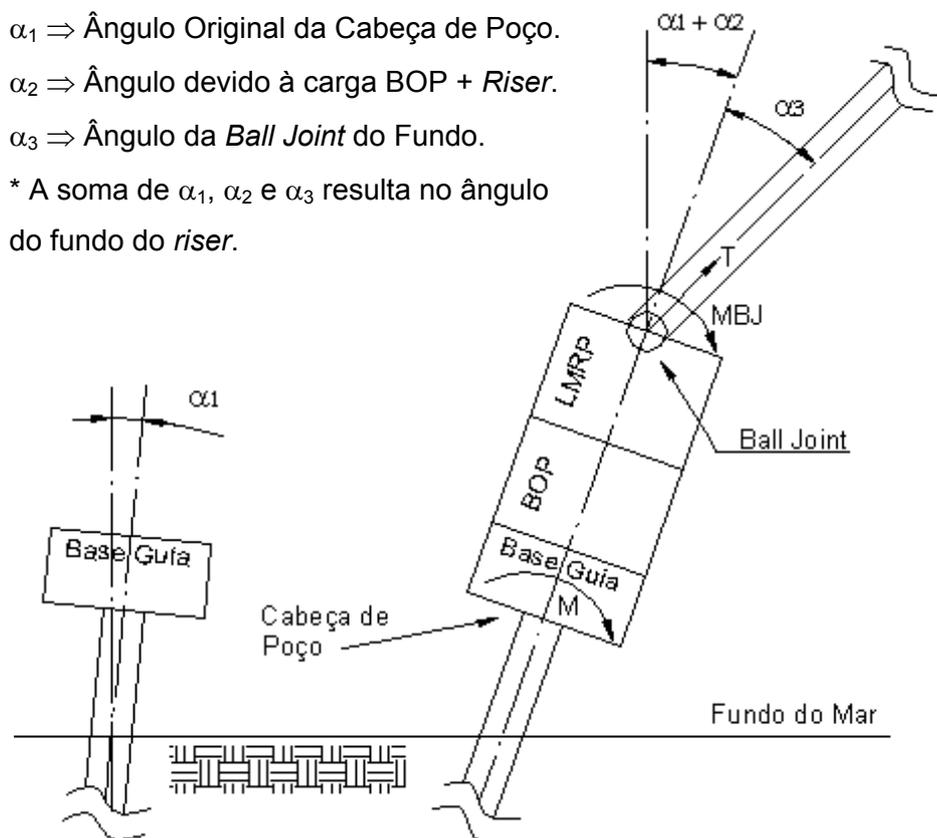
#### **a) Parâmetros de Entrada do DERP:**

- 1) *Water Depth* ⇒ Profundidade da água;
- 2) *Mud Sp. Gr.* ⇒ Densidade relativa do fluido de perfuração em relação à água (62,4 lbs/ft<sup>3</sup> ou 1 g/cm<sup>3</sup>);
- 3) *Static Offset* ⇒ Deslocamento horizontal da plataforma a partir da vertical da cabeça de poço;
- 4) *Top Tension* ⇒ Tração no topo do *riser*;
- 5) *Riser Length* ⇒ Comprimento do *riser*;
- 6) *Excitation Period* ⇒ Período de excitação da onda;
- 7) *Height of Wave* ⇒ Altura da onda;
- 8) *Surface Current* ⇒ Velocidade da corrente na superfície;

#### **b) Resultados do DERP:**

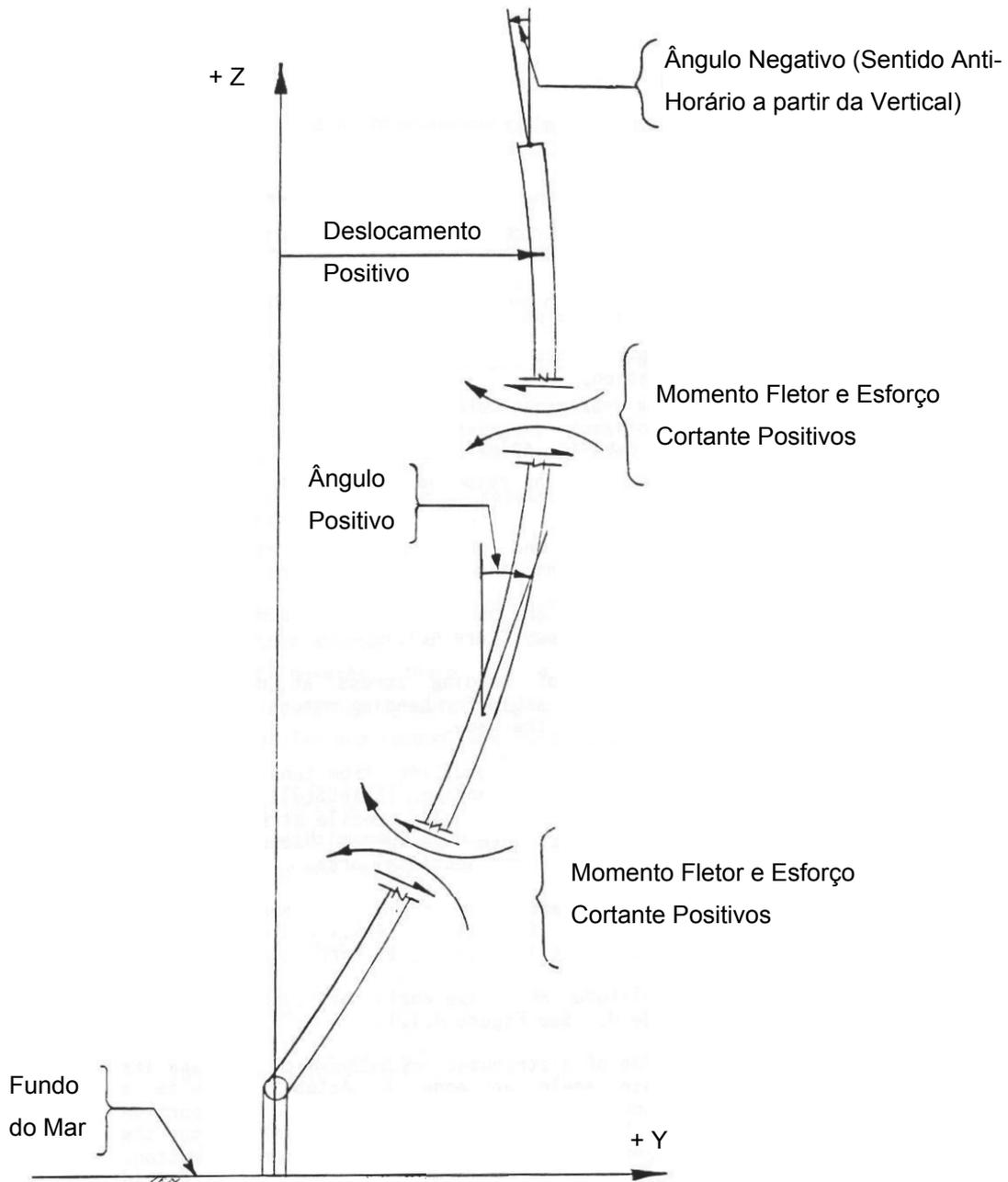
- 1) *Max Alt Stress* ⇒ Máxima tensão alternada, que é o valor máximo da tensão dinâmica calculada ao longo do *riser*. Corresponde à metade do range de tensões;
- 2) *From Top of Riser* ⇒ Posição a partir do topo do *riser*;
- 3) *Lower Ball Joint Angle* ⇒ Ângulo da *ball joint* do fundo (Figura 2.5);
- 4) *Actual Vertical Tension at Lower Ball Joint* ⇒ Tração real do *riser* na *ball joint* do fundo. *Top tension* menos a diferença entre o peso e o empuxo;
- 5) *Max Longitudinal Riser Stress* ⇒ Maior valor da soma da tensão axial com a tensão devido ao momento fletor ao longo do comprimento do *riser*;
- 6) *Max Stress Intensity* ⇒ Maior valor da diferença entre a maior e a menor tensão principal ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) ao longo do comprimento do *riser* (Anexo 2). Calculada em quatro pontos distintos, dois na parede interna (tração e compressão) e dois na externa (tração e compressão), assume-se o maior valor como resultado da saída de dados;
- 7) *Top Horizontal Force* ⇒ Resultante do esforço cortante aplicado na horizontal no topo do *riser*;
- 8) *Top Riser Angle* ⇒ Rotação do topo do *riser*, compreende o ângulo formado a partir da vertical da cabeça de poço (sem inclinação) até o *riser*, topo;
- 9) *Top Ball Joint Angle* ⇒ Ângulo da *ball joint* do topo, análogo ao ângulo da *ball joint* da base do *riser*;
- 10) *Intermediate Ball Joint Angle* ⇒ Ângulo de uma *ball joint* que se localiza numa região entre o topo e o fundo do *riser*. Este ângulo também é análogo aos ângulos das *ball joints* do topo e fundo;

- 11) *Slip Joint Stroke*  $\Rightarrow$  Curso da *Slip Joint* (Junta Telescópica) devido à tensão axial e a flexão. Este valor deve ser adicionado ao *heave* da embarcação. Um valor positivo corresponde a um movimento do anel deslizante para baixo, significando que uma diminuição gerada pela flexão é maior que a força de tração;
- 12) *Force in Spring J*  $\Rightarrow$  Força na mola usada para modelar o carregamento entre o *riser* e a embarcação. Esta força representa a reação do carregamento em qualquer componente estrutural representado pela mola. A letra “J” representa o número de identificação da mola;
- 13) *Bending Moment at Coord*  $\Rightarrow$  Momento fletor na coordenada especificada;
- 14) *Shear at Coord*  $\Rightarrow$  Esforço cortante na coordenada especificada;
- 15) *Max. Slope*  $\Rightarrow$  Máxima rotação do *riser*;
- 16) *Max. SI/Fy*  $\Rightarrow$  Máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento do *riser*;
- 17) *Max. Slope and Max. SI/Fy Location*  $\Rightarrow$  Coordenadas onde ocorreram a maior rotação e maior relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento respectivamente.



**Figura 2.5** - Definição dos Ângulos da *Ball Joint* do Fundo e do *Riser*, Modificado de [10].

A Figura 2.6 ilustra o sistema de coordenadas e a convenção de sinais para o deslocamento, rotação, momento e esforço cortante do DERP [4].



**Figura 2.6** - Sistema de Coordenadas e Convenção de Sinais para o Deslocamento, Rotação, Momento e Esforço Cortante do DERP [4].

As correntes marítimas exercem forças laterais no *riser* e *offset* na embarcação. Elas podem ser causadas pelos ventos, marés, correntes de circulação oceânicas, remoinhos e ondas internas. O projetista deve combinar vários perfis de corrente (Figura 2.7) com ondas para obter os carregamentos de projeto.

DAWSON [12] menciona que uma boa aproximação para um perfil de corrente triangular pode ser encontrado através da seguinte expressão:

$$U_c(y) = U_0 \cdot y/d \quad (2.3)$$

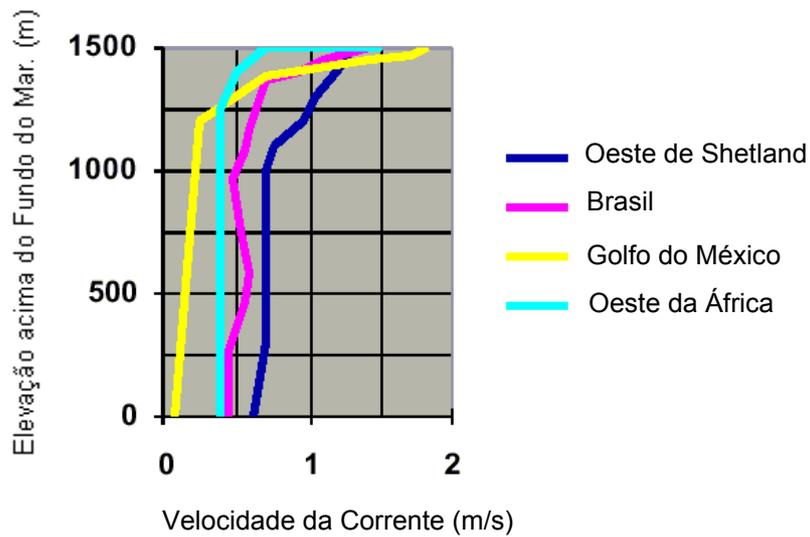
Onde:

$U_c \Rightarrow$  Velocidade da corrente, normal ao *riser*;

$U_0 \Rightarrow$  Velocidade da corrente na superfície, normal ao *riser*;

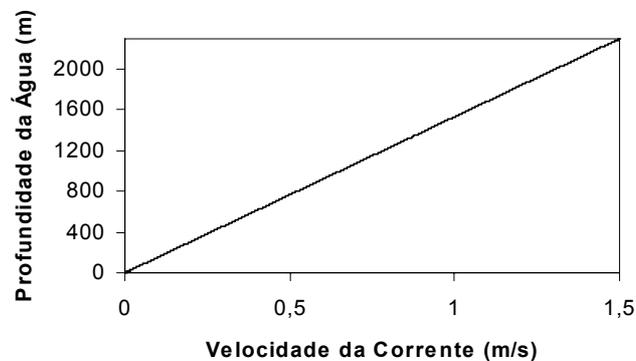
$y \Rightarrow$  Eixo coordenado vertical;

$d \Rightarrow$  Lâmina d'água.



**Figura 2.7** - Perfil de Corrente com Período de Retorno de 1 Ano [11].

A Figura 2.8 ilustra um perfil de corrente triangular obtido através da equação (2.3).



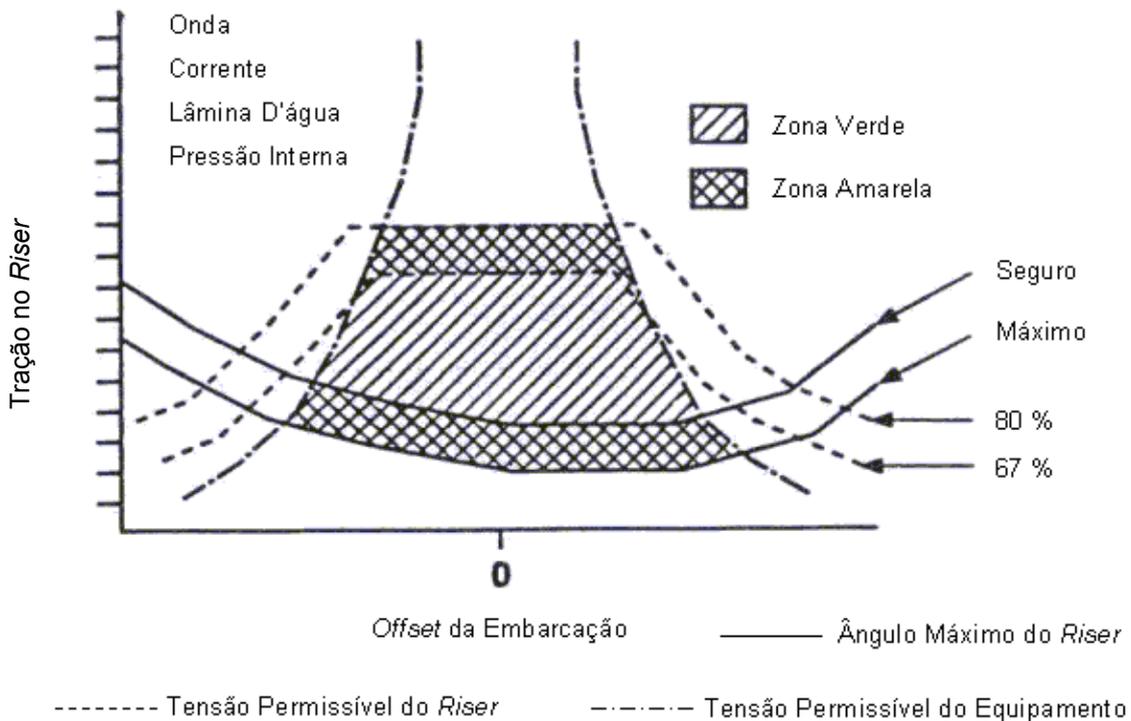
**Figura 2.8** - Perfil de Corrente Triangular Iniciando do Fundo do Mar.

As principais equações para análise de *riser*, encontradas na literatura, são apresentadas no Anexo 2.

## 2.7 - Janela de Operação

Uma forma usual da saída de uma análise de *riser* é a janela de operação que pode ser utilizada para manter os parâmetros de projeto no uso *offshore*. Existem diferentes tipos de janelas de operação e geralmente são gráficos bidimensionais que mostram os limites operacionais do *riser* em função de algum parâmetro relevante para a análise e do *offset* da embarcação. Estes parâmetros podem ser a tração no topo do *riser*, a altura de onda, a rotação da *flex joint*, etc. Os gráficos são delimitados por zonas permissíveis ou não, de acordo com os critérios estabelecidos e cada janela de operação é gerada para uma única condição ambiental (onda e corrente), profundidade d'água e pressão interna do *riser* devido ao fluido de perfuração.

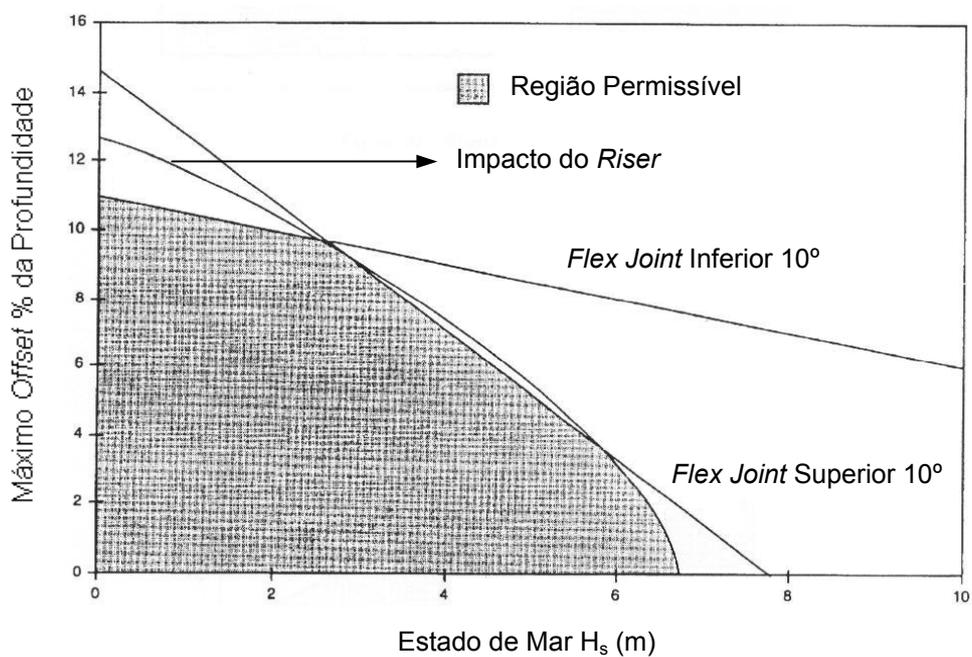
A API RP 17G [5] mostra a janela de operação para *risers* de completação e considera como limites operacionais os ângulos (seguro e máximo) e as tensões permissíveis do *riser* e seus equipamentos. As tensões no *riser* não devem exceder 67% e 80% da tensão de escoamento, conforme pode ser visto na Figura 2.9. As zonas permissíveis são representadas por zona verde e zona amarela. Fora das zonas permissíveis, as tensões e os carregamentos agindo no *riser* podem exceder os limites do projeto e operações para remediar ou para desconectar o *riser* podem ser necessárias, com a finalidade de evitar que problemas graves afetem os equipamentos de perfuração. As zonas permissíveis contêm uma faixa de condições de tração e *offset* da embarcação que podem facilmente ser monitorados e ajustados com as variações das condições ambientais. Apesar deste tipo de janela de operação ser específico para *riser* de completação, neste trabalho, os gráficos foram adaptados para *risers* de perfuração, com os seguintes limites operacionais: ângulos da *flex joint* do topo e fundo, máxima relação da *stress intensity* (Anexo 2) pela tensão de escoamento e curso da junta telescópica. Os valores dos critérios dos ângulos e tensão permissível foram obtidos a partir da API RP 16Q [13] e o curso da junta telescópica não deve exceder o permitido pelo fabricante. O fabricante da junta telescópica geralmente especifica um curso máximo de 50 a 55 ft (15,24 a 16,76 m).



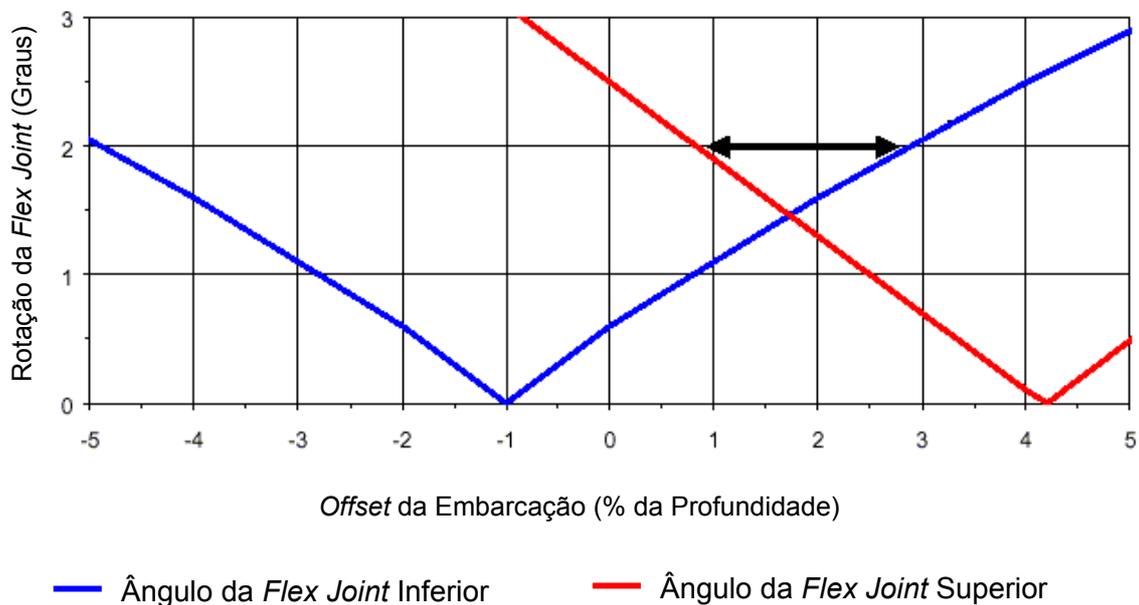
**Figura 2.9** - Janela de Operação com Tração no Riser Versus Offset da Embarcação [5].

A API RP 2RD [14] menciona que os limites de operação do riser de perfuração, para operações com o riser conectado, são determinados pelo projetista e podem ser representados por gráficos de máximo offset versus estado de mar (Figura 2.10). Estes gráficos geralmente mostram os níveis aceitáveis das excursões do riser para determinadas condições de operação. Os limites operacionais correspondem aos ângulos da flex joint do topo e fundo ( $10^\circ$ ) e a curva na qual o riser atinge a estrutura da embarcação. A interseção destes limites representa a região permissível para as operações seguras.

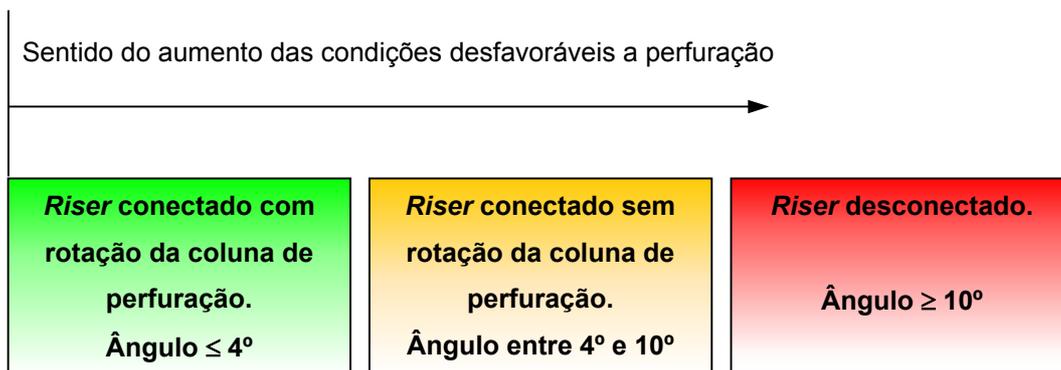
FARRANT e JAVED [15] exibem a janela de operação com os ângulos da flex joint do topo e fundo em função do offset da embarcação (Figura 2.11) e comentam que a rotação máxima da flex joint deve ser menor que  $\pm 9^\circ$ . A janela de operação da Figura 2.11 corresponde a uma única tração no topo do riser e os offsets permissíveis (envelope de perfuração) são aqueles que atendem os critérios adotados. O presente trabalho inclui este tipo de janela de operação com algumas modificações e considerando três configurações do riser. Estas configurações são esquematizadas na Figura 2.12 e os critérios dos ângulos foram obtidos de [13] e [14]. Maiores detalhes são apresentados no capítulo 4.



**Figura 2.10** - Janela de Operação com Máximo *Offset* Versus Estado de Mar (Altura de Onda) [14].



**Figura 2.11** - Janela de Operação para um Perfil de Corrente Colinear [15].



**Figura 2.12** - Configurações do *Riser* de Perfuração.

HOWELLS e WALTERS [16] comentam que apesar da API RP 16Q [13] considerar que o limite do ângulo da *flex joint* deve ser de  $2^\circ$  para valores médios e  $4^\circ$  para o máximo, alguns contratos são firmados com limites de ângulos de  $0,5^\circ$  a  $1^\circ$  na média para perfuração em águas profundas.

O trabalho de OSEN *et al.* [17] mostra que a janela de operação além de auxiliar os projetistas na determinação dos limites operacionais do *riser*, também pode contribuir para o posicionamento da embarcação com a finalidade de minimizar os momentos fletores nos conectores. A idéia foi de desenvolver uma interpretação gráfica dos dados ambientais reais para estabelecer limites operacionais mais precisos. Desta forma, o projeto de um sistema foi desenvolvido, através da instalação de sensores de deformação nas extremidades superior e inferior do *riser*, como pode ser visto na Figura 2.13. O sistema desenvolvido pode ser descrito da seguinte forma: as informações de deformação chegam à embarcação através do umbilical e são inseridas num computador. Este computador tem um programa específico, que interpreta os dados de deformação e os transforma em posicionamento requerido para a embarcação com o intuito de reduzir a deformação medida. Constam também um painel com ações a serem tomadas e as componentes das forças agindo no *riser*.

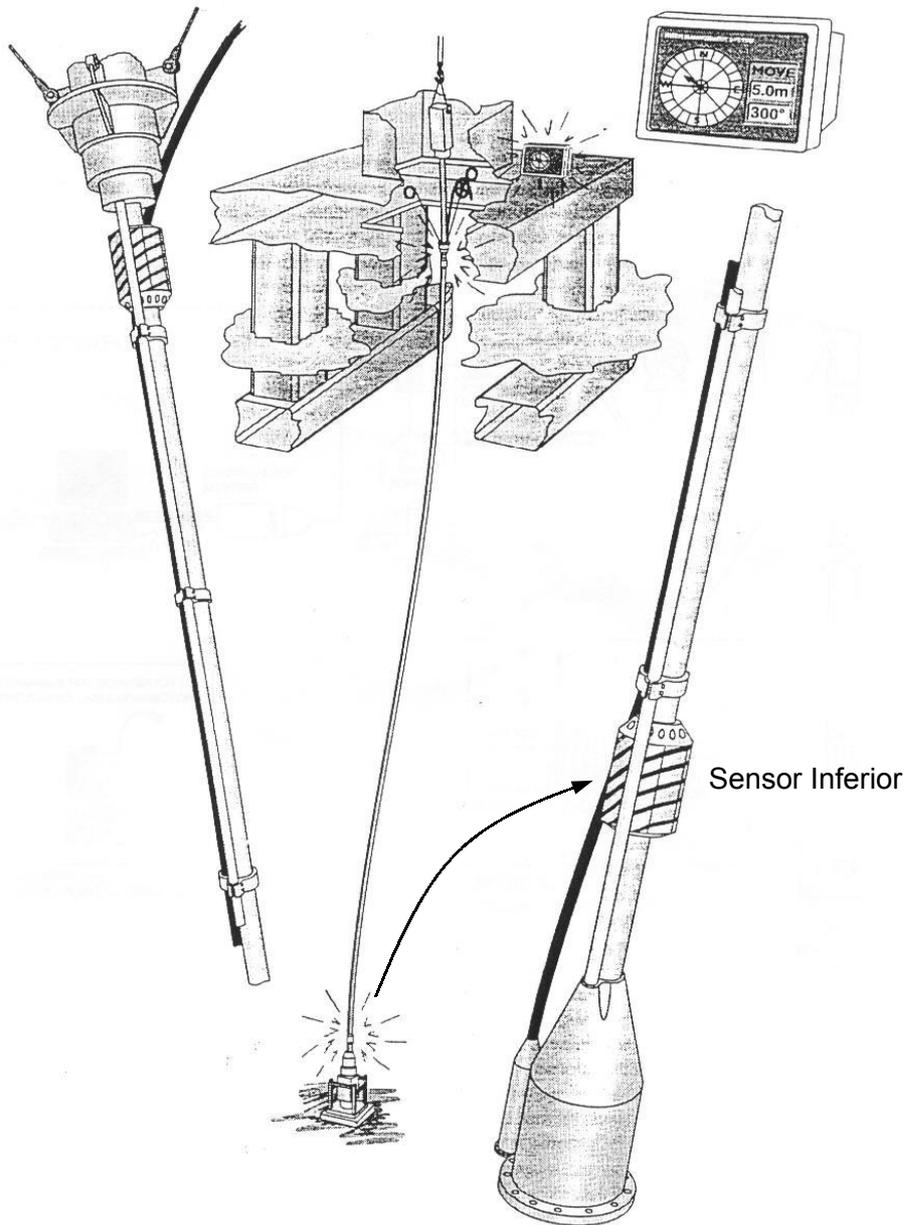


Figura 2.13 - Sensores de Deformação nas Extremidades Superior e Inferior do *Riser* [17].

## CAPÍTULO 3

### DESCRIÇÃO DO PÓS-PROCESSADOR

O pós-processador foi desenvolvido neste trabalho para realizar as seguintes tarefas: controle de qualidade, análises e construção das janelas de operação. Este sistema computacional foi projetado na linguagem de programação *visual basic*, utilizando-se o programa *Microsoft Visual Basic 6.0*, assim, proporcionando uma interface amigável com o usuário e gerando um programa executável. Para realizar as tarefas mencionadas anteriormente com organização dos dados foram desenvolvidos alguns formulários e rotinas computacionais principais.

#### 3.1 - Leitura dos Dados

A leitura dos dados foi organizada no formulário inicial do programa, como pode ser observado na Figura 3.1. Os dados oriundos do DERP [4], em arquivo texto, foram inseridos no pós-processador através do desenvolvimento de uma rotina de leitura e organização de dados. Estes dados foram separados com os títulos de entrada e resultados, parâmetros já mencionados na seção 2.6. Os botões de comando localizados na parte inferior do formulário servem para visualizar os registros, simulações que foram executadas no DERP. O menu “Arquivo”, no topo do formulário, serve para abrir um arquivo texto do DERP ou sair do sistema. A localização do arquivo texto, com relação ao disco rígido do computador, é visualizada abaixo do menu “Arquivo”, com o título de “Caminho do Arquivo”. Além disso, o formulário de leitura de dados tem a versatilidade de trabalhar com dois sistemas de unidades, o sistema internacional ou o sistema inglês.

Na tabela com o título Resultados existem duas colunas com os títulos “Min.” e “Máx.”. A coluna “Min.” mostra o menor valor de cada parâmetro das simulações e a coluna “Máx.” mostra o maior valor. Mais duas rotinas foram desenvolvidas para mostrar os valores destas colunas.

Constam ainda no formulário de leitura mais três botões de comando com os títulos: Qualidade, Análise e Sair, onde o botão “Qualidade” presta-se para fazer o controle de qualidade dos dados, o botão “Análise” para fazer as análises dos dados e o botão “Sair” para abandonar o sistema computacional.

**Leitura de Dados**

Arquivo

Caminho do Arquivo:

Sistema de Unidades:  
 SI  
 Inglês

**Entrada**

Water Depth(m)	Mud Sp. Gr.	Static Offset(PCNT)	Top Tension(N)	Riser Length(m)	Max Alt Stress(Pa)	From Top(m)
2.299,99	1,20	-6	4.441.999,65	2.342,42	20.533.310,00	49,38

Excitation Period(s)	Height of Wave(m)	Surface Current(m/s)
7,00	3,96	0,77

**Resultados**

Parameters	Unit	Static	Dynamic	Static+Dynamic	Min.	Máx.
Lower Ball Joint Angle	Deg	-1,13	0,00	1,13	0,01	272,97
Actual Vertical Tension at Lower Ball Joint	N	818.676,64	818.676,64	818.676,64	811.070,56	2.953.716,64
Max Longitudinal Riser Stress	Pa	155.020.285,00	160.136.375,00	166.017.810,00	157.433.535,00	4.586.740.165,00
Location of Max Long. Stress From Top of Riser	m	34,29	49,47	34,29	34,29	2.326,39
Max Stress Intensity	Pa	155.020.285,00	160.170.850,00	166.017.810,00	157.433.535,00	4.631.357.710,00
Location of Max Stress Int. from Top of Riser	m	34,29	49,47	34,29	34,29	2.326,39
Top Horizontal Force	N	-291.344,00	49.372,80	340.716,80	22.417,92	627.168,00
Top Riser Angle	Deg	0,00	0,16	0,16	0,16	1,37
Top Ball Joint Angle	Deg	3,66	0,61	4,27	0,57	7,78
Intermediate Ball Joint Angle	Deg	999,90	999,90	999,90	999,90	999,90
Slip Joint Stroke (Bending + Axial, No Heave)	m	5,15	-0,58	3,92	-1,05	1.365,38
Force in Spring	N	-1,311E-7	2,3E-8	1,541E-7	3,205E-8	3,191E-7
Bending Moment at 3,66 m	N.m			350.329,97	4.587,86	14.089.636,03
Shear at 3,66 m	N			17.916,54	235,74	310.492,64
Bending Moment at 2.338,61 m	N.m			37.616,65	5.065,08	68.584,70
Shear at 2.338,61 m	N			325.544,67	67.449,47	672.404,16
Max Slope at 1.742,11 m from bottom	Deg			8,54	2,22	335,06
Max Sl/Fy at 2.311,79 m from bottom	(...)			0,30	0,29	8,40

Figura 3.1 - Formulário de Leitura de Dados.

### 3.2 - Controle de Qualidade dos Dados

O controle de qualidade pode ser iniciado com um *click* no botão esquerdo do *mouse* sobre o botão de comando “Qualidade” (Figura 3.1). Após o *click*, o formulário “Qualidade dos Dados” surge (Figura 3.2).

**Qualidade dos Dados**

Editar

X

Y  Lower Ball Joint Angle

Plot	Índice	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	5	HW		3,96	7,92	m	
2	6	LBJA		0,01	272,97	Deg	10

Figura 3.2 - Formulário do Controle de Qualidade dos Dados.

O formulário “Qualidade dos Dados” prepara a montagem do gráfico da qualidade dos dados, que apresenta no eixo x as simulações e no y os parâmetros que se deseja verificar a qualidade. As etapas para escolha do parâmetro do eixo y são:

- 1) Dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* no botão *drop down*, que contém os parâmetros de entrada e saída do DERP [4];
- 2) Escolher o parâmetro que deseja-se verificar, através de um *click* do mouse;
- 3) Dar um *click* no botão de comando “Aceitar”. Após o *click* no botão “Aceitar”, o parâmetro escolhido é adicionado na tabela do formulário em questão.

Para adicionar mais de um parâmetro ao eixo y, basta-se repetir as etapas 1, 2 e 3 citadas anteriormente para cada parâmetro.

A última coluna da tabela da Figura 3.2, com o título “Fator Esc.”, pode conter ou não algum valor. Se existir algum valor, então o parâmetro escolhido para o eixo y que encontra-se na mesma direção deste valor será dividido pelo “Fator Esc.” em cada simulação.

O botão de comando “Limpar” apaga uma variável da tabela dos parâmetros do eixo y da seguinte forma:

- 1) Dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* na primeira coluna da tabela (com o título *Plot*) e na direção do parâmetro que se deseja apagar;
- 2) Dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* no botão “Limpar”.

Os botões de comando “Fechar” e “Ok” servem para:

- 3) Fechar - Encerra o formulário “Qualidade dos Dados”;
- 4) Ok - Plota os parâmetros selecionados num gráfico x-y, denominado gráfico qualidade dos dados.

O menu “Editar” apresenta dois sub menus: Copiar e Colar, que possibilitam copiar e colar valores das células para a coluna “Fator Esc.”.

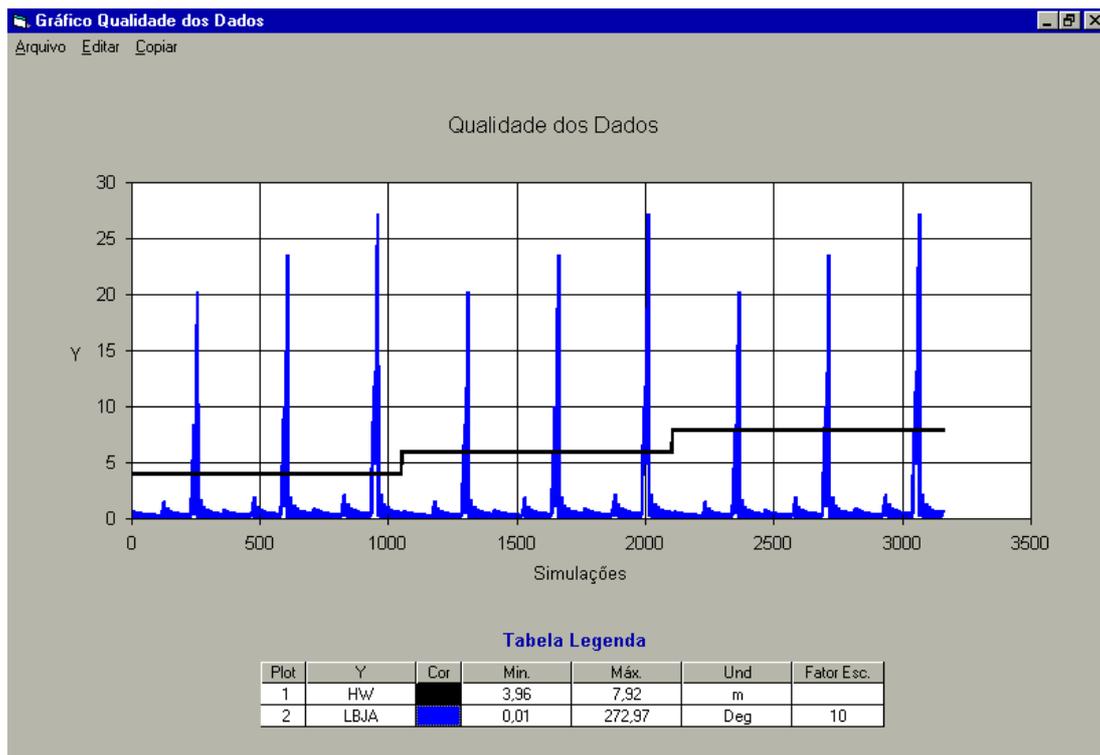
Apesar do formulário “Leitura de Dados” apresentar o valor estático (*static*), dinâmico (*dynamic*) e estático mais dinâmico (*static + dynamic*) discriminadamente (Figura 3.1), o pós-processador utiliza somente o valor estático mais dinâmico para o controle de qualidade e análises.

Se um *click* do *mouse* no botão “Ok” for dado, então a Figura 3.3 surge, a qual ilustra o formulário “Gráfico Qualidade dos Dados”.

A tabela Legenda exhibe os parâmetros escolhidos para o eixo y em função das simulações e as funções dos menus são:

- a) O menu “Arquivo” possibilita fechar o formulário “Gráfico Qualidade dos Dados” ou encerrar o uso do pós-processador;

- b) O menu “Editar” permite alterar a visualização da faixa de valores dos eixos da simulação e/ou y, pois este menu dá acesso ao formulário “Escala do Gráfico” (Figura 3.4), que apresenta os valores extremos dos eixos coordenados, que por sua vez podem ser alterados pelo usuário;
- c) O menu “Copiar” possibilita copiar o gráfico Qualidade dos Dados ou a tabela Legenda para a área de transferência.



**Figura 3.3** - Formulário do Gráfico do Controle de Qualidade dos Dados.

**Figura 3.4** - Formulário da Escala do Gráfico.

### 3.3 - Análise dos Dados

As análises podem ser iniciadas com um *click* no botão esquerdo do *mouse* sobre o botão de comando “Análise” (Figura 3.1). Após o *click*, o formulário “Análise” surge (Figura 3.5). No topo deste formulário encontram-se três menus com as seguintes funções:

- Menu Arquivo - Presta-se para abrir um novo arquivo texto do DERP sem voltar ao formulário “Leitura de Dados” (Figura 3.1) ou para abandonar o sistema;
- Menu Critérios - Permite editar o formulário “Critérios” (Figura 3.6). O formulário “Critérios” apresenta os critérios do *riser* de perfuração nas operações de perfuração (*drilling*), nas operações de perfuração sem rotação da coluna de perfuração (*non-drilling*) e nas simulações do DERP (máxima rotação). Além disso, o formulário “Critérios” possui o menu “Ativar”, que permite selecionar o tipo de operação, ou seja, perfuração ou perfuração sem rotação da coluna;
- Menu Sistema de Unidades - Possibilita alternar entre os sistemas de medidas internacional ou inglês, atualizando e sem a necessidade de voltar ao formulário “Leitura de Dados”.

**Janela de Operação**

Janela	Water Depth (m)	Mud sp. gr.	Excitation Period (s)	Height of Wave (m)	Surface Current (m/s)
1	2.299,99	1,20	7,00	3,96	0,77
2	2.299,99	1,32	7,00	3,96	0,77
3	2.299,99	1,44	7,00	3,96	0,77
4	2.299,99	1,20	7,00	3,96	0,90
5	2.299,99	1,32	7,00	3,96	0,90
6	2.299,99	1,44	7,00	3,96	0,90
7	2.299,99	1,20	7,00	3,96	1,03
8	2.299,99	1,32	7,00	3,96	1,03
9	2.299,99	1,44	7,00	3,96	1,03
10	2.299,99	1,20	9,00	5,94	0,77

**Resultados**

Symbol	Parameters	Unit	Values	Min.	Max.
LBJA	Lower Ball Joint Angle	Deg		0,03	7,53
AVT	Actual Vertical Tension at Lower Ball Joint	N		818.676,64	2.953.716,64
MLRS	Max Longitudinal Riser Stress from Top of Riser	Pa		163.018.485,00	235.395.300,00
MSI	Max Stress Intensity from Top of Riser	Pa		163.052.960,00	235.429.775,00
THF	Top Horizontal Force	N		69.833,60	475.936,00
TRA	Top Riser Angle	Deg		0,16	0,16
TBJA	Top Ball Joint Angle	Deg		0,57	4,27
IBJA	Intermediate Ball Joint Angle	Deg		999,90	999,90
SJS	Slip Joint Stroke (Bending + Axial, No Heave)	m		-1,05	8,05
FIS	Force in Spring	N		3,205E-8	2,101E-7
BMC1	Bending Moment at 3,66 m	N.m		24.121,51	4.167.671,63
ShearC1	Shear at 3,66 m	N		1.512,32	263.592,93
BMC2	Bending Moment at 2.338,61 m	N.m		5.065,08	37.616,65
ShearC2	Shear at 2.338,61 m	N		67.449,47	442.580,45
MS	Max Slope	Deg		2,22	9,55
MSL	Max Slope Location from bottom	m		58,70	2.308,74
MSIFY	Max SI/Fy	(-)		0,30	0,43
MSIFYL	Max SI/Fy Location from bottom	m		1.742,11	2.311,79

Figura 3.5 - Formulário das Análises.

O formulário “Análise” (Figura 3.5) contém duas tabelas com os títulos: Janela de Operação e Resultados. Para construir a tabela Janela de Operação foi desenvolvida uma rotina que separa, para cada janela, as simulações que apresentam os mesmos valores para a lâmina d’água, fluido de perfuração, período de excitação da onda, altura de onda e velocidade da corrente na superfície. Para a tabela Resultados foi desenvolvida uma rotina que mostra os valores mínimos e máximos dos parâmetros nas duas últimas colunas respectivamente. Os valores das duas últimas colunas da tabela Resultados correspondem à janela número um, e caso haja a necessidade de verificar os valores das demais janelas, basta-se dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* sobre a célula com o número da janela desejada, ou utilizar as setas do teclado.

	Min.	Max.	
Flex/Ball JT. Angle (Upr and Lwr)	-4,00	4,00	Deg
Allowable Stress		0,40	de $\sigma_y$
Stroke	-6,71	6,71	m

Figura 3.6 - Formulário dos Critérios.

A barra de rolagem da tabela Janela de Operação permite visualizar as janelas que por ventura estiverem ocultas.

O objetivo principal do formulário “Análise”, como o próprio nome sugere, é analisar as janelas de operação através de gráficos, então os quatro tipos de gráficos foram criados: “Critérios e/ou Valores - Curvas”, “Critérios - Área”, “Ângulos x *Static Offset*” e “Critérios - Contorno”. Estes quatro tipos de gráficos podem ser escolhidos a partir do botão *drop down* da caixa de combinação com o título de tipos de gráficos (Figura 3.7). Os principais detalhes dos gráficos são descritos a seguir:

**1) Critérios e/ou Valores - Curvas** ⇒ Este tipo de gráfico quando selecionado inclui automaticamente uma coluna à esquerda da tabela Janela de Operação, para que possa ser escolhida uma janela, e outra coluna também à esquerda, da tabela

Resultados. Estas duas colunas possuem a letra “L” como título e com um *click* do botão esquerdo do *mouse* sobre esta letra pode-se limpar todas as células marcadas com “X”. A coluna incluída na tabela Resultados já vem com quatro parâmetros selecionados (Figura 3.7). Estes quatro parâmetros selecionados são os critérios dos ângulos da *flex joint* do topo e fundo (TBJA e LBJA), máxima relação das tensões (MSIFY) e curso da junta telescópica (SJS), que se encontram no formulário dos critérios (Figura 3.6) como: *flex/ball JT. angle*, *allowable stress* e *stroke* respectivamente. Somente uma janela deve ser selecionada, porém, mais de um parâmetro da tabela Resultados pode ser selecionado, todavia, se o parâmetro (ou parâmetros) escolhido não for um critério presente no formulário “Critérios”, o seu valor deve ser informado na coluna valores (*values*), se não cinco curvas para cada parâmetro selecionado, com valores arbitrários serão impressos no formulário do tipo de gráfico escolhido. Para construir o gráfico escolhido basta-se dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* sobre o botão de comando “Construir Gráfico”, que a Figura 3.8 surge.

The screenshot shows the 'Análise' software interface. It features a menu bar with 'Arquivo', 'Critérios', and 'Sistema de Unidades'. Below the menu is the 'Janela de Operação' section, which contains a table with columns: L, Janela, Water Depth (m), Mud sp. gr., Excitation Period (s), Height of Wave (m), and Surface Current (m/s). The first row is marked with an 'X' in the 'L' column. To the right of this table is a 'Tipos de Gráficos' section with a dropdown menu set to 'Critérios e/ou valores - Curvas' and a 'Construir Gráfico' button. Below this is a 'Caixa de Combinação' section. The 'Resultados' section at the bottom contains a table with columns: L, Symbol, Parameters, Unit, Values, Min., and Max. Several rows in this table are marked with an 'X' in the 'L' column.

L	Janela	Water Depth (m)	Mud sp. gr.	Excitation Period (s)	Height of Wave (m)	Surface Current (m/s)
X	1	2.299,99	1,20	7,00	3,96	0,77
	2	2.299,99	1,32	7,00	3,96	0,77
	3	2.299,99	1,44	7,00	3,96	0,77
	4	2.299,99	1,20	7,00	3,96	0,90
	5	2.299,99	1,32	7,00	3,96	0,90
	6	2.299,99	1,44	7,00	3,96	0,90
	7	2.299,99	1,20	7,00	3,96	1,03
	8	2.299,99	1,32	7,00	3,96	1,03
	9	2.299,99	1,44	7,00	3,96	1,03
	10	2.299,99	1,20	9,00	5,94	0,77

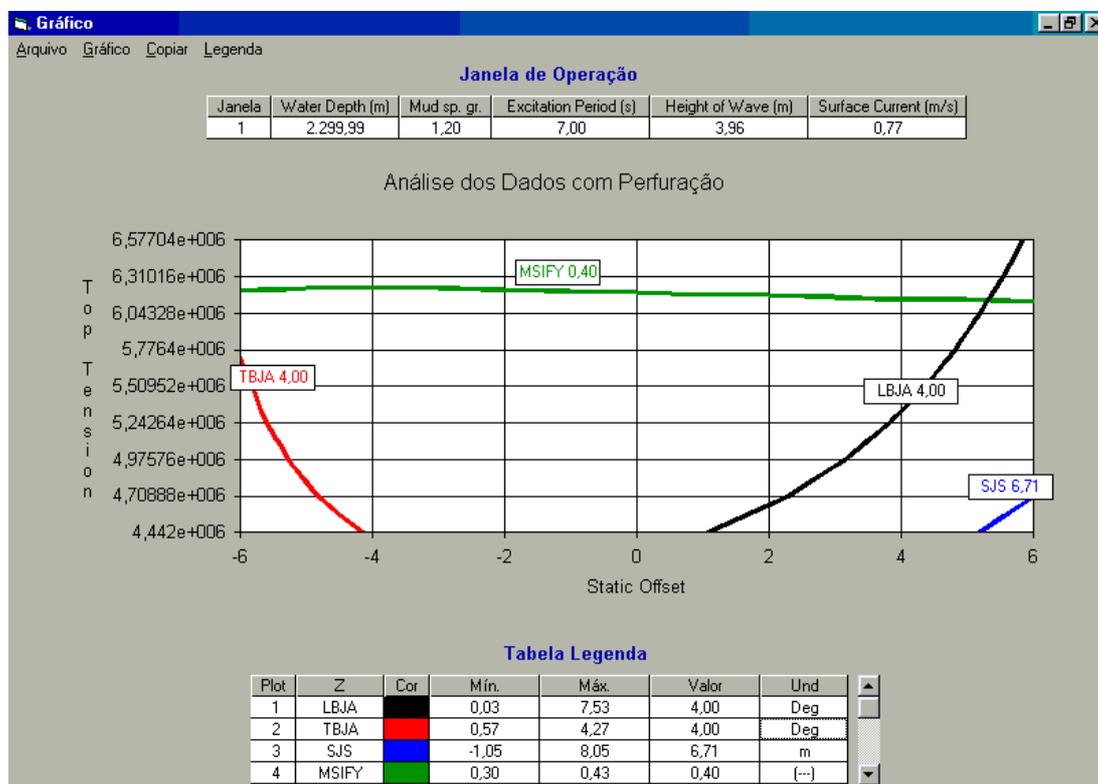
L	Symbol	Parameters	Unit	Values	Min.	Max.
X	LBJA	Lower Ball Joint Angle	Deg		0,03	7,53
	AVT	Actual Vertical Tension at Lower Ball Joint	N		818.676,64	2.953.716,64
	MLRS	Max Longitudinal Riser Stress from Top of Riser	Pa		163.018.485,00	235.395.300,00
	MSI	Max Stress Intensity from Top of Riser	Pa		163.052.960,00	235.429.775,00
	THF	Top Horizontal Force	N		69.833,60	475.936,00
	TRA	Top Riser Angle	Deg		0,16	0,16
X	TBJA	Top Ball Joint Angle	Deg		0,57	4,27
	IBJA	Intermediate Ball Joint Angle	Deg		999,90	999,90
X	SJS	Slip Joint Stroke (Bending + Axial, No Heave)	m		-1,05	8,05
	FIS	Force in Spring	N		3,205E-8	2,101E-7
	BMC1	Bending Moment at 3,66 m	N.m		24.121,51	4.167.671,63
	ShearC1	Shear at 3,66 m	N		1.512,32	263.592,93
	BMC2	Bending Moment at 2.338,61 m	N.m		5.065,08	37.616,65
	ShearC2	Shear at 2.338,61 m	N		67.449,47	442.580,45
	MS	Max Slope	Deg		2,22	9,55
	MSL	Max Slope Location from bottom	m		58,70	2.308,74
X	MSIFY	Max SI/Fy	(--)		0,30	0,43
	MSIFYL	Max SI/Fy Location from bottom	m		1.742,11	2.311,79

Figura 3.7 - Formulário “Análise”, Tipo de Gráfico Critérios e/ou Valores - Curvas .

A Figura 3.8 apresenta duas tabelas, a tabela com os dados referentes à janela de operação escolhida para a análise e a tabela Legenda com informações das cores

das curvas para identificação dos parâmetros no gráfico, dos valores mínimo e máximo dos parâmetros de controle e dos valores dos critérios. As funções dos menus do topo da Figura 3.8 são:

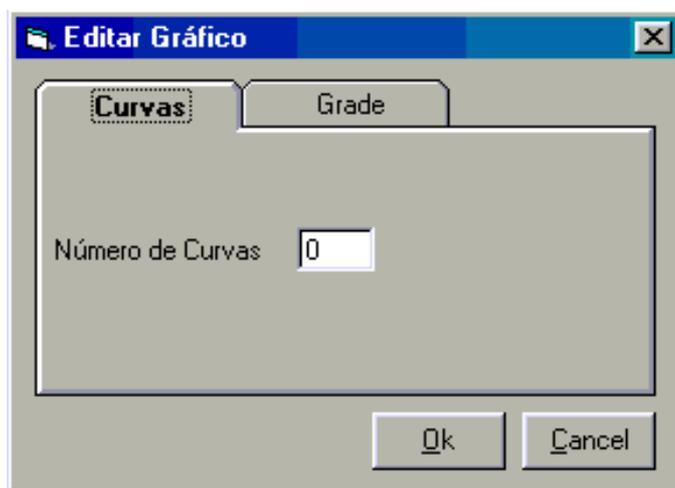
- Menu Arquivo - Permite o abandono do sistema;
- Menu Gráfico - Possibilita editar o formulário "Editar Gráfico" (Figura 3.9), ou seja, alterar o número de curvas e exibir ou não as linhas de grade do gráfico;
- Menu Copiar - Presta-se para copiar a tabela Janela de Operação ou a tabela Legenda para a área de transferência;
- Menu Legenda - Pode criar, apagar, reduzir e aumentar a legenda das curvas do gráfico.



**Figura 3.8** - Formulário do Tipo de Gráfico Critérios e/ou Valores - Curvas .

O gráfico da Figura 3.8 mostra quatro curvas, para a construção de cada curva foi desenvolvida uma rotina que faz várias interpolações lineares para o *offset* estático da embarcação e tração no topo do *riser* para cada parâmetro, são as conhecidas curvas de nível. Outra rotina para garantir que valores superiores ao estipulado no formulário "Critérios" para a máxima rotação do *riser* (Figura 3.6, na guia DERP) não fossem computados também foi desenvolvida, ou seja, as simulações que

apresentassem máxima rotação do *riser* superiores ao critério estabelecido não eram incluídas nos cálculos das interpolações lineares.



**Figura 3.9** - Formulário "Editar Gráfico".

**2) Critérios - Área** ⇒ Este tipo de gráfico quando selecionado, no formulário "Análise", inclui automaticamente uma coluna à esquerda da tabela Janela de Operação, para que possa ser escolhida uma janela, e oculta outra coluna também à esquerda, da tabela Resultados. Somente uma janela deve ser selecionada. Este tipo de gráfico é bem semelhante ao mencionado anteriormente, sendo que, a única diferença é o preenchimento com a cor verde da região onde todos os critérios são válidos. Para construir o gráfico escolhido basta-se dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* sobre o botão de comando "Construir Gráfico", que a Figura 3.10 surge.

Para que houvesse o preenchimento com a cor verde foi desenvolvida uma rotina, a qual imprime pares ordenados de valores interpolados de *offset* e tração no topo que estão de acordo com os critérios estabelecidos. Apesar da rotina imprimir a região válida, o tempo computacional para preenchimento apresentou valores elevados, principalmente para as maiores regiões.

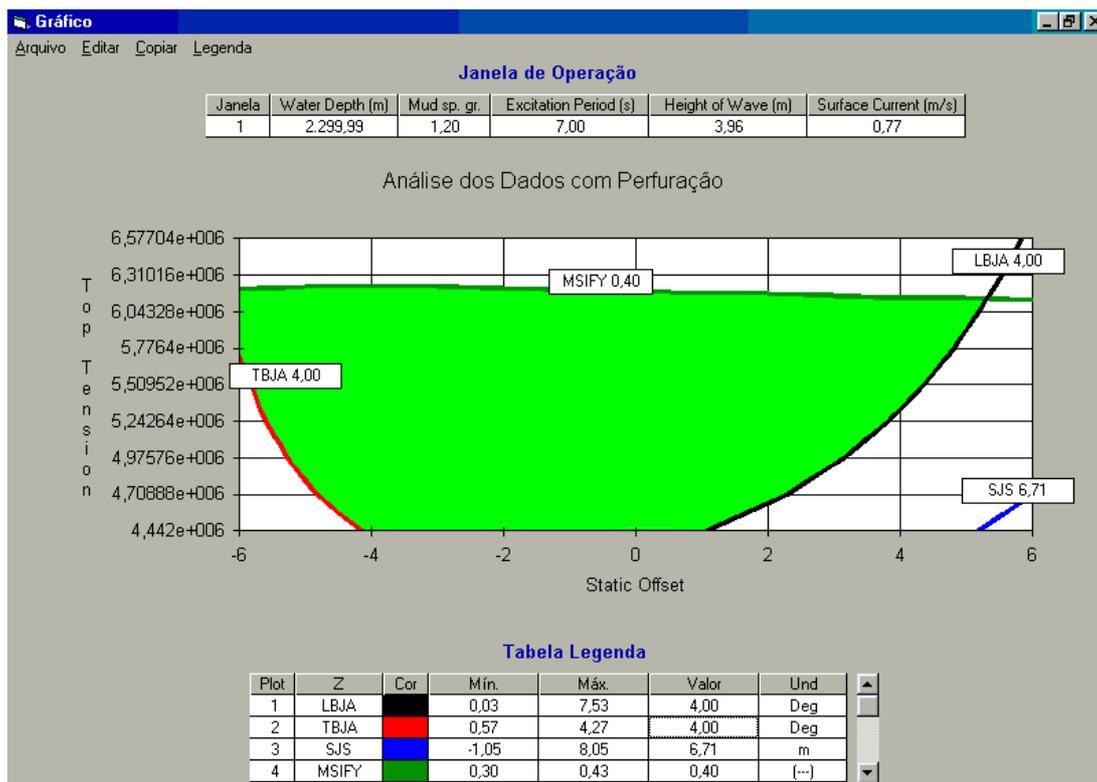


Figura 3.10 - Formulário do Tipo de Gráfico Critérios - Área.

3) **Ângulos X Static Offset** ⇒ Este tipo de gráfico quando selecionado, no formulário “Análise”, inclui automaticamente uma coluna à esquerda da tabela Janela de Operação, para que possa ser escolhida uma janela, e substitui automaticamente a tabela Resultados pela tabela “Mínimos e Máximos: *Static Offset* e *Top Tension*” (Figura 3.11). Somente uma janela deve ser selecionada.

Para construir o gráfico escolhido basta-se dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* sobre o botão de comando “Construir Gráfico”, que a Figura 3.12 surge.

A Figura 3.12 ilustra duas tabelas, a tabela com os dados referentes a janela de operação escolhida para a análise e a tabela Legenda que apresenta os valores mínimos e máximos dos ângulos da *flex joint* do topo e fundo para a janela selecionada, as cores das curvas para identificação dos parâmetros no gráfico, as trações no topo e o “Fator Esc.”. O “Fator Esc.” é um fator que quando assumido pode normalizar o parâmetro escolhido para o eixo y; basta digitar um valor na última coluna da tabela Legenda e pressionar a tecla *enter* do teclado que os valores das simulações do parâmetro em questão são divididos pelo “Fator Esc.”. As funções dos menus do topo da Figura 3.12 são:

- a) Menu Arquivo - Permite o abandono do sistema;

- b) Menu Editar - Possibilita copiar e colar valores das células da tabela Legenda e editar o formulário “Escala do Gráfico”, semelhante ao formulário da Figura 3.4;
- c) Menu Copiar - Presta-se para copiar a tabela Janela de Operação ou a tabela Legenda para a área de transferência;
- d) Menu Legenda - Pode criar, apagar, reduzir e aumentar a legenda das curvas do gráfico.

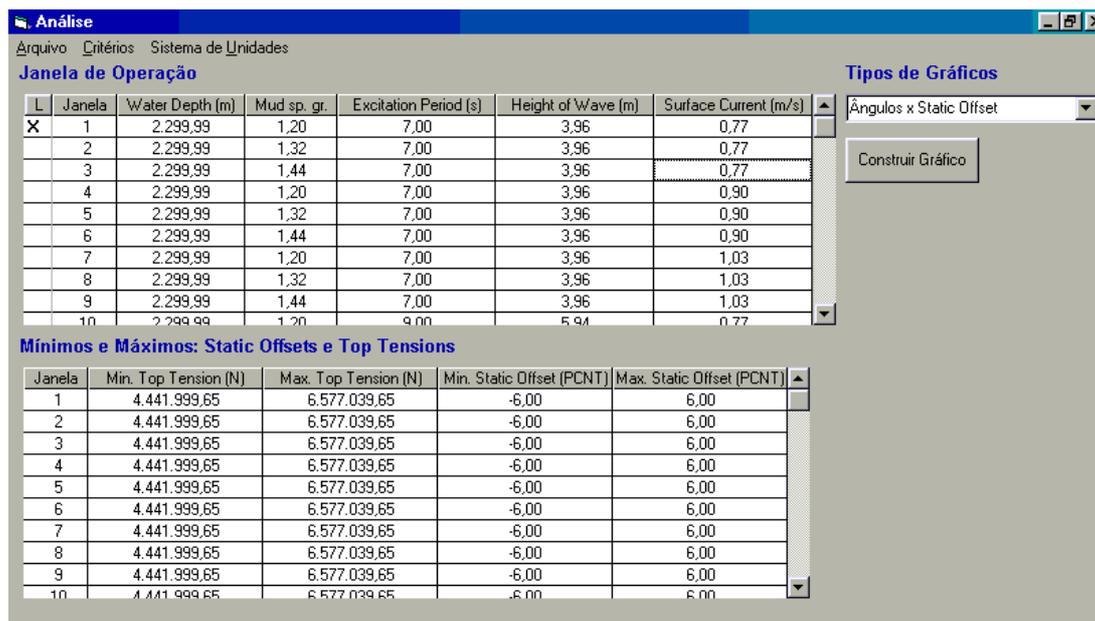


Figura 3.11 - Formulário “Análise”, Tipo de Gráfico Ângulos X Static Offset.

As curvas em vermelho e azul do gráfico da Figura 3.12 são os valores dos ângulos da *flex joint* do topo e fundo em função do *offset* da embarcação para a menor e maior tração no topo da janela de operação escolhida. Já as curvas em verde e marrom são os critérios dos ângulos da *flex joint* superior e inferior, a verde é o critério para perfuração e a marrom é o critério para perfuração sem rotação da coluna de perfuração. Estes dois critérios são apenas valores para comparação visual com as simulações das curvas em vermelho e azul e podem ser alterados no formulário “Critérios” (Figura 3.6).

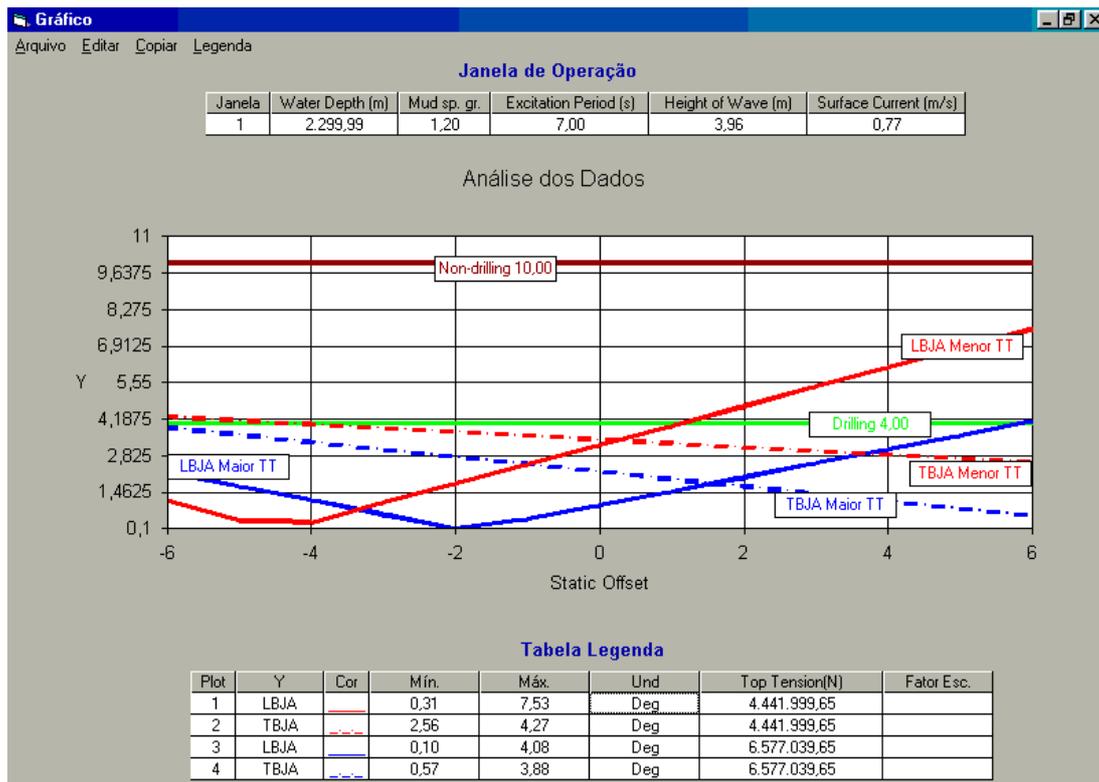
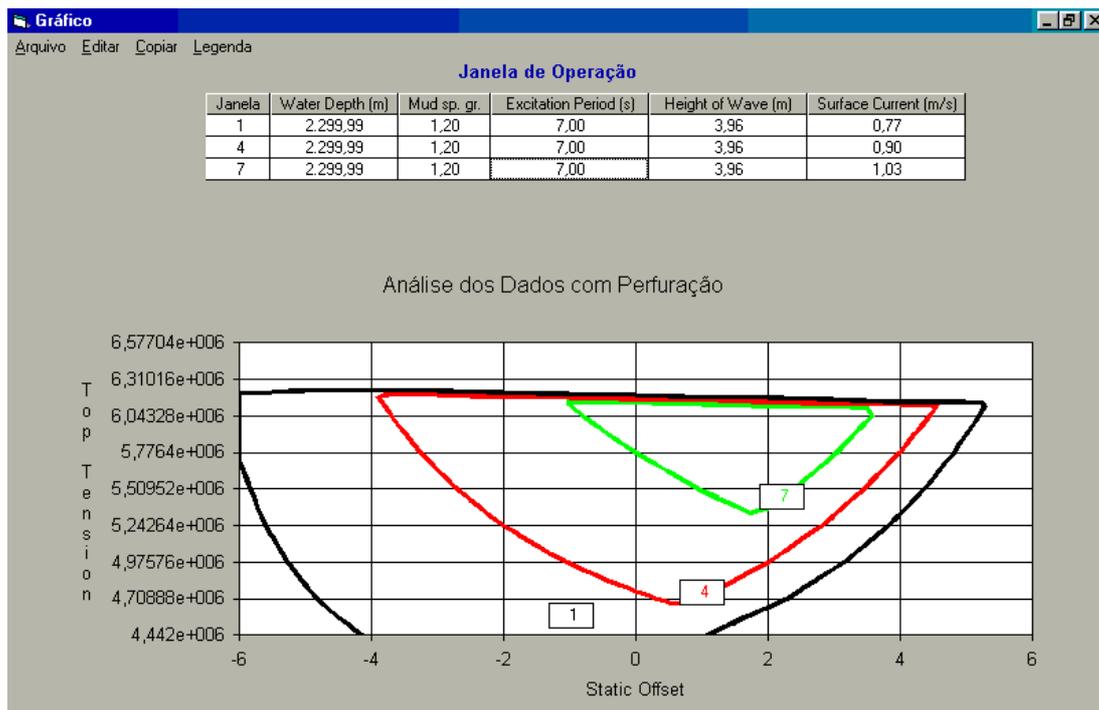


Figura 3.12 - Formulário do Tipo de Gráfico Ângulos X *Static Offset*.

**4) Critérios - Contorno** ⇒ Este tipo de gráfico quando selecionado, no formulário “Análise”, inclui automaticamente uma coluna à esquerda da tabela Janela de Operação, para que possa ser escolhida uma ou mais janelas, e oculta outra coluna também à esquerda, da tabela Resultados. A coluna valores (*values*), da tabela Resultados, não possui efeito e para construir o gráfico escolhido basta-se dar um *click* com o botão esquerdo do *mouse* sobre o botão de comando “Construir Gráfico”, que a Figura 3.13 surge.

A Figura 3.13 apresenta uma tabela com os dados de três janelas de operação escolhidas para a análise e as funções dos menus do topo são:

- Menu Arquivo - Permite o abandono do sistema;
- Menu Editar - Possibilita copiar e colar valores das células da tabela Legenda e editar o formulário “Escala do Gráfico”, semelhante ao formulário da Figura 3.4;
- Menu Copiar - Presta-se para copiar a tabela Janela de Operação ou a tabela Legenda para a área de transferência;
- Menu Legenda - Pode criar, apagar, reduzir e aumentar a legenda das curvas do gráfico.



**Figura 3.13** - Formulário do Tipo de Gráfico Critérios - Contorno.

O gráfico da Figura 3.13 mostra três janelas de operação, este gráfico é semelhante ao gráfico da Figura 3.8. A única diferença é que a rotina de interpolação dos *offsets* e trações no topo para cada parâmetro só inclui no cálculo os valores que respeitam todos os critérios de controle e o resultado da interpolação é exibido numa única curva.

Este tipo de gráfico também executa a rotina do gráfico da Figura 3.8, que impede que valores superiores ao critério da máxima rotação do *riser* participem dos cálculos das interpolações.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS DO PÓS-PROCESSAMENTO

O pós-processador foi utilizado para fazer o controle de qualidade das simulações oriundas do DERP [3] e [4], analisar o comportamento de alguns parâmetros e construir as janelas de operação para o *riser* de perfuração. Estas três tarefas foram executadas para ondas do tipo regulares.

Deve-se destacar que as conclusões obtidas das análises realizadas correspondem somente à configuração estudada, não sendo necessariamente válidas para outras configurações.

#### 4.1 - Principais Considerações

Foi adotado para o estudo o *riser* de perfuração da plataforma semi-submersível Stena Tay, ilustrada na Figura 4.1 e operando na Bacia de Campos a 2.300 m de lâmina d'água. As principais informações desta plataforma foram obtidas em [10].

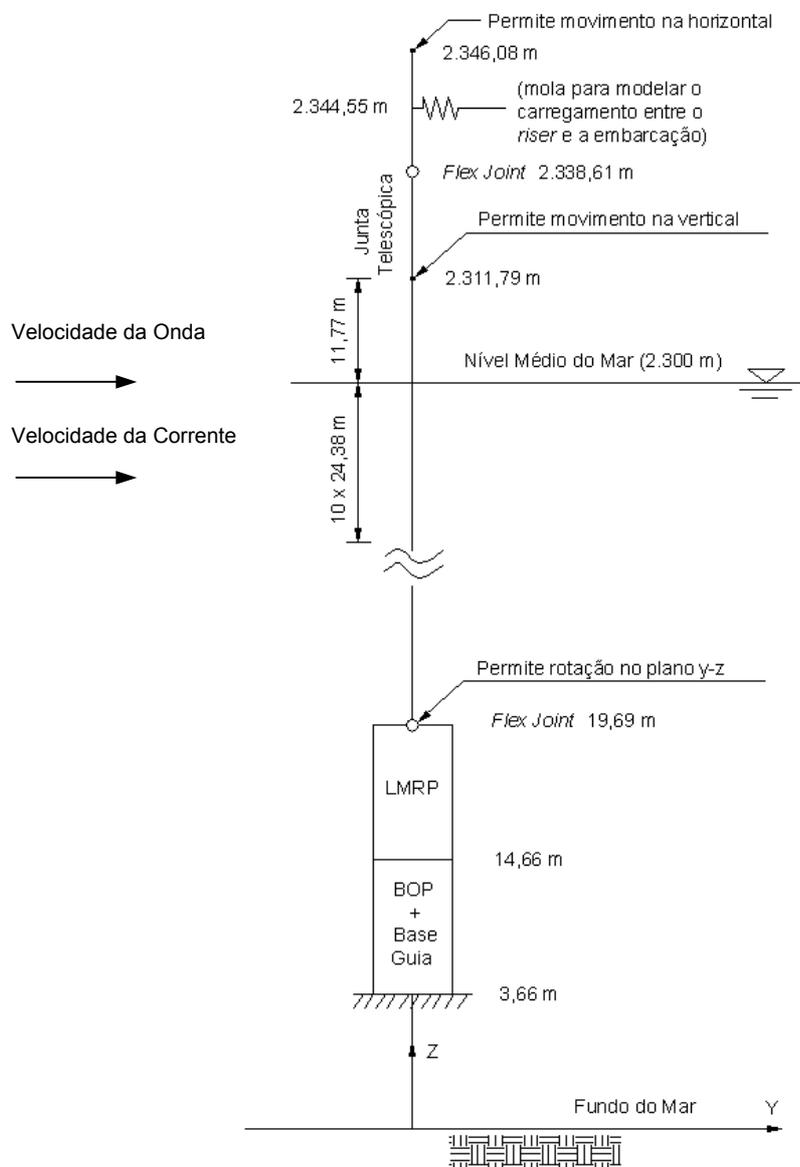


**Figura 4.1** - Plataforma Semi-submersível Stena Tay [10].

Para o controle de qualidade, análise e construção das janelas de operação foram utilizados os parâmetros de entrada e saída do DERP descritos na seção 2.6.

Os valores dos parâmetros de entrada assumidos para o estudo se aproximam das reais condições ambientais da região em questão e reais condições operacionais da plataforma semi-submersível Stena Tay. As condições ambientais (onda e corrente) foram consideradas com 1 ano de período de recorrência.

O modelo do sistema em estudo encontra-se resumido na Figura 4.2, com o efeito da onda e da corrente agindo simultaneamente no sentido positivo do eixo coordenado y. O perfil de corrente adotado corresponde a um perfil triangular e a onda foi modelada de acordo com a teoria linear de Airy.



**Figura 4.2** - Modelo do Sistema BOP, LMRP e Riser de Perfuração, Modificado de [10].

As principais considerações para o pós-processamento foram:

- ✓ As simulações que apresentaram máxima rotação do *riser* (MS) com valores superiores a 15° foram assumidas como simulações imprecisas, já que, o programa de análise de *riser* utilizado, o DERP [4], perde precisão a partir deste limite;
- ✓ O *riser* de perfuração foi analisado para o modo conectado com perfuração;
- ✓ O pós-processador considerou a resposta estática mais a dinâmica dos parâmetros de saída do DERP [4].

Algumas informações adicionais do *riser* de perfuração e seus componentes encontram-se no Anexo 3.

#### 4.2 - Controle de Qualidade, Análise e Construção das Janelas de Operação para Ondas Regulares

Os valores dos parâmetros de entrada assumidos para o estudo encontram-se resumidos na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Valores dos Parâmetros de Entrada para o Estudo Paramétrico.**

Parâmetros de Entrada	Valores												
Comprimento do <i>Riser</i> (m)	2.342												
Lâmina D'água (m)	2.300												
Densidade Relativa do Fluido de Perfuração	1,20	1,32	1,44										
Período de Excitação da Onda (s)	7	9	11										
Altura da Onda (m)	3,96	5,94	7,92										
Velocidade da Corrente na Superfície (m/s)	0,77	0,90	1,03										
Offsets (percentual da lâmina d'água-PCNT)	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Trações no Topo (Mega Newton-MN)	4,44	4,71	4,98	5,24	5,51	5,78	6,04	6,31	6,58				

A Tabela 4.2 mostra os 27 casos propostos para o estudo paramétrico, onde cada caso apresenta 117 simulações, ou seja, enquanto a lâmina d'água, a densidade relativa do fluido de perfuração, a altura e o período de excitação da onda, e a velocidade da corrente na superfície se mantiveram constantes, o *offset* estático da

embarcação e a tração no topo do *riser* variaram de - 6 a 6 PCNT e de 4,44 a 6,58 MN respectivamente. Conforme pode ser observado na Tabela 4.2, esta análise totalizou 3.159 simulações numéricas, que foram verificadas quanto à qualidade e analisadas para verificar as janelas de operação.

**Tabela 4.2 - 27 Casos com 3.159 Simulações.**

Casos	Lâmina D'Água (m)	Densidade Relativa do Fluido de Perfuração	Período de Excitação da Onda (s)	Altura da Onda (m)	Velocidade da Corrente na Superfície (m/s)	Total de Offsets	Total de Trações no Topo	Número de Simulações
1	2.300	1.20	7	3.96	0.77	13	9	13 x 9 = 117
2	2.300	1.32	7	3.96	0.77	13	9	13 x 9 = 117
3	2.300	1.44	7	3.96	0.77	13	9	13 x 9 = 117
4	2.300	1.20	7	3.96	0.90	13	9	13 x 9 = 117
5	2.300	1.32	7	3.96	0.90	13	9	13 x 9 = 117
6	2.300	1.44	7	3.96	0.90	13	9	13 x 9 = 117
7	2.300	1.20	7	3.96	1.03	13	9	13 x 9 = 117
8	2.300	1.32	7	3.96	1.03	13	9	13 x 9 = 117
9	2.300	1.44	7	3.96	1.03	13	9	13 x 9 = 117
10	2.300	1.20	9	5.94	0.77	13	9	13 x 9 = 117
11	2.300	1.32	9	5.94	0.77	13	9	13 x 9 = 117
12	2.300	1.44	9	5.94	0.77	13	9	13 x 9 = 117
13	2.300	1.20	9	5.94	0.90	13	9	13 x 9 = 117
14	2.300	1.32	9	5.94	0.90	13	9	13 x 9 = 117
15	2.300	1.44	9	5.94	0.90	13	9	13 x 9 = 117
16	2.300	1.20	9	5.94	1.03	13	9	13 x 9 = 117
17	2.300	1.32	9	5.94	1.03	13	9	13 x 9 = 117
18	2.300	1.44	9	5.94	1.03	13	9	13 x 9 = 117
19	2.300	1.20	11	7.92	0.77	13	9	13 x 9 = 117
20	2.300	1.32	11	7.92	0.77	13	9	13 x 9 = 117
21	2.300	1.44	11	7.92	0.77	13	9	13 x 9 = 117
22	2.300	1.20	11	7.92	0.90	13	9	13 x 9 = 117

23	2.300	1,32	11	7,92	0,90	13	9	13 x 9 = 117
24	2.300	1,44	11	7,92	0,90	13	9	13 x 9 = 117
25	2.300	1,20	11	7,92	1,03	13	9	13 x 9 = 117
26	2.300	1,32	11	7,92	1,03	13	9	13 x 9 = 117
27	2.300	1,44	11	7,92	1,03	13	9	13 x 9 = 117
							Total	3.159

#### 4.2.1 - Controle de Qualidade dos Dados de Entrada e Saída do DERP

O principal objetivo em se avaliar a qualidade dos dados de entrada é verificar se estes estão de acordo com o proposto para o estudo paramétrico, ou seja, verificar se houve alguma falha na leitura dos dados, na digitação e se a variação dos parâmetros confere com a proposta. Já o objetivo de avaliar a qualidade dos dados de saída é verificar se ocorreram resultados que pudessem comprometer as análises. Além disso, os gráficos da qualidade dos dados de entrada também são úteis para facilitar o entendimento da variação dos parâmetros ao longo das simulações.

Os parâmetros de entrada avaliados encontram-se resumidos na Tabela 4.1 e os de saída foram: ângulo da *flex joint* do topo (Anexo 1), ângulo da *flex joint* do fundo (Anexo 1), curso (*stroke*) da junta telescópica (Anexo 1) e máxima relação da *stress intensity* (Anexo 2) pela tensão de escoamento do *riser* (Max.  $SI/F_y$ ).

##### 4.2.1.1 - Qualidade dos Dados de Entrada

A metodologia utilizada para verificar a qualidade dos dados de entrada foi feita através da comparação dos valores mostrados na Tabela 4.2 com os gráficos das Figuras 4.3 e 4.4.

A Figura 4.3 apresenta todos os parâmetros da Tabela 4.1, com exceção do *offset* estático (SO), que é mostrado na Figura 4.4. Foram incluídos, na Figura 4.3, números de 1 a 27 próximos aos valores das densidades relativas dos fluidos de perfuração para facilitar a localização de cada caso. Nestas Figuras 4.3 e 4.4 também são indicados os fatores de escala utilizados para que fosse possível normalizar vários parâmetros no mesmo gráfico.

Pode-se observar na Figura 4.3 que os parâmetros de entrada foram variados da seguinte forma:

**a) Comprimento do *Riser* (RL) e Lâmina D'água (WD)** - Se mantiveram constantes para todas as 3.159 simulações.

**b) Tração no Topo do Riser (TT)** - Para as primeiras 117 simulações (caso 1) variou de um valor mínimo (4,44 MN) até um valor máximo (6,58 MN) e esta variação se repetiu para os outros 26 casos.

**c) Velocidade da Corrente na Superfície (SC)** - Apresentou três valores distintos (0,77; 0,90 e 1,03 m/s) que se repetiram assim:

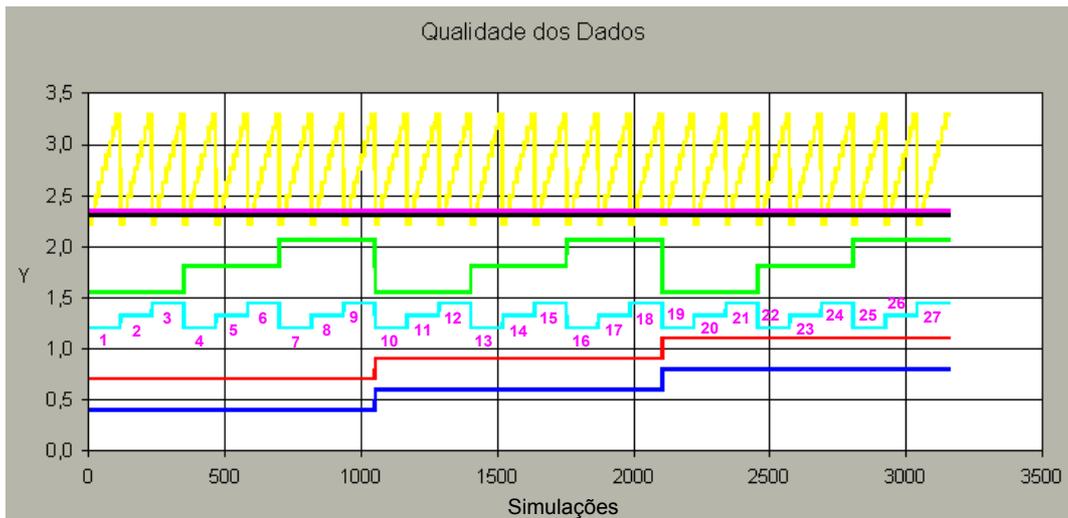
- Para o menor valor, a velocidade se manteve constante em três grupos de simulações, fazendo parte do primeiro grupo os casos 1, 2 e 3, do segundo os casos 10, 11 e 12 e do terceiro os casos 19, 20 e 21.
- Para o valor intermediário, a velocidade também se manteve constante em três grupos de simulações, fazendo parte do primeiro grupo os casos 4, 5 e 6, do segundo os casos 13, 14 e 15 e do terceiro os casos 22, 23 e 24.
- Para o maior valor, mais uma vez a velocidade se manteve constante em três grupos de simulações, fazendo parte do primeiro grupo os casos 7, 8 e 9, do segundo os casos 16, 17 e 18 e do terceiro os casos 25, 26 e 27.

**d) Densidade Relativa do Fluido de Perfuração (MUD)** - Apresentou três valores distintos (1,20; 1,32 e 1,44) que se repetiram conforme descrito abaixo:

- Para o menor valor, o fluido de perfuração se manteve constante nos casos 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22 e 25.
- Para o valor intermediário, o fluido de perfuração também se manteve constante nos casos 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 e 26.
- Para o maior valor, mais uma vez o fluido de perfuração se manteve constante nos casos 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 e 27.

**e) Período (EP) e Altura (HW) da Onda** - Apresentaram três valores distintos (7 s e 3,96 m; 9 s e 5,94 m; 11 s e 7,92 m) que se repetiram conforme descrito abaixo:

- Para o menor valor, o período e a altura se mantiveram constantes nos casos de 1 a 9.
- Para o valor intermediário, o período e a altura se mantiveram constantes nos casos 10 ao 18.
- Para o maior valor, o período e a altura se mantiveram constantes nos casos 19 ao 27.



Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	WD		2.299,99	2.299,99	m	1000
2	Hw		3,96	7,92	m	10
3	SC		0,77	1,03	m/s	0,5
4	MUD		1,20	1,44	(...)	
5	EP		7,00	11,00	s	10
6	RL		2.342,42	2.342,42	m	1000
7	TT		4.441.999,65	6.577.039,65	N	2000000

**Figura 4.3** - Qualidade dos Dados de Entrada.

O gráfico do *offset* estático da embarcação (SO) contra as 3.159 simulações ficou com a visualização prejudicada, devido às sucessivas variações de *offsets* (- 6 a 6 PCNT) em trechos curtos do gráfico (a cada 117 simulações). Para entender melhor esta variação, a Figura 4.4 foi elaborada.

A Figura 4.4 ilustra o *offset* estático da embarcação, a densidade do fluido de perfuração e a tração no topo do *riser* nas 351 primeiras simulações (casos 1, 2 e 3). Pode-se notar que nas 117 primeiras simulações (caso 1) para cada valor de tração no topo houve variação do *offset* de - 6 a 6 PCNT e nas próximas 117 simulações (caso 2) houve a mesma situação. Esta situação se repetiu até o término das simulações.

Após observar as Figuras 4.3 e 4.4, pode-se concluir que os dados de entrada do DERP estão de acordo com o proposto na Tabela 4.2.

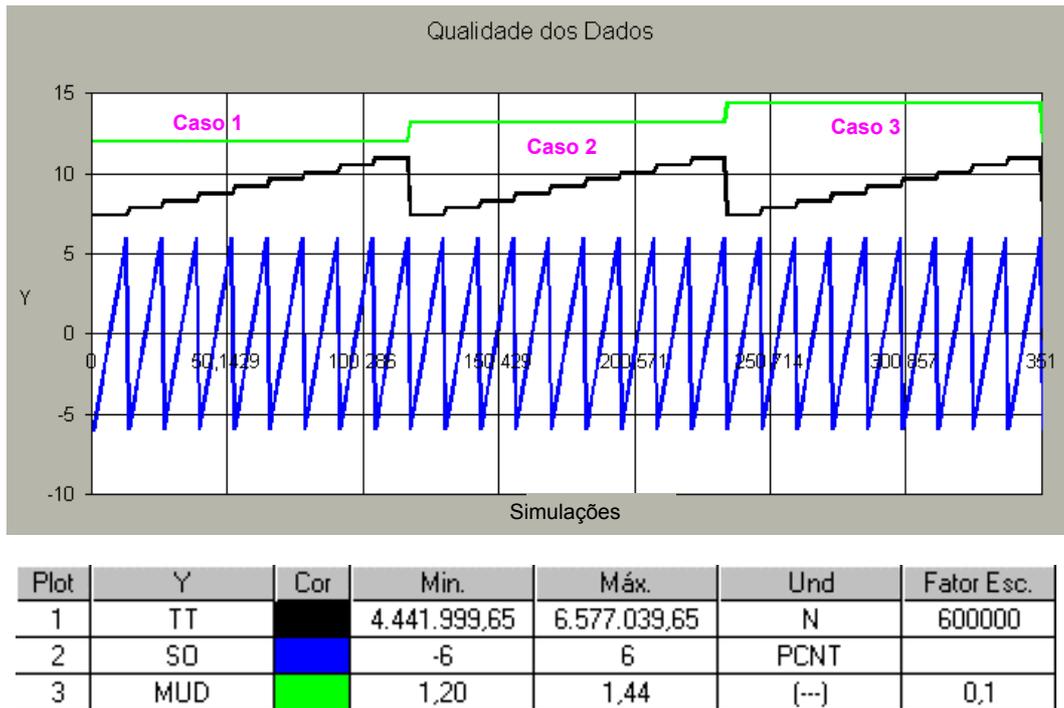


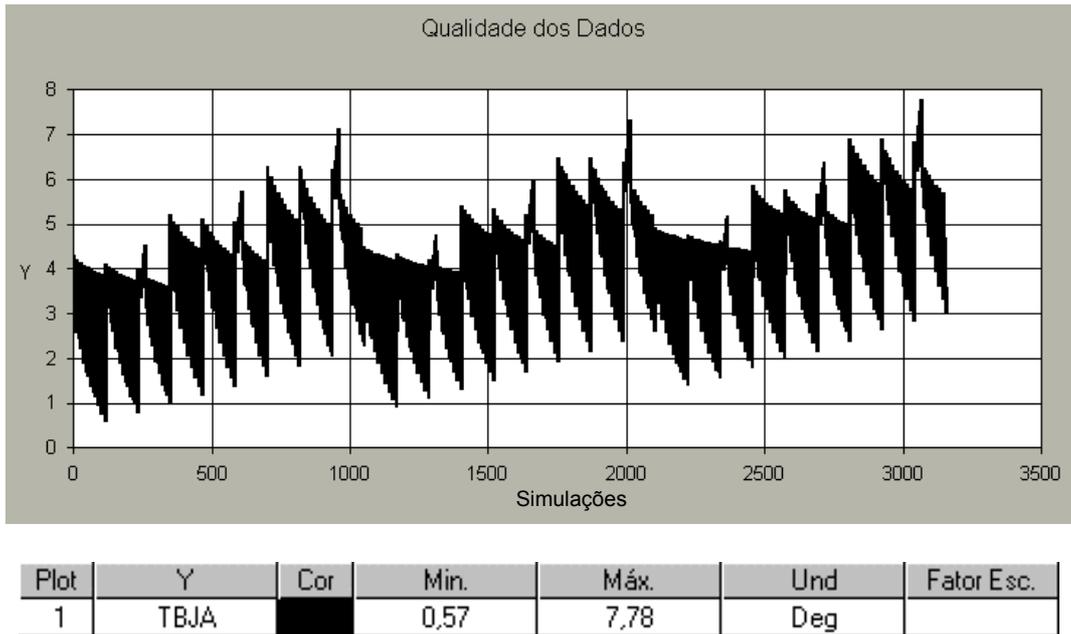
Figura 4.4 - Qualidade do *offset*, Fluido de Perfuração e Tração no Topo.

#### 4.2.1.2 - Qualidade dos Dados de Saída

Os critérios para verificar a qualidade dos dados de saída foram a máxima rotação do *riser*, com um valor limite de 15°, e a identificação de parâmetros com valores discrepantes. A metodologia foi elaborada através da visualização de dois gráficos por parâmetro, onde o primeiro tem como objetivo identificar trechos de simulações com valores extremamente discrepantes e o segundo, trechos de simulações com valores acima de 15° para a máxima rotação do *riser*.

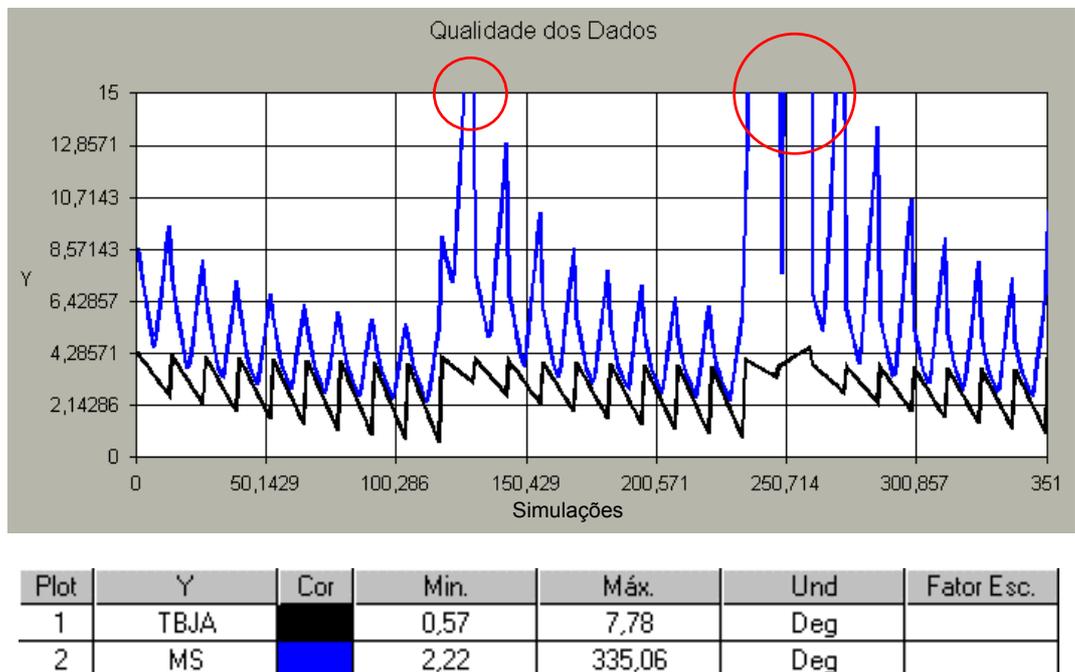
Todas as simulações que apresentaram valores acima de 15° para a máxima rotação do *riser* foram consideradas inválidas para as análises. Os parâmetros avaliados foram:

a) **Ângulo da Flex Joint do Topo (TBJA)** - A Figura 4.5 exibe o ângulo da *flex joint* do topo para as 3.159 simulações, que não apresentou discrepância em seus resultados, porém se um critério de 4° fosse adotado para as operações de perfuração, este critério teria sido ultrapassado, pois o maior valor foi de 7,78°. Deve-se ter cautela nos trechos de simulações onde a rotação máxima do *riser* (MS) excedeu 15°. Para destacar estes trechos foi elaborada a Figura 4.6, a qual apresenta além do TBJA, a máxima rotação do *riser* para as primeiras 351 simulações, que inclui dois círculos em vermelho onde ocorreram valores superiores a 15°.



**Figura 4.5** - Qualidade do Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

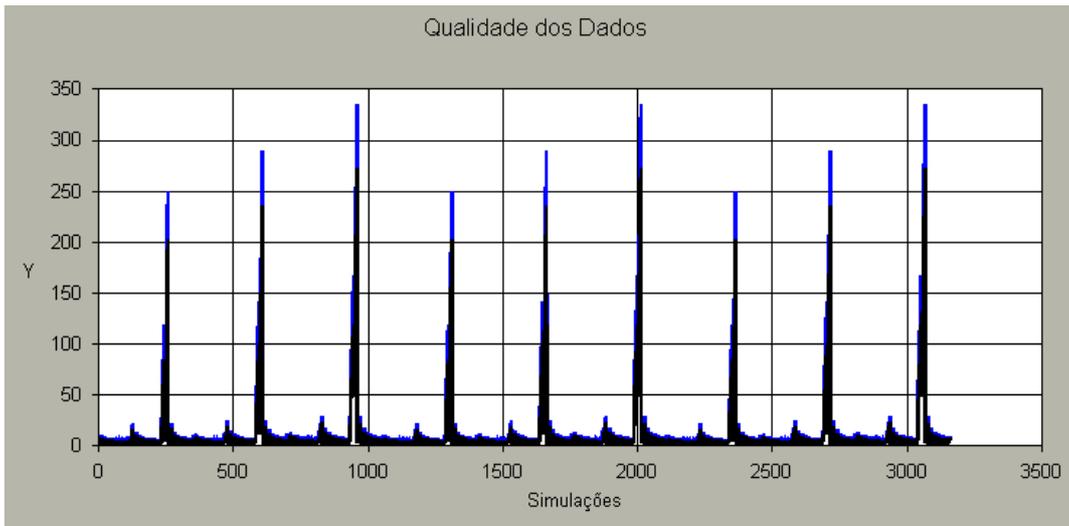
Apesar dos trechos marcados pelos círculos vermelhos na Figura 4.6 exibirem valores do ângulo da *flex joint* do topo compatíveis com a hipótese de critério de 4°, estes trechos de simulações contêm informações imprecisas.



**Figura 4.6** - Qualidade do Ângulo da *Flex Joint* do Topo e Máxima Rotação do *Riser*.

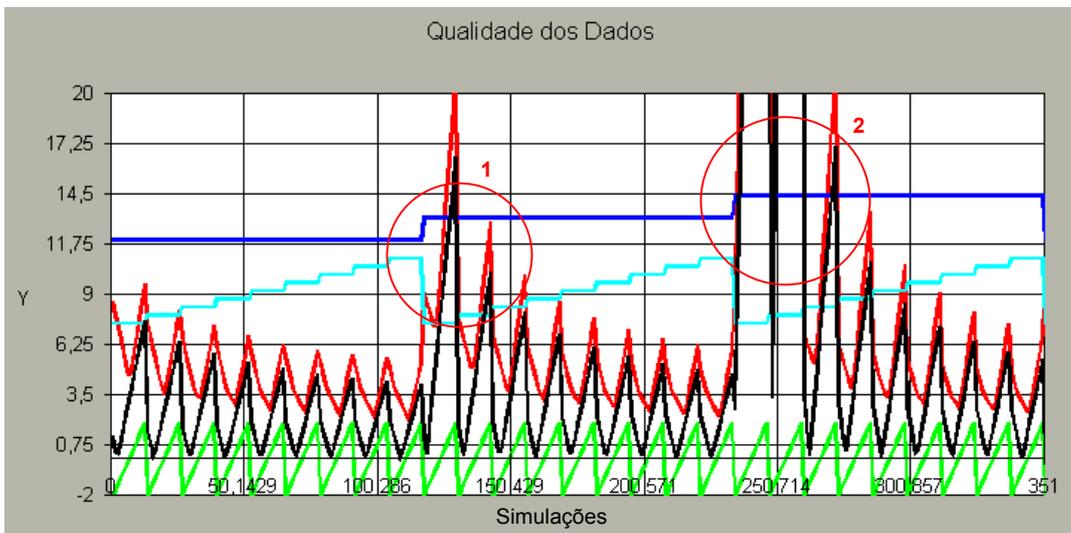
**b) Ângulo da *Flex Joint* do Fundo (LBJA) -** A Figura 4.7 exibe o ângulo da *flex joint* do fundo e a máxima rotação do *riser* (MS) para as 3.159 simulações. Nota-se que estes dois parâmetros apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, apresentaram valores proporcionais ao longo das simulações. Da Figura 4.7 também verifica-se que os dois parâmetros em questão apresentaram nove picos com valores extremamente elevados. Para estes nove picos pode-se dizer que com um critério de 4° para o ângulo da *flex joint* do fundo, as operações de perfuração deveriam ser interrompidas, além disso, o *riser* deveria ser desconectado. Agora, considerando a máxima rotação do *riser*, pode-se dizer que valores superiores a 15° foram calculados, sendo assim, contêm informações imprecisas.

Para tentar compreender melhor o motivo dos picos da Figura 4.7, apresenta-se na Figura 4.8 o ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA) e a máxima rotação do *riser* (MS) em conjunto com a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD), a tração no topo (TT) e o *offset* da embarcação (SO) para as primeiras 351 simulações. O círculo 1 em vermelho na Figura 4.8 mostra que a densidade relativa do fluido de perfuração de 1,32 elevou o ângulo da *flex joint* do fundo de 15,03°, com *offset* de 5 PCNT e tração no topo de 4,4 MN, para 16,52°, com *offset* de 6 PCNT e tração no topo de 4,4 MN. Agora, analisando os dados referentes ao círculo 2 nota-se que a densidade de 1,44 elevou o ângulo da *flex joint* do fundo de 77,63°, com *offset* de 5 PCNT e tração no topo de 4,4 MN, para 84,45°, com *offset* de 6 PCNT e tração no topo de 4,4 MN. Então, comparando o círculo 1 com o 2 e mantendo todos os parâmetros de entrada constantes, com exceção do fluido de perfuração, pode-se dizer que o fluido de perfuração em *offsets* excessivos, associados a trações baixas, pode provocar o colapso do *riser*. A máxima rotação do *riser* tem o mesmo comportamento do ângulo da *flex joint* do fundo, assim, cabendo as mesmas observações.



Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	LBJA	Black	0,01	272,97	Deg	
2	MS	Blue	2,22	335,06	Deg	

Figura 4.7 - Qualidade do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo e Máxima Rotação do *Riser*.

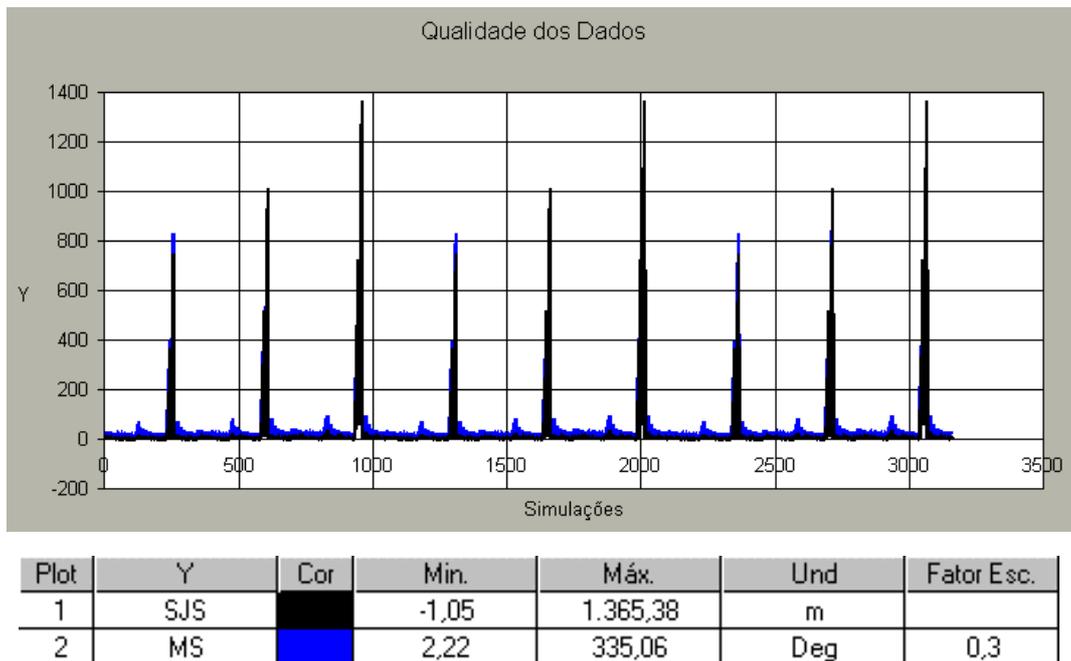


Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	LBJA	Black	0,01	272,97	Deg	
2	MUD	Blue	1,20	1,44	[--]	0,1
3	SO	Green	-6	6	PCNT	3
4	TT	Cyan	4.441.999,65	6.577.039,65	N	600000
5	MS	Red	2,22	335,06	Deg	

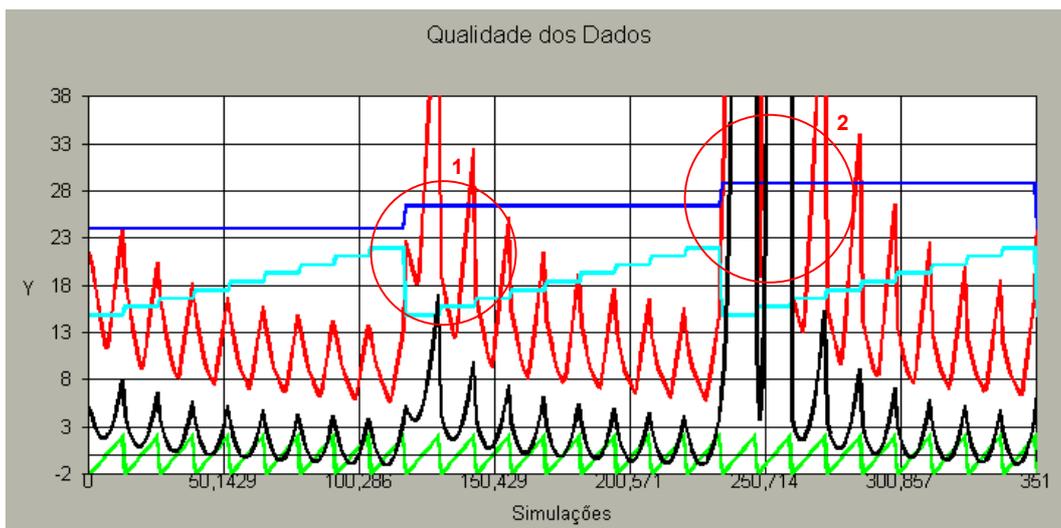
Figura 4.8 - Ângulo da *Flex Joint* do Fundo e Máxima Rotação do *Riser* em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático.

**c) Curso (*stroke*) da Junta Telescópica (SJS) -** A Figura 4.9 ilustra o curso da junta telescópica e a máxima rotação do *riser* (MS) para as 3.159 simulações. Nota-se que estes dois parâmetros apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, apresentaram valores proporcionais ao longo das simulações. Da Figura 4.9 também verifica-se que os dois parâmetros em questão apresentaram nove picos com valores extremamente elevados. Para estes nove picos pode-se dizer que com um critério de 19 m para o curso da junta telescópica, as operações de perfuração deveriam ser interrompidas, além disso, o *riser* deveria ser desconectado. Agora, considerando a máxima rotação do *riser*, pode-se dizer que valores superiores a 15° foram calculados, sendo assim, contêm informações imprecisas.

A Figura 4.10 ilustra o curso da junta telescópica (SJS) e a máxima rotação do *riser* (MS) em conjunto com a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD), a tração no topo (TT) e o *offset* da embarcação (SO) para as primeiras 351 simulações. Os mesmos comentários apresentados para a Figura 4.8 são válidos para a Figura 4.10.



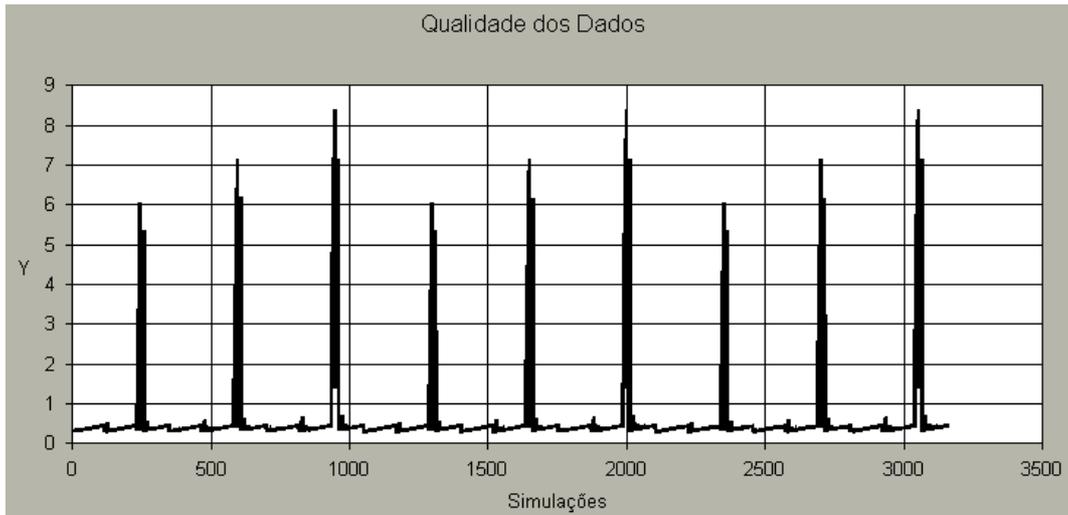
**Figura 4.9 -** Qualidade do Curso da Junta Telescópica e Máxima Rotação do *Riser*.



Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	SJS	Preto	-1,05	1.365,38	m	
2	MUD	Azul	1,20	1,44	(---)	0,05
3	SO	Verde	-6	6	PCNT	3
4	TT	Ciano	4.441.999,65	6.577.039,65	N	300000
5	MS	Vermelho	2,22	335,06	Deg	0,4

**Figura 4.10** - Curso da Junta Telescópica e Máxima Rotação do *Riser* em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático.

**d) Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento do *Riser* (MSIFY)** - A Figura 4.11 mostra a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento do *riser* (MSIFY) para as 3.159 simulações. Da Figura 4.11 observa-se que o parâmetro em questão apresentou nove picos com valores extremamente elevados. Para estes nove picos pode-se dizer que com um critério de 0,40 para a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento do *riser*, as operações de perfuração deveriam ser interrompidas, além disso, o *riser* deveria ser desconectado.

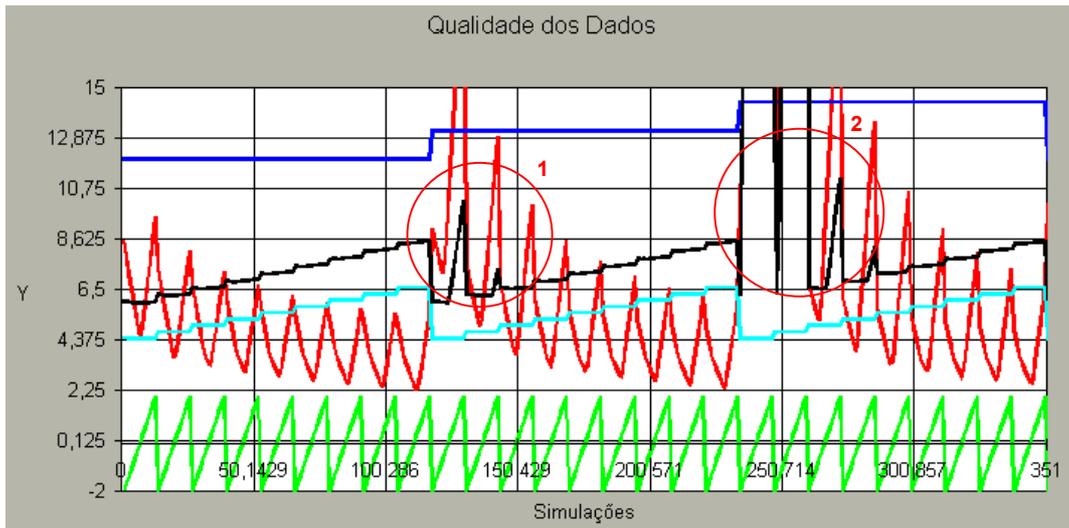


Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	MSIFY		0,29	8,40	(--)	

**Figura 4.11** - Qualidade da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento do *Riser*.

A Figura 4.12 exibe a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento do *riser* (MSIFY) e a máxima rotação do *riser* (MS) em conjunto com a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD), a tração no topo (TT) e o *offset* da embarcação (SO) para as primeiras 351 simulações. Pela Figura 4.12 pode-se dizer que o fluido de perfuração em *offsets* excessivos, associados a trações baixas, pode provocar compressão no *riser*.

Mais uma vez simulações com valores superiores a 15° foram calculadas para a máxima rotação do *riser*, sendo estas consideradas imprecisas.



Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	MSIFY	Preto	0,29	8,40	(---)	0,05
2	MUD	Azul	1,20	1,44	(---)	0,1
3	SO	Verde	-6	6	PCNT	3
4	TT	Ciano	4.441.999,65	6.577.039,65	N	1000000
5	MS	Vermelho	2,22	335,06	Deg	

**Figura 4.12** - Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento e Máxima Rotação do *Riser* em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Tração no Topo e o *Offset* Estático.

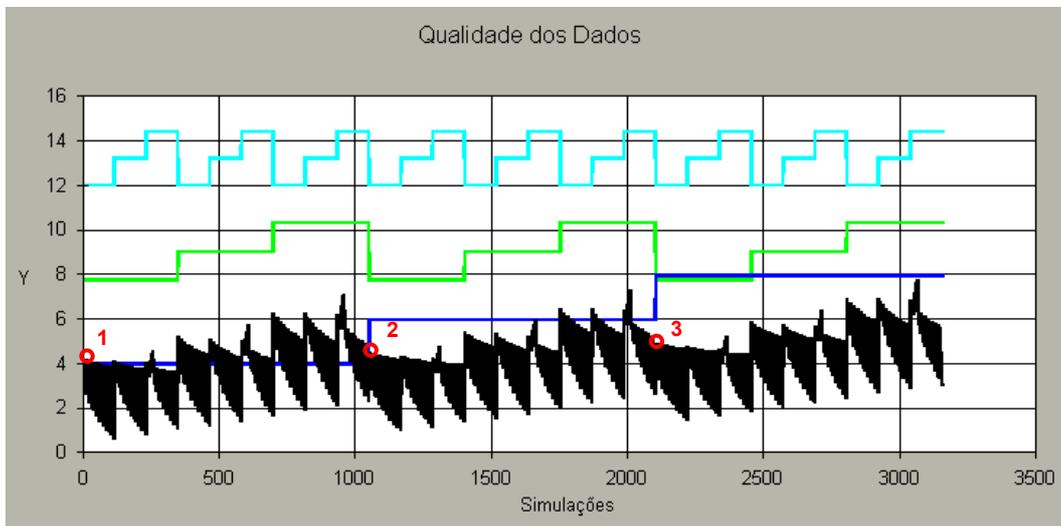
#### 4.2.2 - Comportamento dos Ângulos da *Flex Joint* do Topo e Fundo e Máxima Relação das Tensões em Função dos Parâmetros de Entrada

Conforme mostrado anteriormente nas Figuras 4.8, 4.10 e 4.12, os gráficos para avaliação da qualidade também podem ser usados para análises, que combinam dados de entrada com dados de saída, assim colaborando no entendimento do comportamento de alguns parâmetros. Apresentam-se a seguir análises dos ângulos da *flex joint* do topo e fundo (TBJA e LBJA) e máxima relação das tensões (MSIFY) em função da altura significativa de onda (HW), velocidade da corrente na superfície (SC), densidade relativa do fluido de perfuração (MUD), *offset* estático (SO) da embarcação e tração no topo do *riser* (TT).

##### 4.2.2.1 - Comportamento do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Função dos Parâmetros de Entrada

As análises da influência da onda, da corrente, da densidade do fluido de perfuração, da tração no topo e do *offset* da embarcação no comportamento do ângulo da *flex joint* do topo são descritas a seguir:

**a) Influência da Onda** - A Figura 4.13 ilustra o ângulo da *flex joint* do topo (TBJA), a altura da onda (HW), a velocidade da corrente na superfície (SC) e a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD) para as 3.159 simulações realizadas. Os três círculos vermelhos foram adicionados na Figura 4.13 para verificar a influência da onda no ângulo da *flex joint* do topo. Cada círculo representa valores distintos dos parâmetros de entrada, que se encontram na Tabela 4.3. Os dados referentes a estes três círculos mostram que todos os parâmetros de entrada permaneceram constantes, com exceção da altura de onda. Observa-se que partindo do círculo 1 ao 3 os valores do ângulo da *flex joint* do topo apresentaram acréscimos. Assim, pode-se dizer que, mantidos todos os parâmetros constantes, o ângulo da *flex joint* do topo tendeu a aumentar com o acréscimo da altura de onda significativa, o que já era esperado.



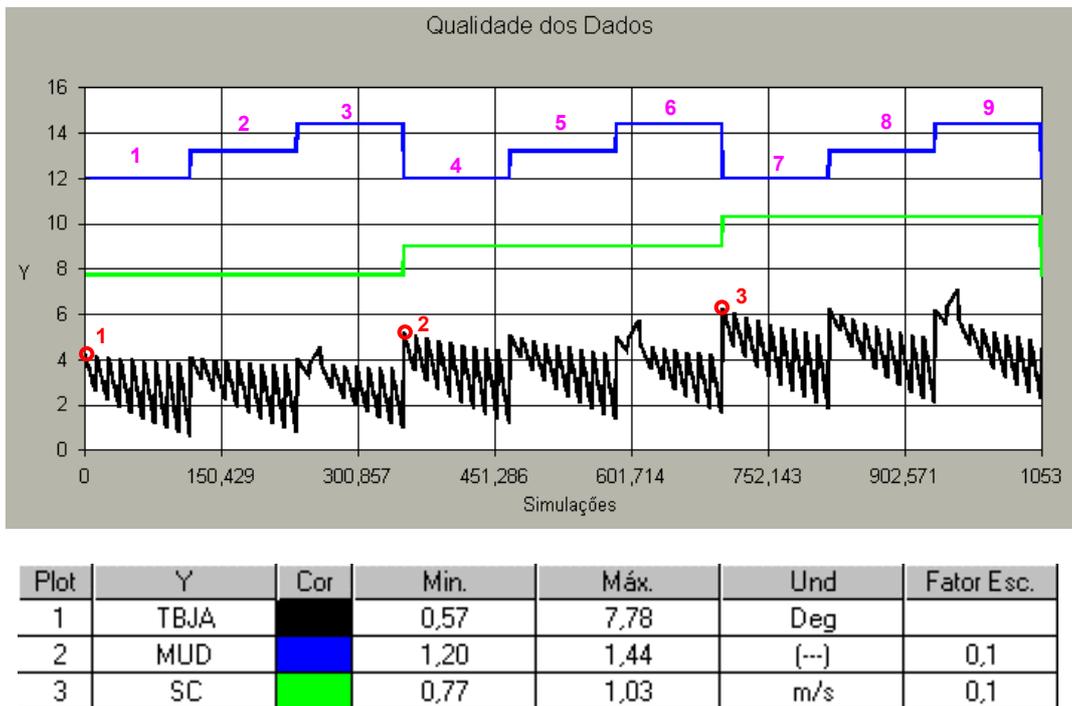
Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	TBJA	Preto	0,57	7,78	Deg	
2	HW	Azul	3,96	7,92	m	
3	SC	Verde	0,77	1,03	m/s	0,1
4	MUD	Ciano	1,20	1,44	{...}	0,1

**Figura 4.13** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Velocidade da Corrente e a Altura de Onda.

**Tabela 4.3** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Ângulo do Topo (graus)	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	4,27	- 6	4,44
2	1,20	5,94	0,77	4,49	- 6	4,44
3	1,20	7,92	0,77	4,91	- 6	4,44

**b) Influência da Corrente** - A Figura 4.14 ilustra o ângulo da *flex joint* do topo (TBJA), a velocidade da corrente na superfície (SC) e a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD). A partir desta Figura 4.14 é possível verificar a influência da velocidade da corrente na superfície sobre o ângulo da *flex joint* do topo. Nesta análise optou-se por observar do caso 1 ao 9, já que o ângulo do topo não apresentou mudanças significativas para os demais casos. Foram introduzidos na Figura 4.14 três círculos distintos em vermelho, onde cada círculo representa valores dos parâmetros de entrada, indicados na Tabela 4.4. Nas simulações marcadas por estes três círculos, todos os parâmetros de entrada são constantes, com exceção da velocidade da corrente na superfície. Então, pode-se concluir que na seqüência do círculo 1 ao 3 o aumento da velocidade da corrente na superfície proporcionou aumento do ângulo da *flex joint* do topo. Adicionalmente, verifica-se que, se um ângulo de 4° fosse adotado como critério para interromper as operações de perfuração, as três simulações marcadas pelos círculos vermelhos indicariam interrupção das operações de perfuração.



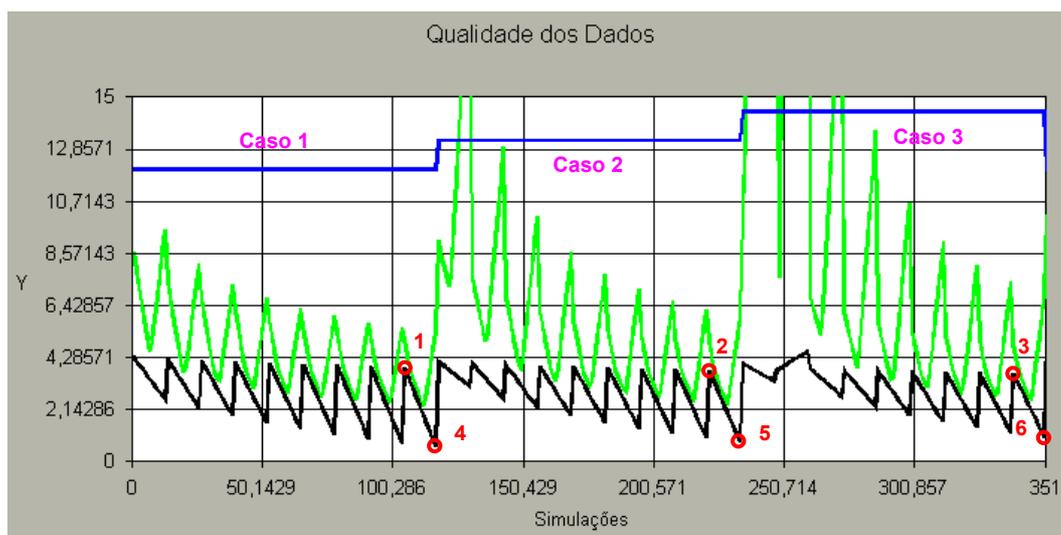
**Figura 4.14** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com a Velocidade da Corrente e o Fluido de Perfuração.

**Tabela 4.4 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.**

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Ângulo do Topo (graus)	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	4,27	- 6	4,44
2	1,20	3,96	0,90	5,20	- 6	4,44
3	1,20	3,96	1,03	6,28	- 6	4,44

**c) Influência da Densidade Relativa do Fluido de Perfuração** - A Figura 4.15 ilustra o ângulo da *flex joint* do topo (TBJA) em conjunto com a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD) e a máxima rotação do *riser* (MS). Esta análise permite verificar a influência da densidade relativa do fluido de perfuração no ângulo da *flex joint* do topo e optou-se por analisar os casos 1, 2 e 3 (Figura 4.15), uma vez que o ângulo do topo não apresentou mudanças significativas para os demais casos. Dois tipos de análises foram conduzidas: primeiro, foram introduzidos na Figura 4.15 os círculos 1, 2 e 3 em vermelho, onde cada círculo representa valores dos parâmetros de entrada (Tabela 4.5). Nas simulações marcadas por estes três círculos, todos os parâmetros de entrada são constantes, com exceção da densidade relativa do fluido de perfuração. Além disso, a máxima rotação do *riser* para estes três pontos manteve-se abaixo de 15°, garantindo assim a precisão dos resultados. Pela Figura 4.15 e Tabela 4.5, nota-se que partindo do círculo 1 ao 3, a densidade do fluido de perfuração teve dois acréscimos, porém o ângulo da *flex joint* do topo apresentou uma pequena redução. Para o segundo tipo de análise, foram introduzidos na Figura 4.15 os círculos 4, 5 e 6 em vermelho, Tabela 4.5, que mostram na seqüência do círculo 4 ao 6 que o aumento da densidade relativa do fluido de perfuração proporcionou aumento do ângulo da *flex joint* do topo.

Uma tentativa de explicar estes dois efeitos pode ser feita da seguinte forma: uma vez que haja um aumento da densidade do fluido de perfuração, a tração imposta ao *riser* é menos efetiva para reduzir a deflexão lateral, portanto levando a uma alteração no ângulo do topo. A diferença entre estas duas situações analisadas está associada à posição da embarcação em relação ao sentido da corrente. No primeiro caso (*offsets* negativos), o *riser* tende a mover-se no sentido contrário ao da corrente, assim fazendo com que a redução do efeito da tração reduza o ângulo do topo, conforme é ilustrado na Figura 4.16. Este efeito benéfico desaparece quando a embarcação encontra-se posicionada em *offsets* positivos, onde o *riser* tende a mover-se no sentido da corrente (Figura 4.16).

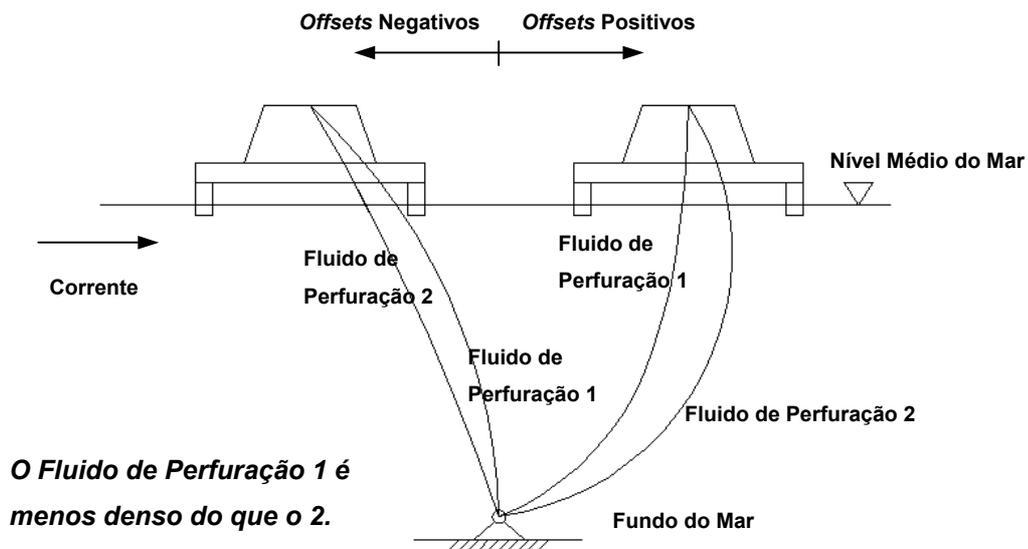


Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	TBJA		0,57	7,78	Deg	
2	MUD		1,20	1,44	(--)	0,1
3	MS		2,22	335,06	Deg	

**Figura 4.15** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com o Fluido de Perfuração e a Máxima Rotação do *Riser*.

**Tabela 4.5** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

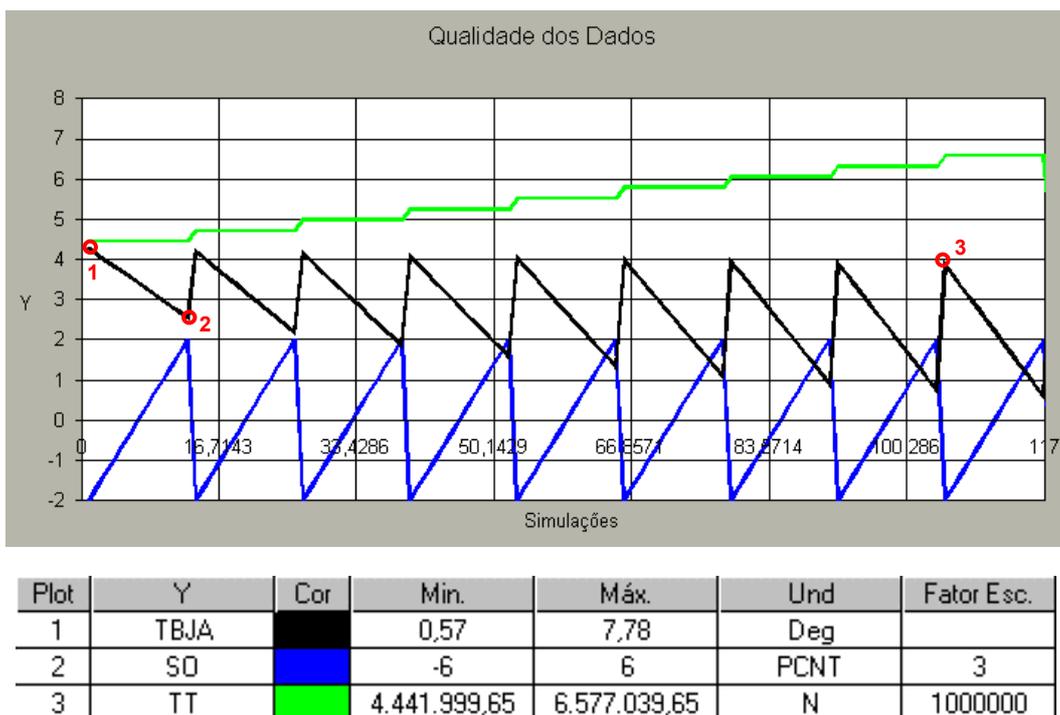
Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Ângulo do Topo (graus)	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	3,88	- 6	6,58
2	1,32	3,96	0,77	3,76	- 6	6,58
3	1,44	3,96	0,77	3,63	- 6	6,58
4	1,20	3,96	0,77	0,57	6	6,58
5	1,32	3,96	0,77	0,76	6	6,58
6	1,44	3,96	0,77	0,97	6	6,58



**Figura 4.16** - Esquema do Efeito da Posição da Embarcação em Relação ao Sentido da Corrente.

**d) Influência da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação** - A Figura 4.17 exibe as primeiras 117 simulações para verificar a influência da tração no topo (TT) do *riser* e *offset* estático (SO) da embarcação no ângulo da *flex joint* do topo (TBJA).

A influência da tração no topo pode ser verificada pelos círculos 1 e 3 em vermelho (Figura 4.17), onde todos os parâmetros de entrada, com exceção da tração no topo permaneceram constantes (Tabela 4.6). Estes dois círculos mostram que o aumento da tração no topo gerou uma redução no ângulo da *flex joint* do topo. A redução no ângulo da *flex joint* do topo ocorreu provavelmente porque o aumento da tração proporcionou um aumento da rigidez à flexão do sistema do *riser*. A tração no topo pode ser útil para redução do ângulo da *flex joint* do topo, porém deve-se ter cautela, pois a componente lateral da tração pode provocar deflexão horizontal excessiva no BOP *stack*.



**Figura 4.17** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Conjunto com a Tração no Topo do Riser e o *Offset* Estático da Embarcação.

A influência do *offset* estático da embarcação pode ser verificada pelos círculos 1 e 2 em vermelho (Figura 4.17), onde todos os parâmetros de entrada, com exceção do *offset* permaneceram constantes (Tabela 4.6). Estes dois círculos mostram que o aumento do *offset* gerou uma redução no ângulo da *flex joint* do topo.

**Tabela 4.6** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Tração no Topo e *Offset* no Ângulo da *Flex Joint* do Topo.

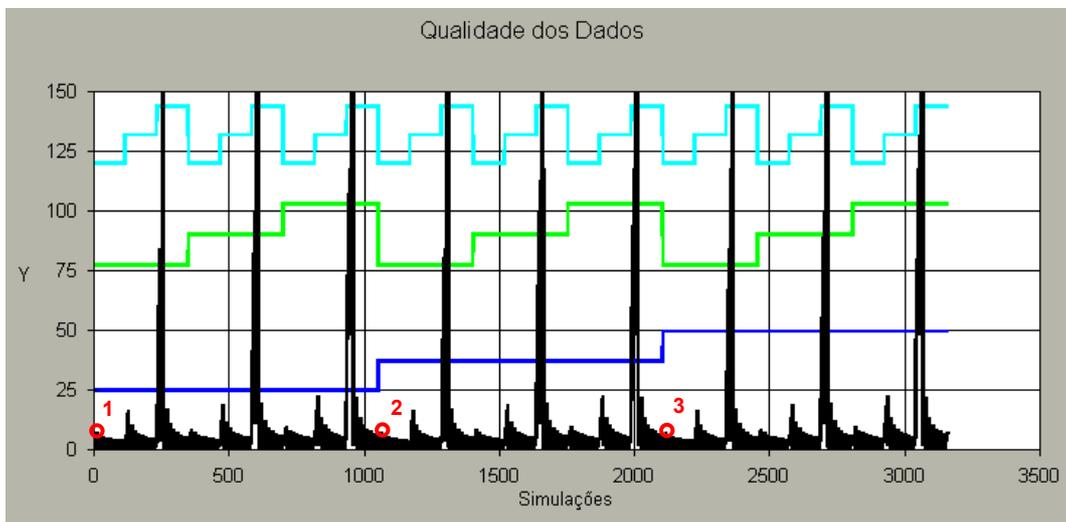
Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Ângulo do Topo (graus)	<i>Offset</i> (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	4,27	- 6	4,44
2	1,20	3,96	0,77	2,56	6	4,44
3	1,20	3,96	0,77	3,88	- 6	6,58

#### 4.2.2.2 - Comportamento do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Função dos Parâmetros de Entrada

Apresentam-se a seguir análises da influência de alguns parâmetros de entrada no comportamento do ângulo da *flex joint* do fundo:

**a) Influência da Onda** - A Figura 4.18 ilustra o ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA) em conjunto com a altura da onda (HW), a velocidade da corrente na superfície

(SC) e a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD) para as 3.159 simulações realizadas. Nos três círculos em vermelho, na Figura 4.18, o único parâmetro de entrada que variou foi a altura de onda, conforme mostra a Tabela 4.7. Sendo assim, observa-se que partindo do primeiro círculo para o terceiro, a altura de onda não teve influência no ângulo da *flex joint* do fundo, pois à medida que a altura de onda sofreu dois acréscimos, o ângulo do fundo permaneceu constante. O movimento oscilatório das partículas de água devido às ondas ocorre numa região próxima à superfície livre, desta forma, é de se esperar uma influência muito pequena dos efeitos da onda próximo ao fundo do mar.



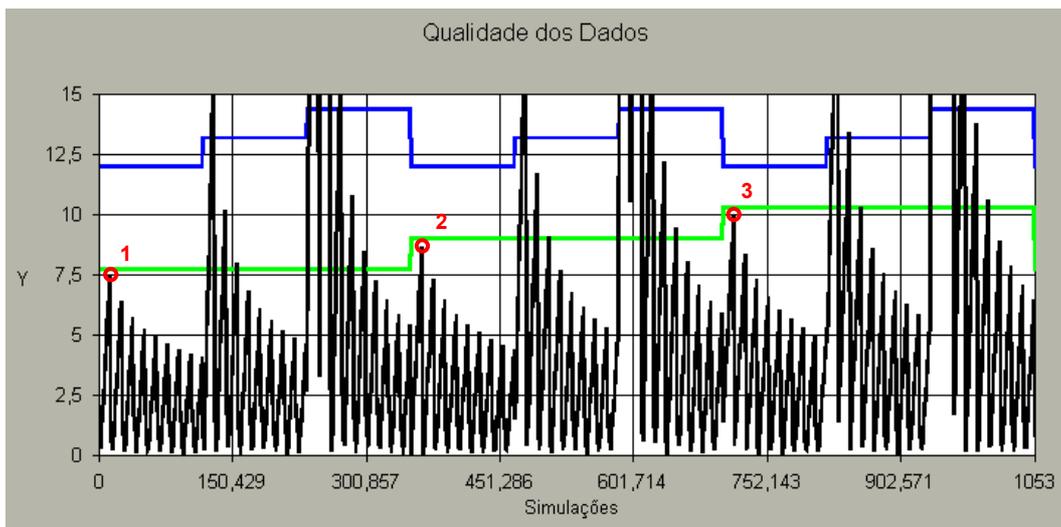
Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	LBJA	Preto	0,01	272,97	Deg	
2	Hw	Azul	3,96	7,92	m	0,16
3	SC	Verde	0,77	1,03	m/s	0,01
4	MUD	Ciano	1,20	1,44	[...]	0,01

**Figura 4.18** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Velocidade da Corrente e a Altura de Onda.

**Tabela 4.7** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Ângulo do Fundo (graus)	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	7,53	6	4,44
2	1,20	5,94	0,77	7,53	6	4,44
3	1,20	7,92	0,77	7,53	6	4,44

**b) Influência da Corrente** - A Figura 4.19 ilustra o ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA) em conjunto com a velocidade da corrente na superfície (SC) e a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD). Para verificar a influência da velocidade da corrente na superfície, no ângulo da *flex joint* do fundo, optou-se por analisar os casos de 1 a 9 (Figura 4.19), já que o ângulo do fundo não apresentou mudanças significativas para os demais casos. Nas simulações marcadas pelos círculos 1, 2 e 3, todos os parâmetros de entrada permaneceram constantes, com exceção da velocidade da corrente na superfície, conforme mostra a Tabela 4.8. Então, pode-se concluir que o ângulo da *flex joint* do fundo aumentou com o acréscimo da velocidade da corrente na superfície, pois na seqüência do círculo 1 ao 3 verifica-se aumento de ambos os parâmetros. Se um ângulo de 4° fosse adotado como critério para interromper as operações de perfuração, as três simulações marcadas pelos círculos vermelhos indicariam interrupção das operações.



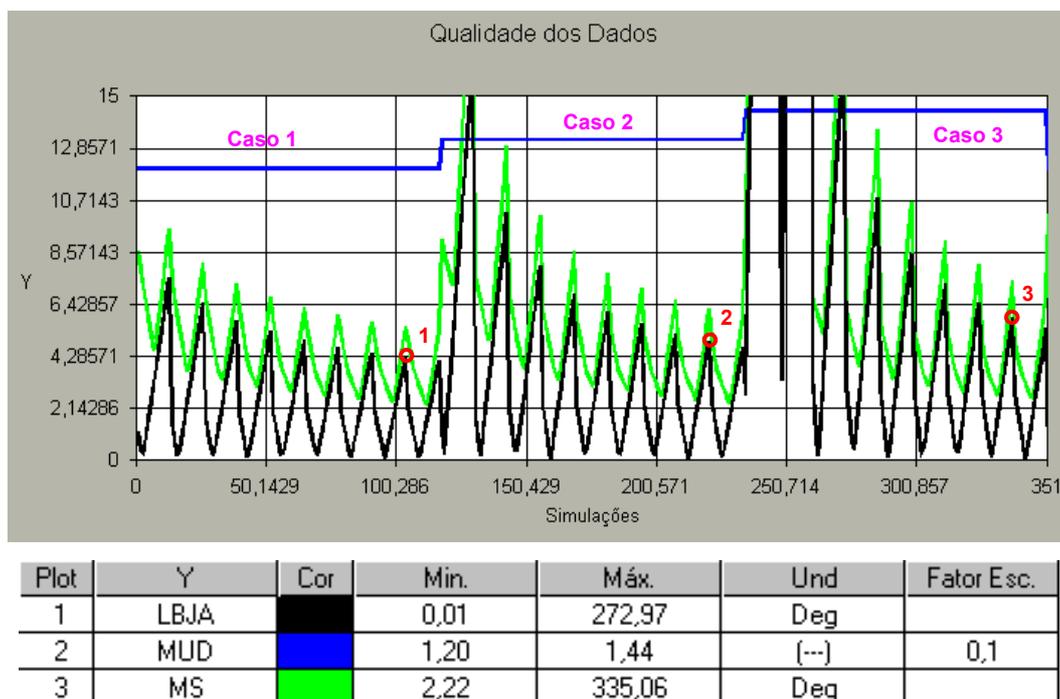
Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	LBJA		0,01	272,97	Deg	
2	MUD		1,20	1,44	(...)	0,1
3	SC		0,77	1,03	m/s	0,1

**Figura 4.19** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com a Velocidade da Corrente e o Fluido de Perfuração.

**Tabela 4.8 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.**

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Ângulo do Fundo (graus)	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	7,53	6	4,44
2	1,20	3,96	0,90	8,68	6	4,44
3	1,20	3,96	1,03	10,01	6	4,44

**c) Influência da Densidade Relativa do Fluido de Perfuração** - A Figura 4.20 ilustra o ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA), a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD) e a máxima rotação do *riser* (MS). Para verificar a influência da densidade relativa do fluido de perfuração no ângulo da *flex joint* do fundo optou-se por analisar os casos 1, 2 e 3 (Figura 4.20), pois o ângulo do fundo não apresentou mudanças significativas para os demais casos. Nas simulações marcadas pelos círculos 1, 2 e 3, na Figura 4.20, todos os parâmetros de entrada permaneceram constantes, com exceção da densidade relativa do fluido de perfuração. Além disso, a máxima rotação do *riser* para estes três círculos manteve-se abaixo de 15°. Pela Figura 4.20 e Tabela 4.9 nota-se que partindo do círculo 1 ao 3, a densidade relativa do fluido de perfuração teve dois acréscimos e que o ângulo da *flex joint* do fundo também apresentou dois acréscimos. Este comportamento de certa forma já era esperado, já que é consistente com o efeito verificado na Figura 4.16.



**Figura 4.20 - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com o Fluido de Perfuração e a Máxima Rotação do *Riser*.**

**Tabela 4.9 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.**

<b>Círculo</b>	<b>Fluido de Perfuração</b>	<b>Onda (m)</b>	<b>Corrente (m/s)</b>	<b>Ângulo do Fundo (graus)</b>	<b>Offset (PCNT)</b>	<b>Tração no Topo (MN)</b>
1	1,20	3,96	0,77	4,24	6	6,31
2	1,32	3,96	0,77	4,90	6	6,31
3	1,44	3,96	0,77	5,89	6	6,31

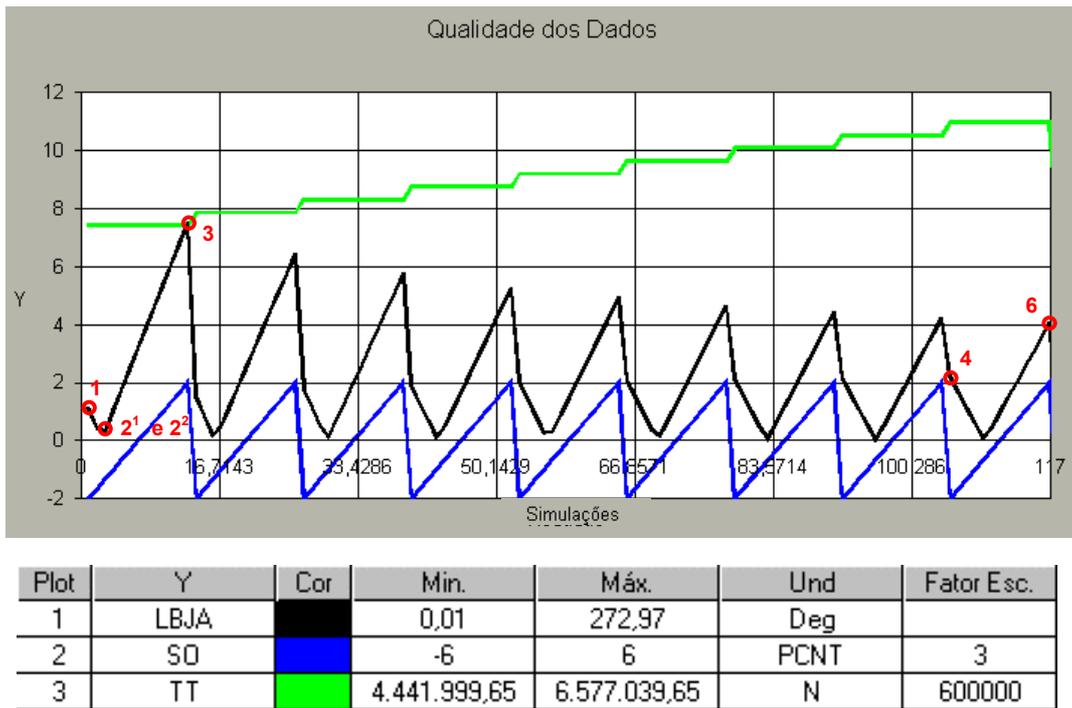
**d) Influência da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação** - A Figura 4.21 exibe as primeiras 117 simulações para verificar a influência da tração no topo (TT) do *riser* e *offset* estático (SO) da embarcação no ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA).

A influência da tração no topo pode ser verificada pelos pares de círculos (1,4) e (3,6) em vermelho, onde todos os parâmetros de entrada, com exceção da tração no topo permaneceram constantes para cada par, como mostra a Tabela 4.10. Os círculos 1 e 4 mostram que o aumento da tração no topo gerou um aumento no ângulo da *flex joint* do fundo e os círculos 3 e 6 indicam que o aumento da tração no topo reduziu o ângulo do fundo. Estes dois efeitos podem ser intuitivamente deduzidos através da Figura 4.22, onde o efeito dos círculos 1 e 4 é representado pela situação 1 e o efeito dos círculos 3 e 6 é representado pela situação 2. A situação 1 corresponde aos *offsets* negativos e a situação 2 aos positivos.

O aumento da tração no topo em *offsets* positivos pode ser útil para redução do ângulo da *flex joint* do fundo, porém deve-se ter cautela, pois a componente lateral da tração pode provocar deflexão horizontal excessiva no BOP *stack*.

A influência do *offset* estático da embarcação pode ser verificada pelos círculos 1, 2 e 3 em vermelho, onde todos os parâmetros de entrada, com exceção do *offset* permaneceram constantes (Tabela 4.10). Os círculos 1 e 2<sup>1</sup> mostram que o aumento do *offset* gerou uma redução no ângulo da *flex joint* do fundo, porém, inverteu este comportamento do círculo 2<sup>2</sup> ao 3.

O *offset* da embarcação pode ser útil para redução do ângulo da *flex joint* do fundo, porém deve-se ter cautela, pois nas operações sem perfuração, mas com o *riser* conectado, trações muito baixas com *offsets* excessivos podem causar escoamento e deformação permanente no *riser*.

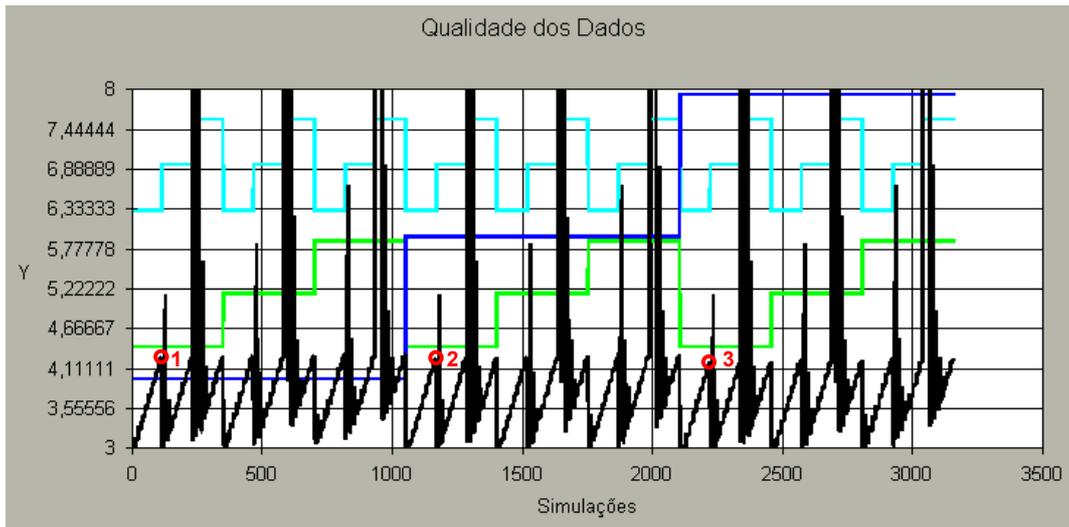


**Figura 4.21** - Análise do Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Conjunto com a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático da Embarcação.

**Tabela 4.10** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Tração no Topo e *Offset* no Ângulo da *Flex Joint* do Fundo.

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Ângulo do Fundo (graus)	<i>Offset</i> (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	1,13	- 6	4,44
2 <sup>1</sup>	1,20	3,96	0,77	0,41	- 5	4,44
2 <sup>2</sup>	1,20	3,96	0,77	0,31	- 4	4,44
3	1,20	3,96	0,77	7,53	6	4,44
4	1,20	3,96	0,77	2,18	- 6	6,58
6	1,20	3,96	0,77	4,08	6	6,58





Plot	Y	Cor	Min.	Máx.	Und	Fator Esc.
1	MSIFY		0,29	8,40	(---)	0,1
2	HW		3,96	7,92	m	
3	SC		0,77	1,03	m/s	0,175
4	MUD		1,20	1,44	(---)	0,19

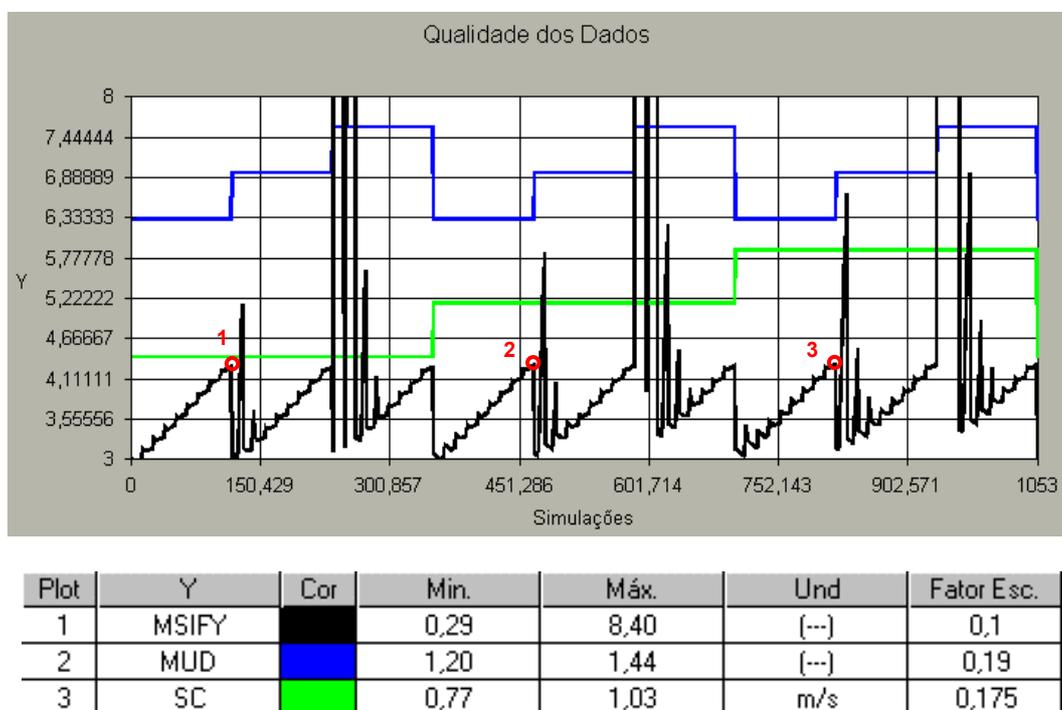
**Figura 4.23** - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com o Fluido de Perfuração, a Velocidade da Corrente e a Altura de Onda.

**Tabela 4.11** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Máxima Relação de Tensão	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	0,427	6	6,58
2	1,20	5,94	0,77	0,425	6	6,58
3	1,20	7,92	0,77	0,419	6	6,58

**b) Influência da Corrente** - A Figura 4.24 ilustra a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento (MSIFY), a velocidade da corrente na superfície (SC) e a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD). Para verificar a influência da velocidade da corrente na superfície, na máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento, optou-se por analisar os casos de 1 a 9 (Figura 4.24) porque a máxima relação das tensões não apresentou mudanças significativas para os demais casos. Nas simulações marcadas pelos círculos 1, 2 e 3, todos os parâmetros de entrada permaneceram constantes, com exceção da velocidade da corrente na superfície (Tabela 4.12). Então, pode-se dizer que a força de arrasto da corrente

contribuiu para o aumento da máxima relação de tensão. Se um percentual de 40% para a máxima relação das tensões fosse adotado como critério para interromper as operações de perfuração, as três simulações marcadas pelos círculos vermelhos indicariam interrupção das operações.



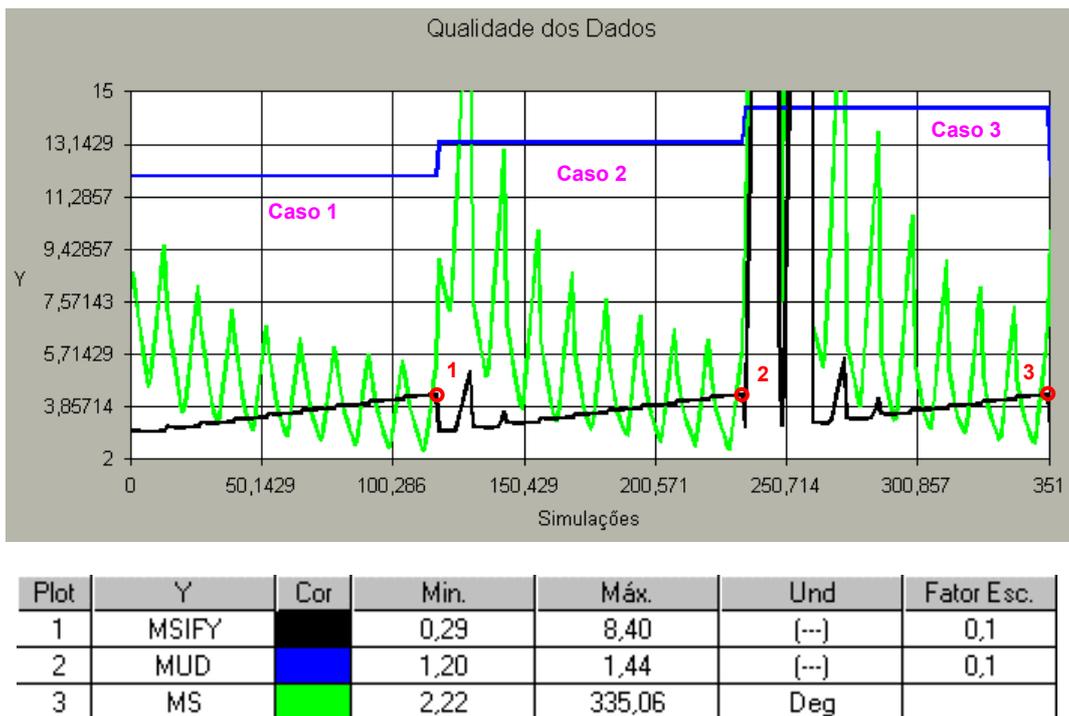
**Figura 4.24** - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com a Velocidade da Corrente e o Fluido de Perfuração.

**Tabela 4.12** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Máxima Relação de Tensão	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	0,427	6	6,58
2	1,20	3,96	0,90	0,429	6	6,58
3	1,20	3,96	1,03	0,430	6	6,58

**c) Influência da Densidade Relativa do Fluido de Perfuração** - A Figura 4.25 ilustra a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento (MSIFY), a densidade relativa do fluido de perfuração (MUD) e a máxima rotação do *riser* (MS). Para verificar a influência da densidade relativa do fluido de perfuração na máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento optou-se por analisar os casos 1, 2 e 3 (Figura 4.25) porque a máxima relação das tensões não apresentou

mudanças significativas para os demais casos. Nas simulações marcadas pelos círculos 1, 2 e 3, Figura 4.25, todos os parâmetros de entrada permaneceram constantes, com exceção da densidade relativa do fluido de perfuração, conforme mostra a Tabela 4.13. Além disso, a máxima rotação do *riser* para estes três círculos manteve-se abaixo de 15°. Pela Figura 4.25 e Tabela 4.13 nota-se que o acréscimo da densidade do fluido de perfuração praticamente não alterou a máxima relação das tensões. Isto ocorreu porque as tensões tangencial e radial sofreram suave acréscimo, enquanto a tensão axial total sofreu redução (provavelmente devido à compressão). Os círculos analisados apresentariam problema caso um critério de 0,40 fosse adotado para a máxima relação das tensões, pois pela Tabela 4.13 verificam-se valores superiores a este critério. Outra observação importante pode ser feita com relação aos valores extremamente elevados da máxima relação das tensões; estes valores surgiram da combinação do maior fluido de perfuração com as menores trações no topo, indicando compressão próximo a cabeça de poço.

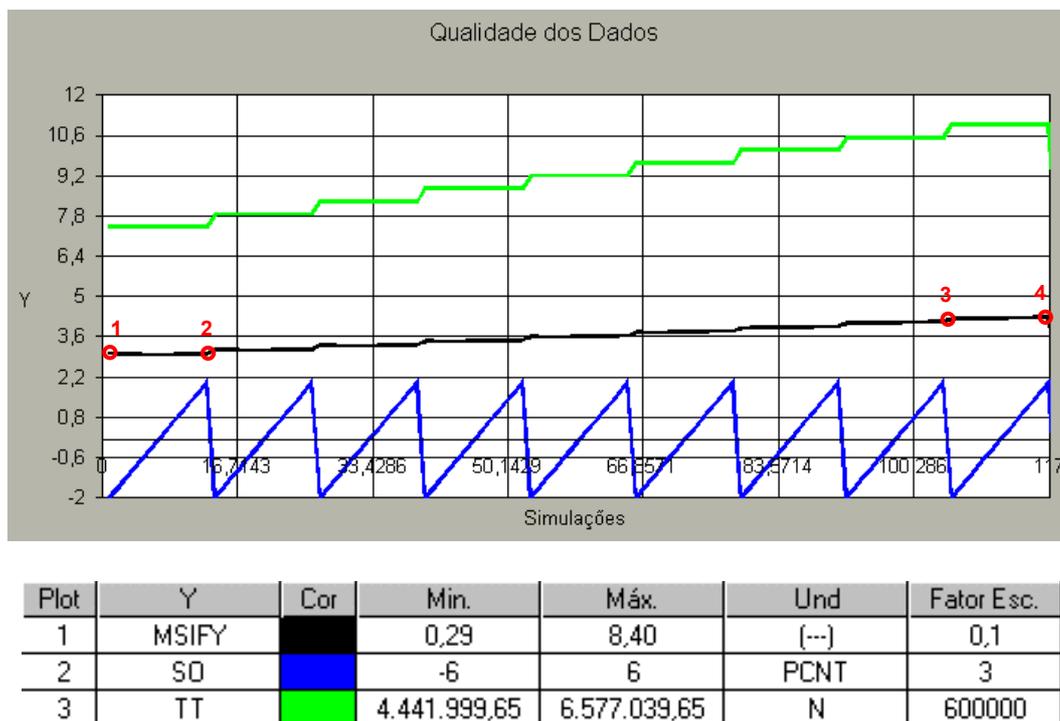


**Figura 4.25** - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com o Fluido de Perfuração e a Máxima Rotação do *Riser*.

**Tabela 4.13 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.**

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Máxima Relação de Tensão	Offset (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	0,427	6	6,58
2	1,32	3,96	0,77	0,427	6	6,58
3	1,44	3,96	0,77	0,426	6	6,58

**d) Influência da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação** - A Figura 4.26 exibe as primeiras 117 simulações para verificar a influência da tração no topo (TT) do *riser* e *offset* estático (SO) da embarcação na máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento (MSIFY).



**Figura 4.26 - Análise da Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento em Conjunto com a Tração no Topo do *Riser* e o *Offset* Estático da Embarcação.**

A influência da tração no topo pode ser verificada pelos círculos 1 e 3 em vermelho, onde todos os parâmetros de entrada, com exceção da tração no topo permaneceram constantes (Tabela 4.14). Os círculos 1 e 3 mostram que o aumento da tração no topo gerou um aumento na máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento. Isto ocorreu porque a tração no topo aumentou a tensão axial total, que por sua vez contribuiu para o aumento da máxima relação das tensões. Deve-se

ter cautela com a componente lateral da tração no topo, pois pode provocar deflexão horizontal excessiva no BOP *stack*.

A influência do *offset* estático da embarcação fica difícil de ser analisada somente pela visualização dos círculos 1 e 2 ou 3 e 4 em vermelho, na Figura 4.26, onde todos os parâmetros de entrada, com exceção do *offset* permaneceram constantes, de acordo com a Tabela 4.14. Todavia, observando a máxima relação das tensões, na Tabela 4.14, com variação dos *offsets* de - 6 a 6 PCNT e tração no topo de 4,44 MN fica muito mais fácil verificar que a máxima relação das tensões apresentou ligeira redução até o *offset* 1 PCNT e pequeno aumento até o 6 PCNT. Desta forma, pode-se concluir que o sentido da movimentação da embarcação pode contribuir para um pequeno aumento ou pequena redução da máxima relação das tensões.

**Tabela 4.14 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Tração no Topo e *Offset* na Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento.**

Círculo	Fluido de Perfuração	Onda (m)	Corrente (m/s)	Máxima Relação de Tensão	<i>Offset</i> (PCNT)	Tração no Topo (MN)
1	1,20	3,96	0,77	0,301	- 6	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,300	- 5	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,299	- 4	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,298	- 3	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,297	- 2	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,296	- 1	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,296	0	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,296	1	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,297	2	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,297	3	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,298	4	4,44
---	1,20	3,96	0,77	0,298	5	4,44
2	1,20	3,96	0,77	0,299	6	4,44
3	1,20	3,96	0,77	0,422	- 6	6,58
4	1,20	3,96	0,77	0,427	6	6,58

#### 4.2.3 - Janelas de Operação

Foram utilizados dois tipos de gráficos para as janelas de operação. Um que exhibe os ângulos da *flex joint* do topo e fundo em função do *offset* da embarcação para a menor e maior tração no topo e outro que exhibe os limites operacionais em função

do *offset* estático da embarcação e tração no topo do *riser*. O primeiro tipo de gráfico tem como principais objetivos ressaltar a influência da tração no topo e *offset* nos ângulos da *flex joint* do topo e fundo e verificar se existem valores destes ângulos que excedam os critérios de perfuração e desconexão. Já o segundo tem como principal objetivo a visualização da região do gráfico que esteja de acordo com os critérios operacionais de perfuração, ou seja, facilitar a visualização dos pares de *offset* e tração no topo para operações seguras de perfuração, caso exista região válida.

Os critérios assumidos para as janelas de operação encontram-se resumidos na Tabela 4.15.

**Tabela 4.15 - Critérios para as Janelas de Operação.**

Parâmetros de Controle	Perfuração	Desconexão
Ângulos Máximos da <i>Flex Joint</i> do Topo e Fundo	4°	10°
Curso da Junta Telescópica	13,42 m	---
Máxima Relação de Tensão (MSIFY)	0,40	---

Todos os gráficos desta seção 4.2.3 correspondem ao caso 1 da Tabela 4.2, ou seja, a uma lâmina d'água de 2.300 m, a uma densidade relativa do fluido de perfuração de 1,20, a um período de excitação da onda de 7 s, a uma altura significativa de onda de 3,96 m e a uma velocidade da corrente na superfície de 0,77 m/s, com exceção das Figuras 4.34 e 4.35 que correspondem aos casos 9 e 27 da Tabela 4.2. Cada caso corresponde a uma janela de operação.

#### 4.2.3.1 - Visualização com os Ângulos da *Flex Joint* do Topo e Fundo

A Figura 4.27 ilustra os ângulos da *flex joint* do topo e fundo em função do *offset* estático da embarcação. As linhas em azul correspondem a maior tração no topo, sendo que, a pontilhada representa o ângulo da *flex joint* do topo e a cheia o ângulo da *flex joint* do fundo. Já as linhas em vermelho, correspondem a menor tração no topo, sendo que, a pontilhada representa o ângulo da *flex joint* do topo e a cheia o ângulo da *flex joint* do fundo. A linha verde representa o critério de 4° para os ângulos nas operações de perfuração, ou seja, um limite operacional que não deve ser ultrapassado, e a linha marrom o critério de 10° para a desconexão.

Observa-se facilmente, na Figura 4.27, que a menor tração no topo registrou valores superiores a 4°, tanto para o ângulo da *flex joint* do topo, quanto para o ângulo da *flex joint* do fundo. Por outro lado, a maior tração no topo registrou valores

compatíveis com o critério de 4°. Para o critério de 10°, constata-se que a desconexão não seria necessária. Nota-se também, mais uma vez, o aumento da resistência devido à rigidez à flexão do sistema do *riser*, que está associado ao aumento da tração no topo. Além disso, verifica-se a inversão do comportamento do ângulo da *flex joint* do fundo à medida que aumenta-se o *offset*, provavelmente causada pela mudança da geometria do *riser*. Adicionalmente, observa-se um comportamento linear entre o ângulo do topo e o *offset* da embarcação.

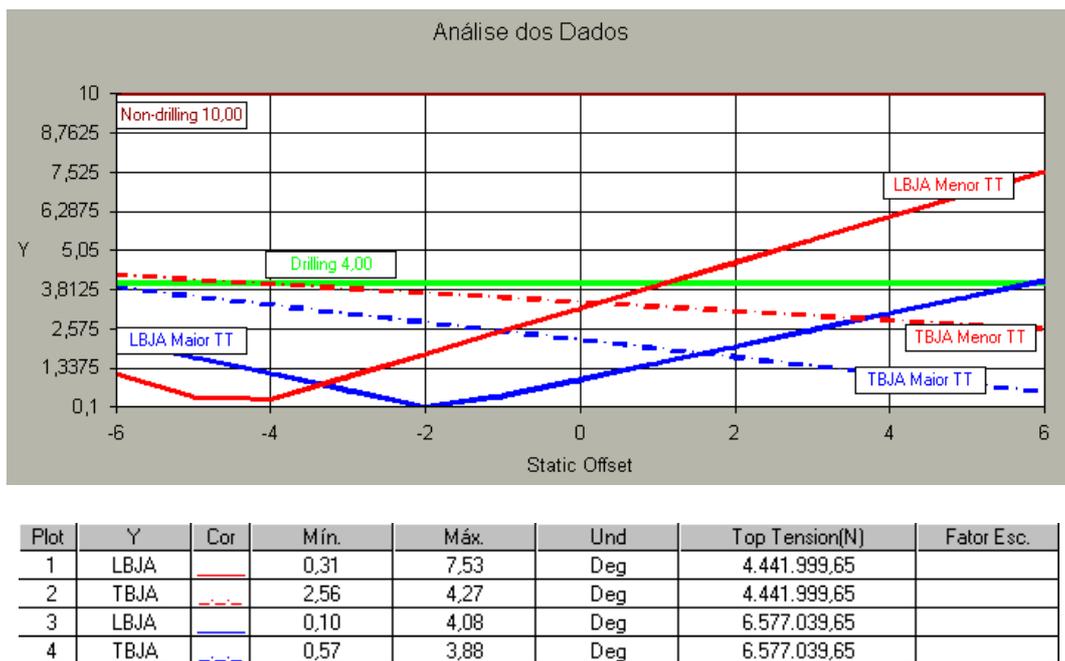


Figura 4.27 - Janela de Operação Visualizando os Ângulos da *Flex Joint* do Topo e Fundo.

#### 4.2.3.2 - Visualização com os Limites Operacionais

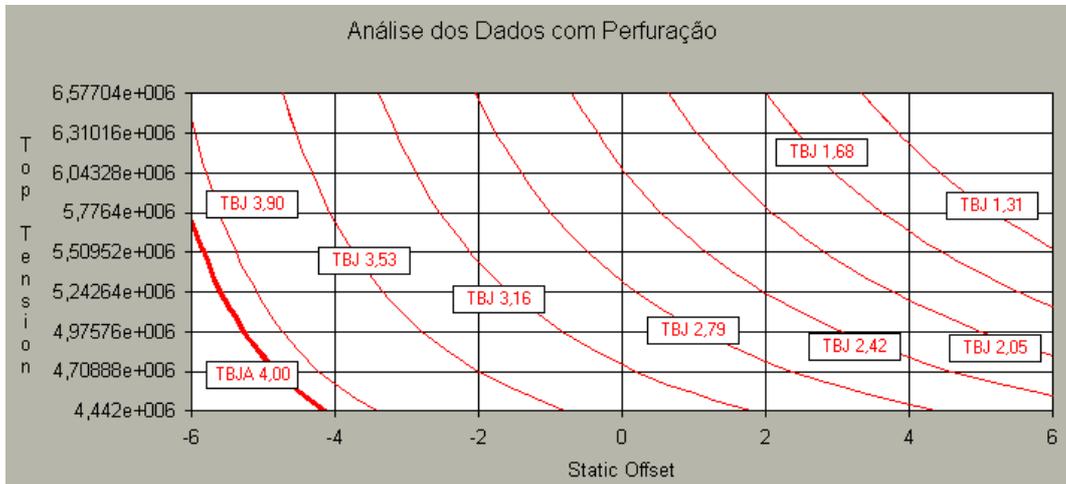
O *offset* estático da embarcação e a tração no topo do *riser* são parâmetros operacionais que podem ser ajustados para manter a integridade do *riser* nas operações de perfuração, ou seja, em acordo com os limites operacionais.

Os limites operacionais adotados para o estudo foram os ângulos da *flex joint* do topo e fundo, curso da junta telescópica e máxima relação da *stress Intensity* pela tensão de escoamento do *riser*.

As curvas dos limites operacionais são ilustradas separadamente da Figura 4.28 a 4.31 para facilitar a visualização dos pares de *offset* e tração no topo que respeitaram os critérios. Assim, seguem os limites operacionais:

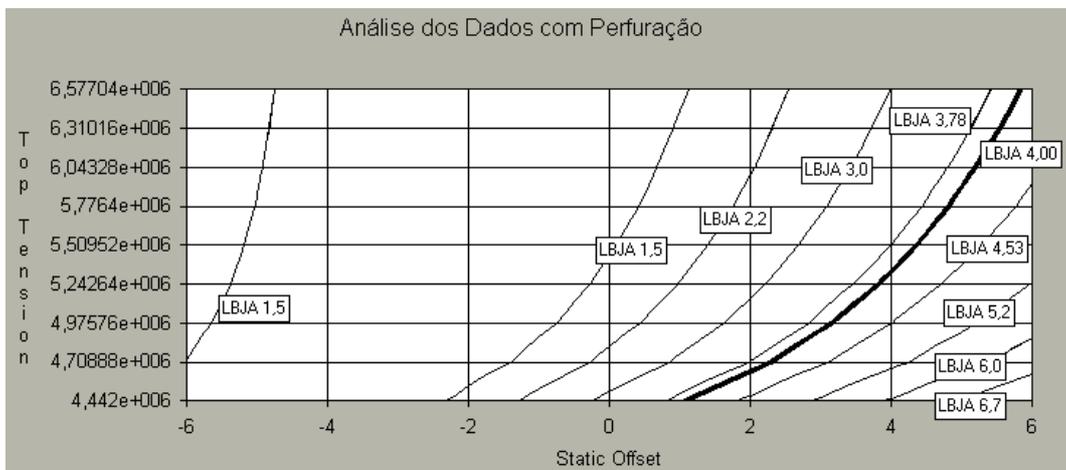
**1) Ângulo da *Flex Joint* do Topo** - A Figura 4.28 ilustra o ângulo da *flex joint* do topo (TBJA) em função da tração no topo do *riser* (top tension) e *offset* estático da

embarcação. Adicionalmente, a Figura 4.28 mostra com uma curva mais grossa o critério de 4° para o ângulo da *flex joint* do topo, sendo assim, todos os pares de *offset* e tração no topo que se encontram à direita desta curva são permissíveis para as operações de perfuração.



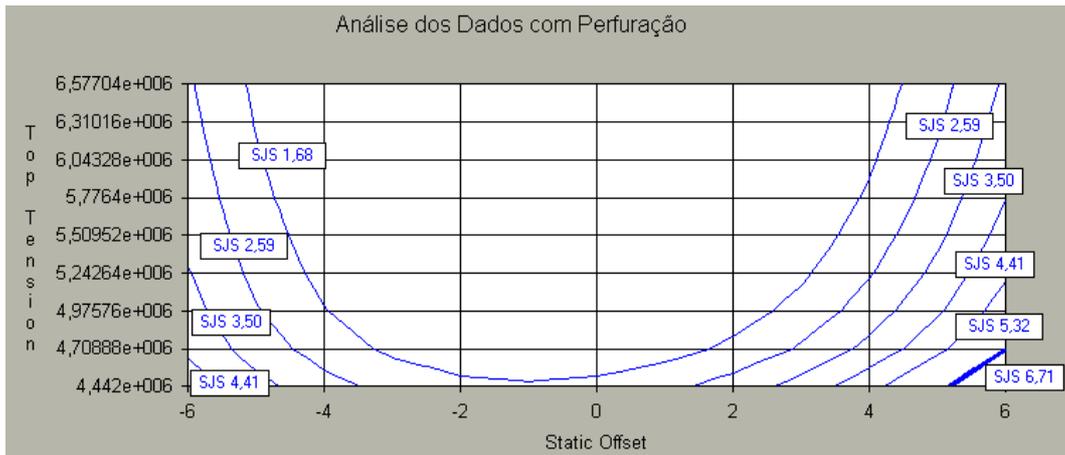
**Figura 4.28** - Ângulo da *Flex Joint* do Topo em Função da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação.

**2) Ângulo da *Flex Joint* do Fundo** - A Figura 4.29 ilustra o ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA) em função da tração no topo do *riser* (top tension) e *offset* estático da embarcação. Adicionalmente, a Figura 4.29 mostra o critério de 4° para o ângulo da *flex joint* do fundo, curva mais grossa; sendo assim, todos os pares de *offset* e tração no topo que se encontram à esquerda da curva limite, 4°, são permissíveis para as operações de perfuração.



**Figura 4.29** - Ângulo da *Flex Joint* do Fundo em Função da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação.

**3) Curso da Junta Telescópica** - A Figura 4.30 ilustra o curso da junta telescópica (SJS) em função da tração no topo do *riser* (top tension) e *offset* estático da embarcação. Adicionalmente, a Figura 4.30 assume um critério de - 6,71 a + 6,71 m para o curso da junta telescópica, indicado pela curva mais grossa. Através da Figura 4.30 observa-se que, com este critério, todos os pares de *offset* e tração no topo que se encontram à esquerda da curva limite, + 6,71 m, são permissíveis para as operações de perfuração.



**Figura 4.30** - Curso da Junta Telescópica em Função da Tração no Topo do *Riser* e *Offset* Estático da Embarcação.

**4) Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento do *Riser*** - A Figura 4.31 ilustra a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento do *riser* (MSIFY) em função da tração no topo do *riser* (top tension) e *offset* estático da embarcação. Adicionalmente, a Figura 4.31 mostra com uma curva mais grossa o critério de 0,40 para a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento do *riser*, sendo assim, todos os pares de *offset* e tração no topo que se encontram abaixo desta curva são permissíveis para as operações de perfuração.

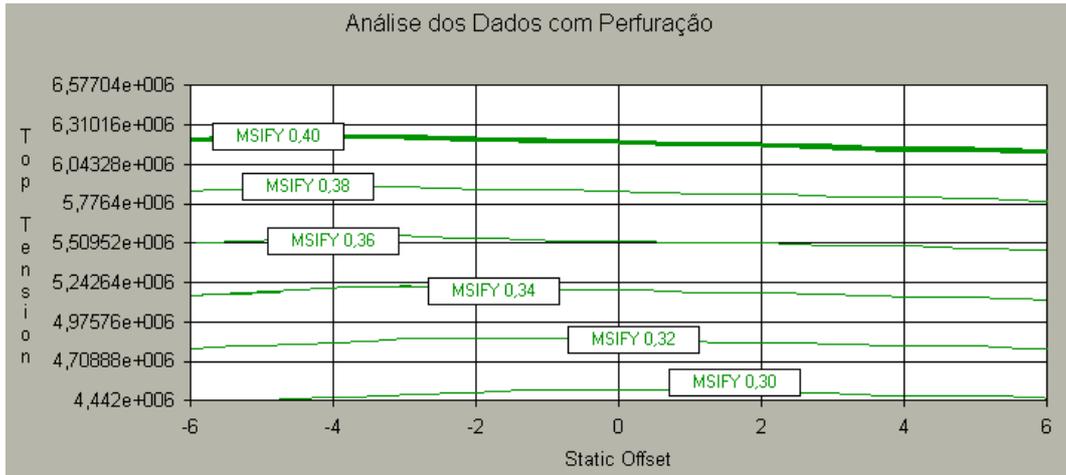
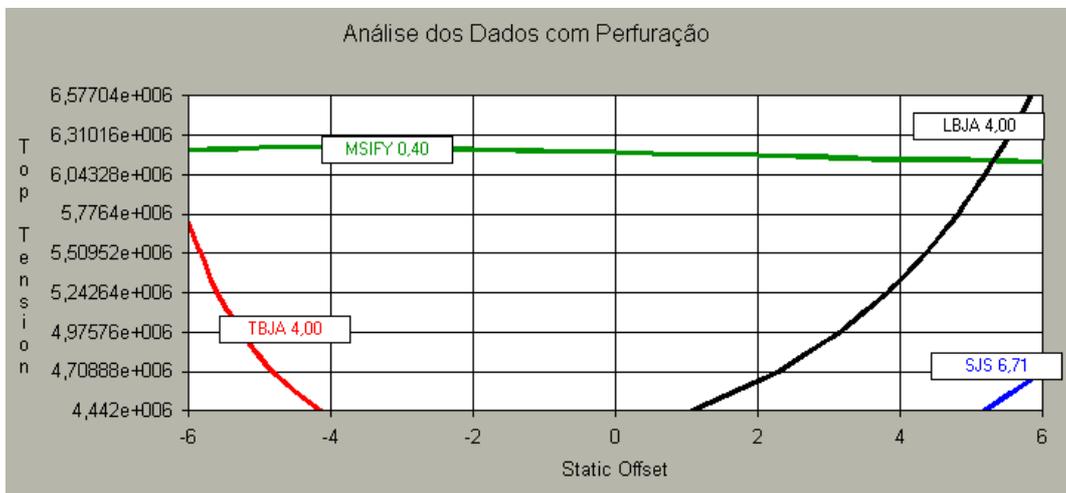


Figura 4.31 - Máxima Relação da *Stress Intensity* pela Tensão de Escoamento do *Riser*.

As observações dos limites operacionais separadamente implicaram em regiões permissíveis diferentes. As regiões permissíveis são os pares de *offset* e tração no topo que foram aceitos pelos diversos critérios. Apesar dos limites operacionais terem sido observados separadamente, eles agem simultaneamente. Então, para que os limites fossem analisados ao mesmo tempo a Figura 4.32 foi elaborada.

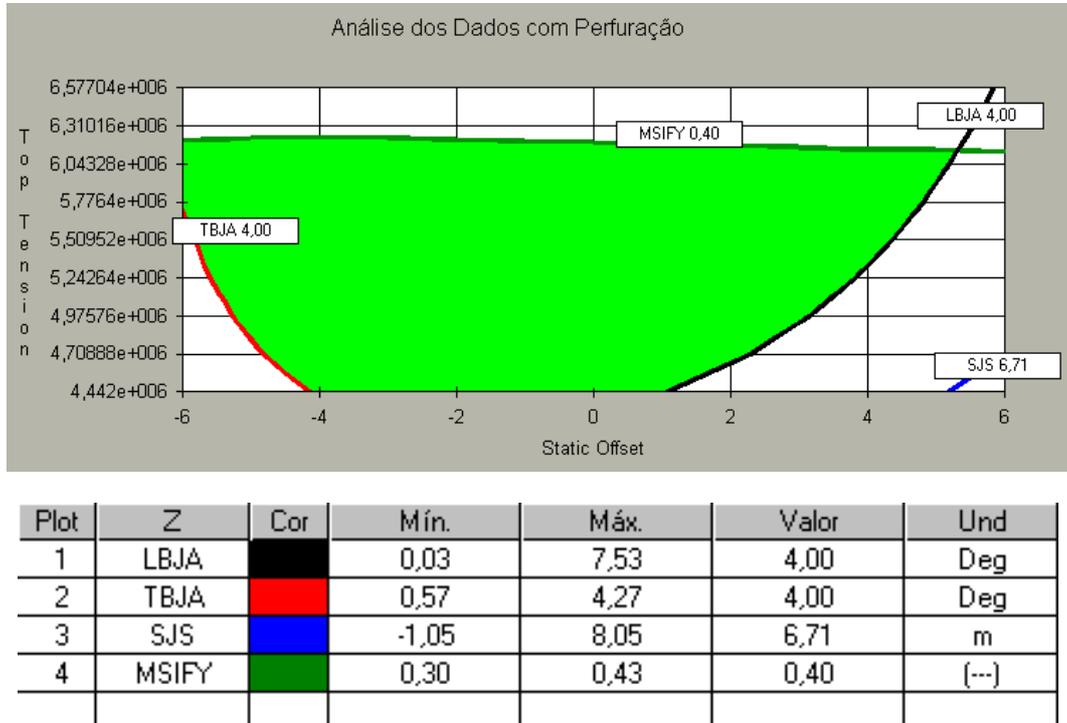


Plot	Z	Cor	Mín.	Máx.	Valor	Und
1	LBJA	Preto	0,03	7,53	4,00	Deg
2	TBJA	Vermelho	0,57	4,27	4,00	Deg
3	SJS	Azul	-1,05	8,05	6,71	m
4	MSIFY	Verde	0,30	0,43	0,40	(--)

Figura 4.32 - Janela de Operação Visualizando os Limites Operacionais.

A Figura 4.32 ilustra o ângulo da *flex joint* do topo (TBJA) em vermelho, o ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA) em preto, o curso da junta telescópica (SJS) em azul e a máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento (MSIFY) em verde em função do *offset* estático da embarcação e tração no topo do *riser*. Pela Figura 4.32 fica claro que o critério que menos restringiu as operações de perfuração foi o curso da junta telescópica. A região do gráfico que respeitou todos os critérios é a que interessa para o projetista ou para o operador do sistema de posicionamento dinâmico (DPS) da embarcação, que no caso da Figura 4.32, foi a interseção das quatro curvas representadas pela máxima relação das tensões (MSIFY), ângulo da *flex joint* do fundo (LBJA), ângulo da *flex joint* do topo (TBJA) e curso da junta telescópica (SJS). A região permissível (região válida) garante que o *riser* prossiga com as operações de perfuração sem prejuízos para os equipamentos da sonda.

A Figura 4.33 é semelhante à Figura 4.32, sendo que, a única diferença é o preenchimento da região válida, em verde. A Figura 4.33 foi elaborada para que não houvesse dúvidas quanto à região permissível, pois com a região colorida em verde fica muito mais fácil identificar os pares de *offset* e tração no topo, sem que se saiba o sentido e direções dos limites operacionais inferiores aos critérios.



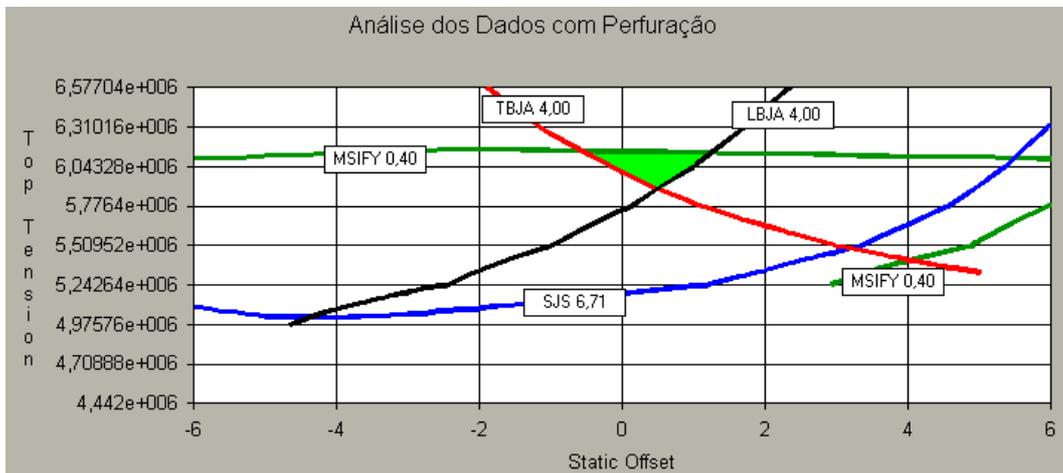
**Figura 4.33** - Janela de Operação Visualizando o Preenchimento da Região Válida.

Com a região permissível bem definida, o projetista tem como avaliar se a escolha de alguns parâmetros tipo espessura de parede e propriedades do material foi bem sucedida. Para o caso da Figura 4.33, pode-se dizer que esta escolha foi bem sucedida para operações normais de perfuração. Provavelmente a escolha não será bem sucedida para operações extremas, onde o *riser* deve ser desconectado, porque não foi projetado para esta finalidade. Para o operador de posicionamento dinâmico, uma região permissível bem definida permite um reposicionamento mais preciso da embarcação, com maior economia de óleo diesel dos propulsores e tomadas de decisões também mais precisas nas operações de parada de perfuração.

Ainda na Figura 4.33, verifica-se que o limite operacional do curso da junta telescópica não restringiu a região permissível, pois os demais critérios restringiram regiões menores.

Caso algum parâmetro de entrada da janela de operação mude, automaticamente a região que está de acordo com os critérios operacionais de perfuração também se altera. A Figura 4.34 apresenta a janela de operação do caso 9 da Tabela 4.2, cujos dados de entrada são mostrados na Tabela 4.16.

Comparando a Figura 4.33 com a Figura 4.34 nota-se que o aumento do fluido de perfuração e da velocidade da corrente na superfície contribuíram bastante para a redução da região válida. Esta redução será comentada na próxima seção.



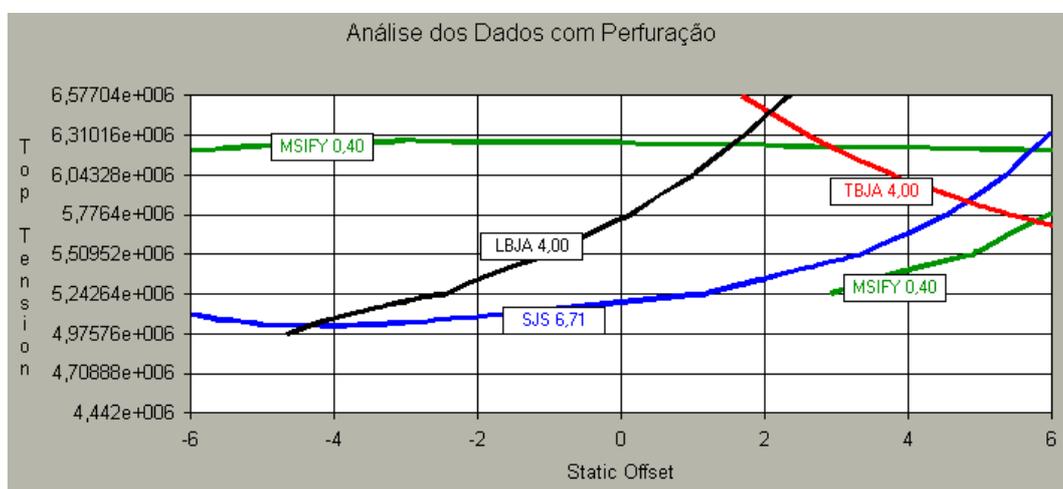
Plot	Z	Cor	Mín.	Máx.	Valor	Und
1	LBJA	Preto	0,11	272,97	4,00	Deg
2	TBJA	Vermelho	2,26	7,13	4,00	Deg
3	SJS	Azul	0,15	1.365,38	6,71	m
4	MSIFY	Verde	0,34	8,40	0,40	(--)

**Figura 4.34** - Janela de Operação com os Parâmetros de Entrada Alterados.

**Tabela 4.16 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Alteração da Janela de Operação.**

Caso	Lâmina D'água (m)	Fluido de Perfuração	Período de Excitação (s)	Altura da Onda (m)	Velocidade da Corrente (m/s)
9	2.300	1,44	7	3,96	1,03

Um caso extremo onde não ocorreu região válida é apresentado na Figura 4.35. Os parâmetros de entrada desta janela de operação encontram-se na Tabela 4.17 e correspondem ao caso 27 da Tabela 4.2. Comparando-se os dados de entrada das Tabelas 4.17 e 4.16, conclui-se que a condição de onda mais severa implicou em uma janela de operação sem região válida.



Plot	Z	Cor	Mín.	Máx.	Valor	Und
1	LBJA	Preto	0,11	272,92	4,00	Deg
2	TBJA	Vermelho	3,05	7,78	4,00	Deg
3	SJS	Azul	0,18	1.364,92	6,71	m
4	MSIFY	Verde	0,33	8,40	0,40	(--)

**Figura 4.35 - Janela de Operação sem Região Válida.**

**Tabela 4.17 - Valores dos Parâmetros de Entrada da Janela de Operação sem Região Válida.**

Caso	Lâmina D'água (m)	Fluido de Perfuração	Período de Excitação (s)	Altura da Onda (m)	Velocidade da Corrente (m/s)
27	2.300	1,44	11	7,92	1,03

#### 4.2.3.3 - Comportamento das Janelas de Operação em Função da Onda, Corrente e Fluido de Perfuração

O comportamento das janelas de operação em função da onda, corrente e fluido de perfuração foi verificado através da análise das Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 respectivamente, as quais ilustram três janelas de operação por figura. Cada janela de operação corresponde a um caso da Tabela 4.2 e o contorno é formado pelos critérios dos ângulos da *flex joint* do topo e fundo, curso da junta telescópica e máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento. Apresentam-se a seguir as influências da onda, da corrente e do fluido de perfuração nas janelas de operação:

**a) Influência da Onda** - A Figura 4.36 ilustra três janelas de operação que correspondem aos casos 1, 10 e 19 da Tabela 4.18. Estas três janelas indicam que a variação da altura de onda reduziu a região válida.

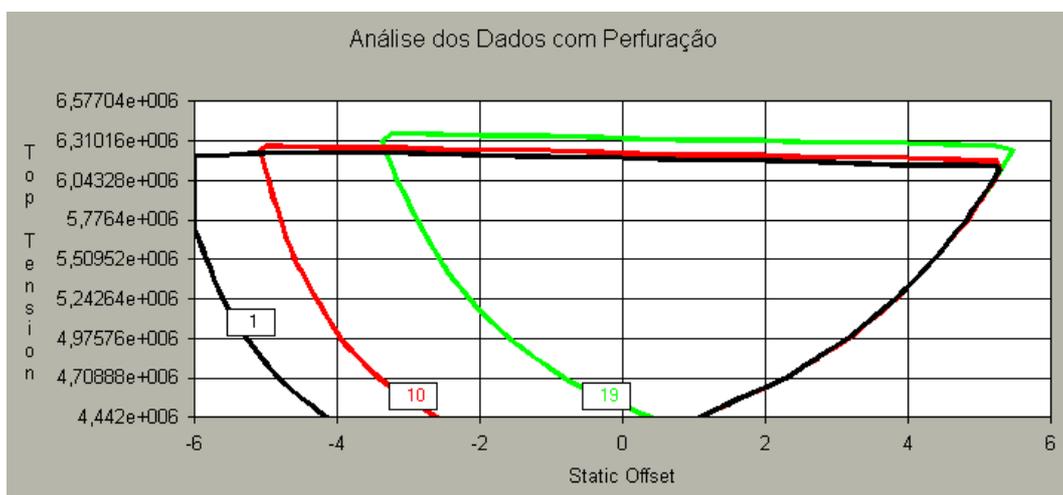


Figura 4.36 - Comportamento das Janelas de Operação em Função da Onda.

Tabela 4.18 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Onda nas Janelas de Operação.

Caso	Lâmina D'água (m)	Fluido de Perfuração	Período de Excitação (s)	Altura da Onda (m)	Velocidade da Corrente (m/s)
1	2.300	1,20	7	3,96	0,77
10	2.300	1,20	9	5,94	0,77
19	2.300	1,20	11	7,92	0,77

Conforme pode-se observar na Figura 4.36 o limite operacional que mais influenciou na redução da região válida foi o ângulo da *flex joint* do topo, pois a influência da altura de onda é muito maior na região próxima a superfície livre.

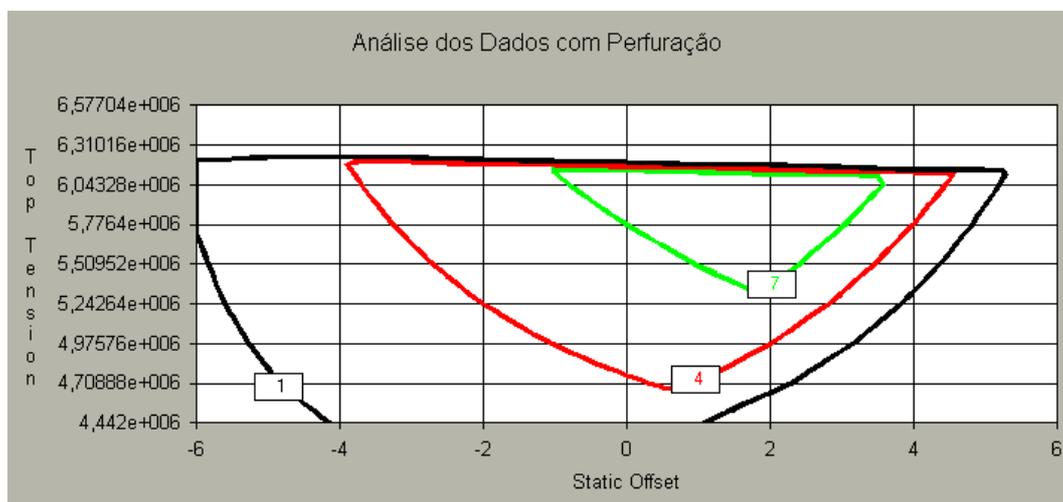
O limite operacional do ângulo da *flex joint* do fundo não apresentou variação para o critério de 4°, pois para regiões com lâminas d'água profundas a força total da onda apresenta pouca influência neste ângulo. Assim, o ângulo da *flex joint* do fundo não contribuiu nem para o aumento nem para a redução da região válida.

A máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento apresentou um sutil aumento da região válida. Isto ocorreu porque o aumento da altura da onda, para determinado par de *offset* e tração no topo, diminuiu a máxima relação das tensões. Então, para manter um critério de 0,40, a tração no topo teve que sofrer acréscimo, pois esta tração tende a elevar a máxima relação das tensões.

**b) Influência da Corrente** - A Figura 4.37 ilustra três janelas de operação que correspondem aos casos 1, 4 e 7 da Tabela 4.19. Estas três janelas indicam que a variação da velocidade da corrente reduziu a região válida.

O limite operacional que mais influenciou na redução da região válida foi, novamente, o ângulo da *flex joint* do topo, pois a influência da corrente é muito maior na região próxima a superfície devido ao seu perfil triangular.

O limite operacional do ângulo da *flex joint* do fundo também reduziu a região válida, porém com menor intensidade. Isto se deve ao fato de que a influência da corrente ser menor próxima ao fundo do mar, no entanto, o *riser* apresenta maiores rotações com o aumento da corrente que também influencia o ângulo da *flex joint* do fundo.



**Figura 4.37** - Comportamento das Janelas de Operação em Função da Corrente.

A máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento apresentou pouca redução da região válida. Isto ocorreu porque o aumento da velocidade da corrente aumentou os valores da máxima relação das tensões. Então, para manter um

critério de 0,40, a tração no topo teve que sofrer decréscimo, pois menores trações no topo tendem a reduzir a máxima relação das tensões.

**Tabela 4.19 - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência da Corrente nas Janelas de Operação.**

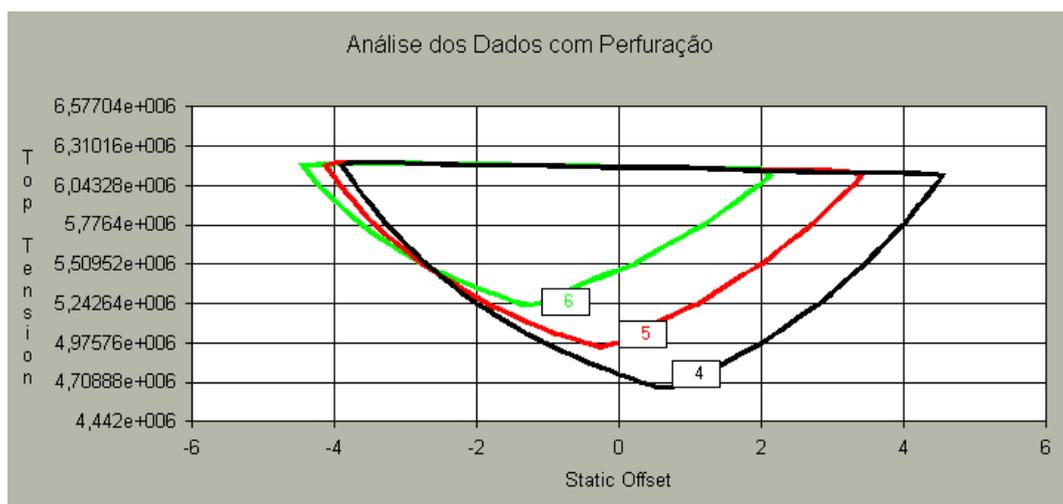
Caso	Lâmina D'água (m)	Fluido de Perfuração	Período de Excitação (s)	Altura da Onda (m)	Velocidade da Corrente (m/s)
1	2.300	1,20	7	3,96	0,77
4	2.300	1,20	7	3,96	0,90
7	2.300	1,20	7	3,96	1,03

**c) Influência do Fluido de Perfuração** - A Figura 4.38 ilustra três janelas de operação que correspondem aos casos 4, 5 e 6 da Tabela 4.20. Estas três janelas indicam que o acréscimo da densidade do fluido de perfuração reduziu a região válida.

O limite operacional que mais influenciou na redução da região válida foi o ângulo da *flex joint* do fundo, pois a influência do fluido de perfuração é muito maior na região próxima ao fundo do mar, isto devido ao aumento de massa global do sistema do *riser*.

O limite operacional do ângulo da *flex joint* do topo reduziu a região válida abaixo do ponto de interseção do contorno do ângulo do topo das três janelas e aumentou a região válida acima deste ponto. A redução da região válida ocorreu porque abaixo do ponto de interseção, à medida em que se aumenta o fluido de perfuração, aumenta-se também o ângulo da *flex joint* do topo, então para manter o ângulo do topo com um valor constante de 4°, o contorno apresentou valores maiores para os *offsets* e maiores para as trações no topo, pois os ângulos da *flex joint* do topo se reduzem nesta situação. Já o aumento da região válida ocorreu porque acima do ponto de interseção, à medida em que se aumenta o fluido de perfuração, diminui-se o ângulo da *flex joint* do topo; então para manter o ângulo do topo com um valor constante de 4°, o contorno apresentou valores menores para os *offsets* e menores para as trações no topo, pois os ângulos da *flex joint* do topo aumentam nesta situação.

A máxima relação da *stress intensity* pela tensão de escoamento quase não apresentou variação da região válida. Isto ocorreu porque o fluido de perfuração tem pouca influência na *stress intensity* para as maiores trações no topo, onde se concentraram o critério de 0,40.



**Figura 4.38** - Comportamento das Janelas de Operação em Função do Fluido de Perfuração.

**Tabela 4.20** - Valores dos Parâmetros de Entrada para Verificar a Influência do Fluido de Perfuração nas Janelas de Operação.

Caso	Lâmina D'água (m)	Fluido de Perfuração	Período de Excitação (s)	Altura da Onda (m)	Velocidade da Corrente (m/s)
4	2.300	1,20	7	3,96	0,90
5	2.300	1,32	7	3,96	0,90
6	2.300	1,44	7	3,96	0,90

Nos itens a, b e c desta seção 4.2.3.3 o único limite operacional que não contribuiu com o contorno das janelas de operação foi o curso da junta telescópica, pois o critério de 13,42 m para o curso da junta englobou uma região válida muito ampla, enquanto os demais critérios restringiram regiões menores.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no capítulo 4 consideraram, para o estudo, o *riser* de perfuração da plataforma semi-submersível Stena Tay, instalada na Bacia de Campos a 2.300 m de lâmina d'água com ondas do tipo regulares. De posse desses resultados e da construção do pós-processador pode-se concluir o seguinte:

- ✓ O pós-processador desenvolvido no trabalho foi capaz de conduzir com sucesso o controle de qualidade dos dados de entrada e saída das simulações numéricas provenientes do DERP, as análises do comportamento estrutural do *riser* e a construção das janelas de operação. As janelas de operação mostraram a grande contribuição do pós-processador, pois são superimportantes para o projetista e para o operador de sistema de posicionamento dinâmico da embarcação que podem adotar decisões importantes com relação à segurança dos equipamentos da sonda e das vidas humanas envolvidas nas operações de perfuração.
- ✓ O gráfico da qualidade dos dados de entrada se mostrou bastante útil, não só para o controle de qualidade, mas também para o entendimento da variação dos parâmetros ao longo das simulações.
- ✓ No controle de qualidade dos parâmetros de saída, o único parâmetro que não apresentou valores extremamente elevados foi o ângulo da *flex joint* do topo, porém alguns trechos destas simulações apresentaram máxima rotação do *riser* acima do valor limite, 15°.
- ✓ O ângulo da *flex joint* do fundo, o curso da junta telescópica e a máxima relação das tensões apresentaram comportamentos semelhantes ao da máxima rotação do *riser* e os picos com valores extremamente elevados devem-se provavelmente ao aumento da densidade relativa do fluido de perfuração em *offsets* excessivos, associados a trações baixas, contribuindo desta forma para o colapso do *riser*.
- ✓ A janela de operação, com o preenchimento da região permissível, mostrou-se bastante eficiente para auxiliar o projeto estrutural do sistema do *riser* e monitorar o posicionamento da embarcação.
- ✓ O aumento da altura significativa de onda tendeu a aumentar o ângulo da *flex joint* do topo e apresentou pequena influência no ângulo da *flex joint* do fundo e máxima relação das tensões.

- ✓ O aumento da velocidade da corrente na superfície proporcionou aumento dos ângulos da *flex joint* do topo e fundo e da máxima relação das tensões.
- ✓ O aumento da densidade relativa do fluido de perfuração apresentou redução do ângulo da *flex joint* do topo para os *offsets* menores e aumento para os maiores, tendeu a aumentar o ângulo da *flex joint* do fundo e teve pouca influência na máxima relação das tensões.
- ✓ A tração no topo do *riser*, com o seu aumento, gerou ângulos da *flex joint* do topo menores; aumentou o ângulo da *flex joint* do fundo para os menores *offsets* e reduziu para os maiores; e proporcionou aumento significativo para a máxima relação das tensões.
- ✓ Com o aumento do *offset* estático da embarcação, verificou-se redução no ângulo da *flex joint* do topo; redução também do ângulo da *flex joint* do fundo para os menores *offsets* e aumento para os maiores; e redução da máxima relação das tensões para os menores *offsets* e aumento para os maiores. Estas observação são válidas para as menores trações no topo.
- ✓ A janela de operação deve ser analisada com o máximo de parâmetros possíveis, pois cada parâmetro pode restringir regiões diferentes.
- ✓ Condições ambientais severas podem promover janelas de operação sem condições seguras para perfuração (sem região permissível).
- ✓ A influência da altura significativa de onda na janela de operação resultou na redução da região permissível e o critério que mais sofreu sua influência foi o ângulo da *flex joint* do topo.
- ✓ A influência da velocidade da corrente na superfície na janela de operação acarretou na redução da região permissível e mais uma vez o critério que mais sofreu influência foi o ângulo da *flex joint* do topo, seguido do ângulo da *flex joint* do fundo.
- ✓ A influência do fluido de perfuração na janela de operação proporcionou redução da região de interesse e o limite operacional que mais sofreu influência foi o ângulo da *flex joint* do fundo, seguido do ângulo da *flex joint* do topo.
- ✓ O único limite operacional que não contribuiu para o contorno das janelas de operação foi o curso da junta telescópica, pois o valor do critério adotado englobou uma região muito ampla do gráfico.
- ✓ A metodologia de apresentação de resultados mostrada neste trabalho tem grande poder de síntese, pois resume graficamente o grande volume de saída de dezenas ou centenas de casos de carregamentos utilizados na análise de

um *riser*, e por consequência reduzindo consideravelmente o tempo necessário para sua interpretação e obtenção de conclusões.

- ✓ Além disto, permite de um modo simples a inclusão de outros limites operacionais no diagrama tração x *offset*, como por exemplo momento fletor limite em determinada posição do *riser*, tensão de flexão dinâmica limite para controle do dano à fadiga, etc.
- ✓ Para o tipo de gráfico: “Critérios - Área”, o pós-processador proporcionou velocidade de processamento muito baixa para o preenchimento da região válida.

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se destacar os principais tópicos:

- ✓ Melhoria do algoritmo do preenchimento da região permissível para o aumento da velocidade de processamento, independente do tamanho da janela de operação.
- ✓ Execução do controle de qualidade, análises e construção das janelas de operação para ondas do tipo irregulares, principalmente para verificar se os picos com valores extremamente elevados surgem com o aumento da densidade relativa do fluido de perfuração.
- ✓ Condução de novas simulações com diferentes profundidades e perfil de corrente reverso, para verificar a influência nas janelas de operação.
- ✓ Desenvolvimento de critérios para constatar a ordem de influência dos parâmetros de entrada sobre os limites operacionais do *riser* de perfuração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FIGUEIREDO, M. W. de, *Estudo de Cargas em Cabeça de Poço Submarino em Operações de Completação*. Tese de M.Sc., Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- [2] SUZUKI, H., WATANABE, K., YOSHIDA, K., "Development and Experimental Verification of Three-Dimensional Structural Control of Deep Sea Drilling Riser". *20<sup>th</sup> Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, OMAE2001/OFT1142, Rio de Janeiro, Brazil, 3-8 June, 2001.
- [3] YOUNG, R. D., FOWLER, J. R., SANDERS, D. R., *et al*, *Dynamic Analysis of Marine Risers Theoretical Manual*. Harry J. Sweet & Associates, INC., 1 ed. Houston, TX, USA, 1976.
- [4] YOUNG, R. D., MILLER, C. A., FOX, S. A., *et al*, *DERP User's Manual*. Stress Engineering Services, INC., 4 ed. Houston, TX, USA, 1996.
- [5] American Petroleum Institute (API), *Recommended Practice for Design and Operation of Completion/Workover Riser Systems*. API RP 17G, 1 ed. Washington, API, 1994.
- [6] DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNICAMP, *Águas Ultraprofundas no Brasil - [http://www.dep.fem.unicamp.br/boletim/boletim05/art\\_03.htm](http://www.dep.fem.unicamp.br/boletim/boletim05/art_03.htm)*, na Internet.
- [7] LYONS, G. J., PATEL, M. H., WITZ, J. A., *et al*, *Vertical Riser Design Manual*. University College London, 2 ed. London, Bentham Press, 1994.
- [8] CHAKRABARTI, S. K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publications. 1 ed. Great Britain, Henry Ling Ltd., 1987.
- [9] BREBBIA, C. A., WALKER, S., *Dynamic Analysis of Offshore Structures*. 1 ed. England, Billing & Sons Ltd., 1979.
- [10] ROVERI, F., E., *Stena Tay - Esforços Atuantes na Cabeça de Poço*. Comunicação Técnica - Petrobras/CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello - CT PDEP/TS nº 075/2001, Rio de Janeiro, 2001.
- [11] HATTON, S., "The Effect of Deep Water Currents on Drilling Riser Operations", 2H Offshore Engineering Limited, *Latest Developments in Riser Design for Deep & Ultra Deep Waters, IIR*, Aberdeen, June 2001.
- [12] DAWSON, T. H., *Offshore Structural Engineering*. v. 1, 1 ed. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall International, Inc., 1983.
- [13] American Petroleum Institute (API), *Recommended Practice for Design, Selection, Operation and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems*. API RP 16Q, 1 ed. Washington, API, 1993.

- [14] American Petroleum Institute (API), *Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension Leg Platforms (TLPs)*. API Recommended Practice 2RD, 1 ed. Washington, API, 1998.
- [15] FARRANT, T., JAVED, K., "Minimising the Effect of Deepwater Currents on Drilling Riser Operations", 2H Offshore Engineering Limited, *Deepwater Drilling Technologies*, Aberdeen Marriot, Aberdeen, January, 2001.
- [16] HOWELLS, H., WALTERS, D., "Deepwater Drilling Riser Integrity - Fatigue, Wear, Inspection and Monitoring", 2H Offshore Engineering Limited, *Presented at International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE*, New Orleans, LA, USA, February 2000.
- [17] OSEN, P., JOHANNESSEN, B., STROMSEM, K., *et al*, "Instrumented Monitoring of Workover Risers", *Offshore Technology Conference*, OTC 8797, Houston, TX, USA, May, 1998.
- [18] THOMAS, J. E., TRIGGIA, A. A., CORREIA, C. A., *et al*, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 1 ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2001.
- [19] OFFSHORE, "World Trends and Technology for Offshore Oil and Gas Operations", *International Edition-Offshore Magazine* v. 62, n. 8, Aug. 2002.
- [20] FORD, J., T., *Subsea Drilling and Production*. Department of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University.
- [21] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DRILLING CONTRACTORS, *Global Leadership for the Drilling Industry* - <http://www.iadc.org/dcpi/dc-septoct00/s-hydra.pdf>, September/October 2000, on the Internet.
- [22] IMAKITA, A., TANAKA, S., AMITANI, Y., *et al*, "Intelligent Riser Angle Control DPS", *Proceedings of ETCE/OMAE2000 Joint Conference*, OMAE2000/OSU OFT-3001, New Orleans, LA, USA, Feb 14-17, 2000.
- [23] YAMAMOTO, I., MATSUURA, M., HIRAYAMA, H., *et al*, "Dynamic Positioning System of Offshore Platform by Advanced Control", *The 20<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE2001/OFT-5102, Rio de Janeiro, Brazil, 3-8 June, 2001.
- [24] DRIL-QUIP, INC, General Catalog. Printed in USA, 2000.
- [25] OFFSHORE ENGINEER, "Dual Gradient Drilling-Offshore Americas-Wet Gas Metering", *Offshore Magazine*, July 2002.
- [26] DEAM, R. G., DALRYMPLE, R. A., *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. v. 2, 2 ed. Singapore, World Scientific, 1991.
- [27] MORGAN, G. W., PERET J. W., "Applied Mechanics of Marine Riser Systems", *Petroleum Engineer Publishing Company*, Dallas, TX, USA, 1976.

[28] KUBOTA, H. Y., *Comportamento Dinâmico de um Riser Rígido de Produção*. Tese de M.Sc., Faculdade de Engenharia Mecânica, FEM e IG/UNICAMP, São Paulo, Brasil, 2003.

[29] SOUSA, J. R. M. de, *Análise de Vibrações Axiais Induzidas por Desprendimento de Vórtice*. Seminário de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

### **PERFURAÇÃO DE UM POÇO DE PETRÓLEO**

## ÍNDICE DO ANEXO 1

TÓPICO	PÁGINA
<b>1 - PERFURAÇÃO</b> .....	87
<b>1.1 - Equipamentos da Sonda de Perfuração</b> .....	87
<b>1.2 - Colunas de Perfuração</b> .....	93
1.2.1 - Comandos .....	93
1.2.2 - Tubos Pesados .....	94
1.2.3 - Tubos de Perfuração .....	94
1.2.4 - Acessórios da Coluna de Perfuração .....	94
1.2.5 - Ferramentas de Manuseio da Coluna .....	96
<b>1.3 - Brocas</b> .....	97
<b>1.4 - Fluidos de Perfuração</b> .....	97
<b>1.5 - Operações Normais de Perfuração</b> .....	98
1.5.1 - Alargamento e Repassamento .....	98
1.5.2 - Conexão, Manobra e Circulação .....	99
1.5.3 - Revestimento de um Poço de Petróleo .....	99
1.5.4 - Cimentação de Poços de Petróleo .....	100
1.5.5 - Perfilagem a Poço Aberto .....	100
1.5.6 - Movimentação da Sonda .....	100
<b>1.6 - Operações Especiais de Perfuração</b> .....	100
1.6.1 - Controle de <i>kicks</i> .....	101
1.6.2 - Pescaria .....	101
1.6.3 - Testemunhagem .....	102
<b>1.7 - Perfuração Direcional</b> .....	102
<b>1.8 - Perfuração Marítima</b> .....	103
1.8.1 - Tipos de Unidades .....	103
1.8.2 - Sistemas de Cabeça de Poço Submarino .....	107
1.8.3 - Cabeça de Poço em Sondas Flutuantes .....	110
1.8.4 - Movimentos de uma Sonda .....	111
1.8.5 - Equipamentos Auxiliares .....	112
1.8.6 - Sistema de Posicionamento Dinâmico .....	113
1.8.7 - Principais Componentes do <i>Riser</i> de Perfuração .....	114

## 1 - PERFURAÇÃO

A perfuração de um poço de petróleo pode ser executada por dois métodos: o percussivo e o rotativo. Raríssimos são os poços perfurados pelo método percussivo que consiste em fragmentar ou esmagar as rochas através de golpes alternados com uma broca de aço. Já o método rotativo [18] é largamente utilizado na perfuração de um poço de petróleo e utiliza uma sonda, ilustrada na Figura 1.1. Na perfuração rotativa, as rochas são perfuradas pela rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, a qual consiste basicamente de comandos e tubos de perfuração. Um fluido de perfuração ou lama, para retirada dos fragmentos da rocha, é injetado por bombas no interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*, sai pela outra extremidade da coluna de perfuração onde está a broca e retorna à superfície pelo espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna. Quando determinada profundidade é atingida, retira-se a coluna de perfuração e um revestimento de aço com diâmetro inferior ao da broca é inserido no poço. O anular entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é cimentado para isolar as rochas atravessadas, permitindo mais segurança na perfuração. Após a cimentação, a coluna é novamente inserida no poço, com uma nova broca de diâmetro menor do que o do revestimento. Esta operação de cimentação e troca de brocas se repete até atingir o término da perfuração.

### 1.1 - Equipamentos da Sonda de Perfuração

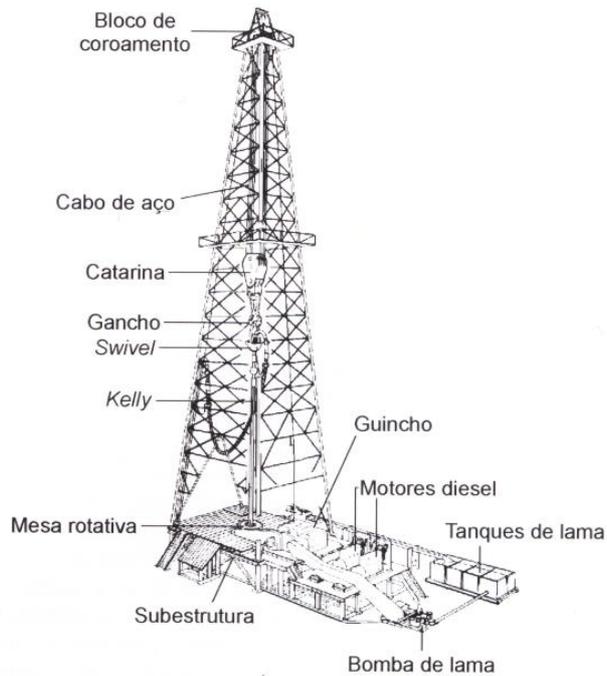
Os Equipamentos da Sonda de Perfuração estão envolvidos com as operações de sustentação de cargas, de geração e transmissão de energia, de movimentação de carga, de rotação, de circulação, de segurança do poço, de monitoração e subsuperfície (coluna de perfuração). Assim, seguem os equipamentos da sonda numerados de 1 a 13:

#### 1) Torre ou Mastro

A torre ou mastro é uma estrutura de aço especial, de forma piramidal, podendo ter mais de 45 metros de altura, pois deve deixar um espaço livre para as operações de manobra.

#### 2) Subestrutura

A estrutura é constituída de vigas de aço especial, suporta os equipamentos da sonda e compõe o espaço de trabalho.



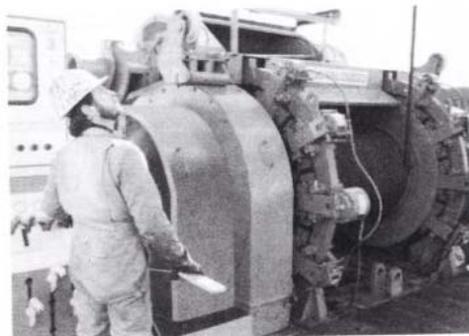
**Figura 1.1** - Esquema de uma Sonda Rotativa [18].

### 3) Fontes de Energia

A energia de acionamento dos equipamentos da sonda, geralmente é fornecida por motores diesel. Nas sondas marítimas, quando existe produção de gás, é comum e econômico o uso de turbinas a gás para alimentação de toda a plataforma.

### 4) Guincho

O guincho, Figura 1.2, é um dos responsáveis pela movimentação de cargas no interior do poço e também permite o controle de peso sobre a broca.



**Figura 1.2** - Guincho [18].

### 5) Bloco de Coroamento

É um conjunto estacionário de 4 a 7 polias (Figura 1.3) montadas em linha num eixo suportado por dois mancais de deslizamento; localiza-se na parte superior da torre e suporta todas as cargas pelo cabo de perfuração.

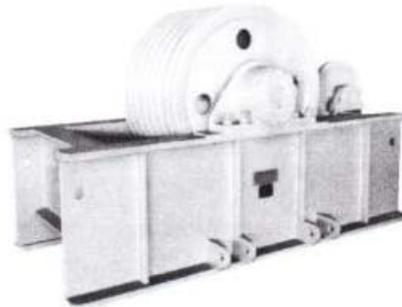


Figura 1.3 - Bloco de Coroamento [18].

### 6) Catarina

A catarina (Figura 1.4) é composta por um conjunto de 3 a 6 polias móveis montadas em um eixo que se apóia nas paredes externas da própria estrutura da Catarina. Na parte inferior da Catarina encontra-se uma alça, onde é preso o gancho. O gancho contém um sistema de amortecimento interno para evitar a transmissão dos golpes, causados na movimentação de cargas, à catarina.

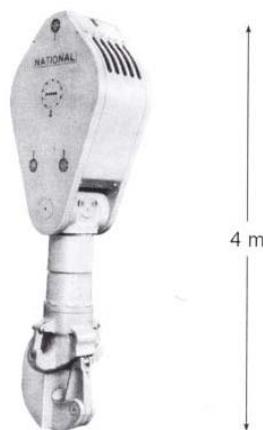
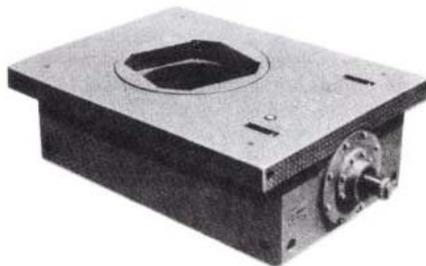


Figura 1.4 - Catarina [18].

## 7) Mesa Rotativa

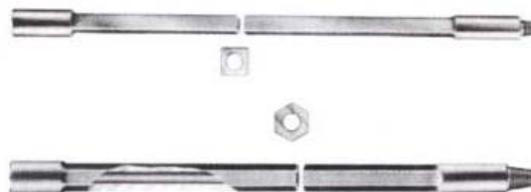
A mesa rotativa (Figura 1.5) é o equipamento que transmite rotação à coluna de perfuração e permite o livre deslizamento do *kelly* no seu interior. Em certas operações a mesa deve suportar o peso da coluna.



**Figura 1.5** - Esquema à Esquerda [18] e Foto (sistema manual antigo) à Direita [19] de Mesa Rotativa.

## 8) Kelly

O *kelly* (Figura 1.6) transmite a rotação da mesa rotativa para a coluna de perfuração. O *kelly* pode ter dois tipos de seção: quadrada ou hexagonal. A quadrada é usada em sondas de terra e a hexagonal em sondas marítimas, pela maior resistência à tração, torção e flexão.

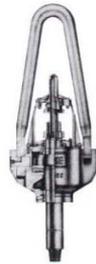


**Figura 1.6** - Seção Quadrada e Hexagonal do *Kelly* [18].

## 9) Cabeça de injeção

A cabeça de injeção ou *swivel* (Figura 1.7) é o equipamento que separa os elementos rotativos dos estacionários pertencentes à sonda. Assim, a parte superior não se move e a inferior permite rotação. A cabeça de injeção é o elemento que

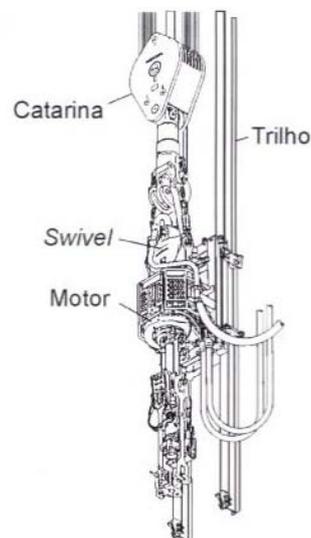
permite a injeção do fluido de perfuração na coluna de perfuração. Existem duas formas de aplicar rotação na broca: *top drive* e motor de fundo.



**Figura 1.7 - Swivel [18].**

### 10) *Top Drive*

É um motor (Figura 1.8) conectado no topo da coluna, este motor elimina o uso da mesa rotativa e do *Kelly*. A vantagem do *top drive* em relação à mesa rotativa é que a perfuração pode ocorrer de três em três tubos, ao invés, de um em um na mesa rotativa. Outra vantagem é a retirada ou descida da coluna com rotação ou circulação de fluido, o que é extremamente importante em poços de alta inclinação ou horizontais.



**Figura 1.8 - Top Drive [18].**

### 11) Motor de Fundo

É um motor hidráulico (Figura 1.9 e Figura 1.16) tipo turbina ou de deslocamento positivo anexado acima da broca. O giro do motor é na parte inferior, solidário à broca. Este tipo de equipamento é largamente utilizado na perfuração de poços direcionais, ou seja, poços onde o objetivo a ser atingido não se encontra na vertical da sonda. A coluna de perfuração não gira, assim não apresenta torque, que por sua vez reduz seu desgaste.

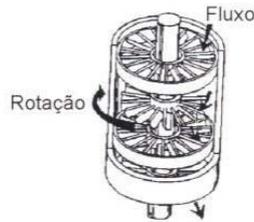


Figura 1.9 - Motor de Fundo Tipo Turbina [18].

### 12) Cabeça de Poço

A cabeça de poço (Figura 1.10) é constituída de diversos equipamentos que permitem a ancoragem e vedação das colunas de revestimento na superfície. Estes equipamentos são: cabeça de revestimento, carretel de perfuração, adaptadores, carretel espaçador e seus acessórios.

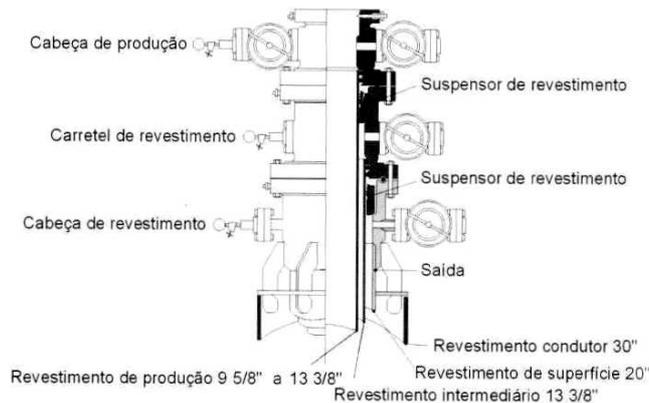
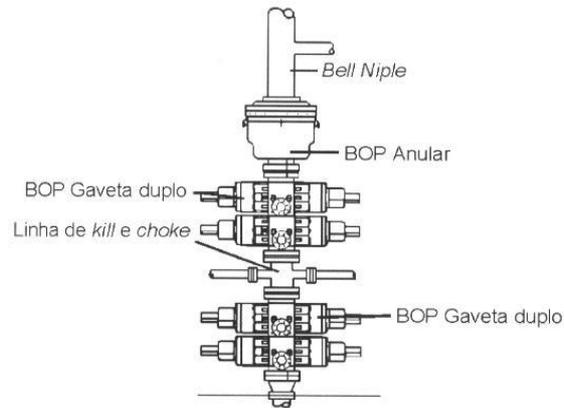


Figura 1.10 - Cabeça de Poço de Superfície [18].

### 13) Preventores

O mais importante deles é o *Blowout Preventer* (BOP) (Figura 1.11), que é um conjunto de válvulas que permite fechar o poço. O acionamento é feito na ocorrência de um *kick*, fluxo indesejado do fluido contido numa formação para o interior do poço.

Se este fluxo não for controlado eficientemente poderá se transformar num *blowout*, ou seja, poço operando sem controle. As conseqüências de um *blowout* podem ser: dano aos equipamentos da sonda, acidentes pessoais, perda parcial ou total do reservatório, poluição e dano ao ambiente, etc.



**Figura 1.11** - Arranjo Típico de um Conjunto BOP [18].

## 1.2 - Colunas de Perfuração

A coluna de perfuração é responsável pela energia transmitida à broca, ou seja, peso e rotação que cortam as formações rochosas se transformando em cascalhos. Os cascalhos são transportados do fundo do poço até a superfície pelo fluido de perfuração. Então estes dois processos de perfurar e retirar os cascalhos são de responsabilidade da coluna de perfuração, que é composta por: comandos, tubos pesados e tubos de perfuração.

### 1.2.1 - Comandos

Os comandos (*Drill Collars-DC*) são elementos tubulares de fabricação em aço forjado, usinados e com grande peso linear devido a grande espessura de parede.

As principais funções são fornecer peso sobre a broca e dar rigidez à coluna, permitindo melhor controle da trajetória do poço. Externamente os comandos podem ser lisos ou espiralados. A Figura 1.12 ilustra um comando espiralado com ressalto para elevador.



**Figura 1.12** - Comando Espiralado com Ressalto para Elevador [18].

### 1.2.2 - Tubos Pesados

Os tubos pesados (*Heavy-Weight Drill Pipes – HWDP*) são elementos tubulares de aço forjado e usinados, onde a função principal é promover uma transição de rigidez entre os comandos e os tubos de perfuração, diminuindo a possibilidade de falha por fadiga. As principais características são: maior espessura das paredes, uniões mais resistentes e revestidas de metal duro (*Hard-Facing*) e reforço central no corpo do tubo revestido de metal duro. A Figura 1.13 ilustra um tubo pesado com reforço central e aplicação de material duro.



Figura 1.13 - Tubo Pesado com Reforço Central e Aplicação de Material Duro [18].

### 1.2.3 - Tubos de Perfuração

Os tubos de perfuração (*Drill Pipes – DP*) são tubos de aço sem costura, os quais recebem tratamento interno com resina para redução de corrosão e desgaste, possuem conexões cônicas nas suas extremidades recebendo o nome de *tool joints*, que são soldadas no seu corpo (Figura 1.14). O diâmetro externo pode variar de 2 3/8” a 6 5/8” e o comprimento nominal de 5,49 m (18 ft) a 13,72 m (45 ft).



Figura 1.14 - Tubos de Perfuração [18].

### 1.2.4 - Acessórios da Coluna de Perfuração

Existem cinco acessórios da coluna de perfuração, são os: substitutos, estabilizadores, escareadores, alargadores e os amortecedores de vibração.

#### a) Substitutos

Os substitutos (*Subs*) são pequenos tubos que servem para fazer conexões e movimentos de carga na coluna (Figura 1.15). Os principais são:

- **Sub de Içamento**, movimenta os comandos e tem a parte superior com diâmetro externo igual ao tubo de perfuração para adaptação do elevador;

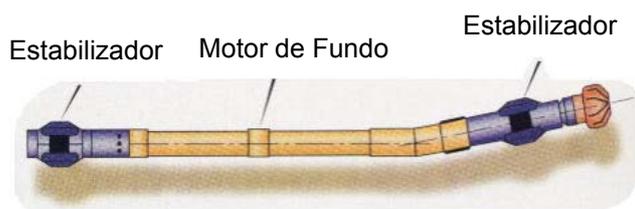
- **Sub de Broca**, para conectar broca;
- **Sub de Cruzamento**, permite a conexão de tubos com diferentes roscas e diâmetros.



**Figura 1.15** - Substitutos [18].

### b) Estabilizadores

Desempenham as funções de dar maior rigidez à coluna, auxiliar a manter o diâmetro do poço, pois têm o diâmetro igual ao da broca e controlam a trajetória dos poços direcionais (Figura 1.16 e Figura 1.17).



**Figura 1.16** - Estabilizadores num Sistema Convencional de Motor de Fundo [19].



**Figura 1.17** - Estabilizadores [18].

### c) Escareadores

Possuem as mesmas funções dos estabilizadores, porém apresentam roletes nas lâminas para rochas mais duras e abrasivas.

### d) Alargadores

São empregados para aumentar o diâmetro do poço já perfurado, seja a partir da superfície ou outro local abaixo da superfície.

#### e) Amortecedores de Vibração

São utilizados para absorverem a energia gerada pelo impacto da broca nas formações duras. É comum serem usados com brocas de insertos de tungstênio.

### 1.2.5 - Ferramentas de Manuseio da Coluna

As ferramentas de manuseio são empregadas para conectar e desconectar os elementos da coluna. As principais são:

#### a) Chaves Flutuantes

A chave flutuante (Figura 1.18), como o próprio nome sugere, fica suspensa na plataforma por cabos, polias e contrapeso. A função é fornecer torque para o aperto e desaperto das uniões cônicas da coluna.



Figura 1.18 - Chave Flutuante [18].

#### b) Cunhas

São equipamentos que sustentam a coluna de perfuração acima da mesa rotativa. São utilizadas na conexão dos comandos e tubos de perfuração. Possuem mordetes que se adaptam e prendem à parede dos tubos (Figura 1.19).



Figura 1.19 - À Esquerda, Cunha para Tubo de Perfuração e à Direita, para Comandos [18].

### c) Colar de Segurança

Tem a função de sustentar a coluna em caso de deslizamento, evitando a queda no poço. É anexada no topo da coluna mantendo a segurança na falha da cunha (Figura 1.20).



**Figura 1.20** - Colar de Segurança [18].

### 1.3 - Brocas

As brocas são os equipamentos que promovem o corte e desagregação das rochas ou formações. O desempenho das brocas associado a viabilidade econômica desempenha um papel muito importante no estudo da perfuração de poços de petróleo.

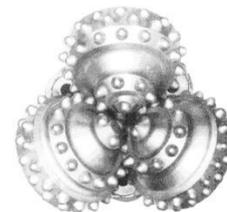
As brocas classificam-se de duas formas: brocas sem partes móveis (Figura 1.21 e Figura 1.22) e brocas com partes móveis (Figura 1.23).



**Figura 1.21** - Broca de Diamantes Naturais [18].



**Figura 1.22** - Broca de Diamantes Artificiais [18].



**Figura 1.23** - Broca Tricônica de Insertos de Tungstênio [18].

### 1.4 - Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes podem conter gases. Do ponto de vista químico, os fluidos de perfuração podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. As principais funções dos fluidos de perfuração são:

- Limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca e transportá-los até a superfície;
- Exercer pressão hidrostática sobre as formações, de modo a evitar o influxo de fluidos indesejáveis (*kicks*) e estabilizar as paredes do poço;

- Resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca.

As propriedades de controle dos fluidos de perfuração podem ser de dois tipos: físicas ou químicas. As principais são:

**a) Densidade**

Os limites de variação da densidade dos fluidos para perfurar uma determinada fase são definidos pela pressão de poros (limite mínimo) e pela pressão de fratura (limite máximo) das formações expostas. A pressão de poros pode ser definida como sendo a pressão atuante no fluido que se encontra no espaço poroso da rocha e a pressão de fratura como sendo o valor de pressão para o qual a rocha se rompe.

Quando deseja-se aumentar a densidade de um fluido adiciona-se geralmente a baritina,  $BaSO_4$ , que tem densidade de 4,25, enquanto a densidade dos sólidos perfurados é em torno de 2,60. Por outro lado para reduzir a densidade à base de água, dilui-se com água (densidade 1,00) ou óleo diesel (densidade 0,82).

**b) Parâmetros Reológicos.**

**c) Forças Géis.**

**d) Parâmetros de Filtração.**

**e) Teor de Sólidos.**

**f) Concentração de Hidrogeniônica – pH.**

**g) Alcalinidades.**

**h) Teor de Cloretos ou Salinidade.**

**i) Teor de Bentonita ou de Sólidos Ativos.**

Os fluidos de perfuração se classificam de acordo com o constituinte principal da fase contínua ou dispersante em fluidos à base de água, fluidos à base de óleo e fluidos à base de ar ou gás.

## **1.5 - Operações Normais de Perfuração**

A perfuração de um poço se caracteriza pela rotação da coluna e peso sobre a broca, com auxílio da circulação de fluido de perfuração. As principais operações de perfuração são:

### **1.5.1 - Alargamento e Repassamento**

O alargamento, como o próprio nome sugere, é o processo de aumentar o diâmetro do poço com uma broca maior ou com um alargador localizado acima da broca. O repasse é usado quando por algum motivo ocorre estreitamento do poço, assim, necessitando passar a broca mais uma vez.

### **1.5.2 - Conexão, Manobra e Circulação**

A conexão é a união de um tubo de perfuração a outro, pois à medida que o poço vai sendo perfurado, tubos vão sendo conectados e içados ao poço.

A manobra completa corresponde à descida ou a retirada da coluna. Um exemplo seria a retirada de toda a coluna de perfuração na troca de uma broca. Geralmente a coluna é montada ou desmontada em seções de três em três tubos.

A circulação é a passagem de fluido de perfuração pelo interior da coluna a partir da superfície e o retorno é feito pelo espaço anular. A broca é mantida pouco acima do fundo do poço enquanto os cascalhos são levados até a superfície através do espaço anular pelo fluido.

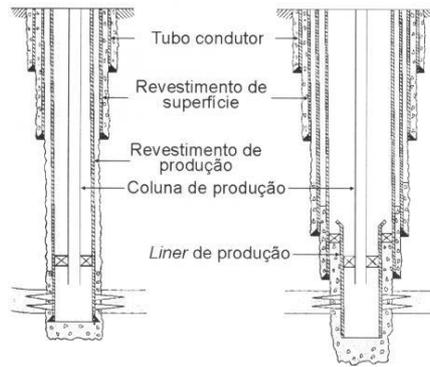
### **1.5.3 - Revestimento de um Poço de Petróleo**

O revestimento de um poço de petróleo tem a finalidade de proteger as paredes do poço e conforme a Figura 1.24, pode apresentar diferentes configurações. O processo de evolução iniciou-se com as alvenarias, passando para proteções de madeira, depois para tubos de ferro fundido até algumas décadas atrás e finalmente chegando aos tubos de aço especial.

O poço é perfurado em fases, as fases dependem das zonas a serem perfuradas e da profundidade final do poço. Um poço pode variar de 3 a 4 fases, podendo chegar a 8 em alguns casos. As fases se concluem com a descida de uma coluna de revestimento e sua cimentação.

O revestimento contribui para uma parcela expressiva do custo de uma perfuração de um poço de petróleo, 15 a 20% no mar e podendo chegar a 50% em terra. Algumas das principais funções das colunas de revestimento são:

- Prevenir o desmoronamento das paredes do poço;
- Evitar a contaminação da água potável dos lençóis freáticos mais próximos à superfície;
- Permitir o retorno do fluido de perfuração à superfície;
- Prover meios de controle de pressões dos fluidos, permitindo aplicação de pressão adicional desde a superfície, etc.



**Figura 1.24** - Esquema do Revestimento de Poços [18].

#### **1.5.4 - Cimentação de Poços de Petróleo**

A cimentação é feita para preencher o espaço entre a parede externa da coluna de revestimento e a parede do poço. Este espaço é preenchido através de bombeamento de uma pasta de cimento com água.

Existem dois tipos de cimentação: a primária e a secundária. A primária é a principal e é realizada após a descida de cada coluna de revestimento. A secundária é realizada caso haja imperfeições na cimentação primária.

#### **1.5.5 - Perfilagem a Poço Aberto**

É o processo que ocorre após a perfuração de uma fase do poço para determinar o perfil do poço, ou seja, a imagem visual, em relação a profundidade, de uma ou mais características ou propriedades das rochas perfuradas (resistividade elétrica, tempo de trânsito de ondas mecânicas, radioatividade natural ou induzida, etc). Os perfis são obtidos através do deslocamento contínuo de um sensor de perfilagem (sonda) no interior do poço.

#### **1.5.6 - Movimentação da Sonda**

Quando a operação num poço se esgota, existe a necessidade do deslocamento da sonda para outro local. Em terra este deslocamento chama-se DTM (Desmontagem, Transporte e Montagem). No mar denomina-se DMM (Desmobilização, Movimentação e Mobilização).

### **1.6 - Operações Especiais de Perfuração**

Durante a perfuração de um poço, várias operações podem ocorrer e as ditas especiais são: controle de *kicks*, operações de pescaria, testemunhagem e teste de formação.

### 1.6.1 - Controle de *kicks*

A pressão de poro de uma formação é dita normal quando é equivalente a pressão hidrostática de uma coluna de água salgada ou doce da superfície até a formação e é dita anormal quando apresentar uma diferença considerável acima ou abaixo da coluna de água.

Uma das principais funções do fluido de perfuração é exercer pressão hidrostática sobre as formações a serem perfuradas. Se a pressão do fluido de perfuração for menor do que a pressão dos fluidos nos poros das formações e a formação for permeável, ocorrerá influxo para o poço. Quando o influxo é controlável diz-se que o poço está em *kick*; se incontrolável, em *blowout*. As causas mais comuns de *kick* são geradas pelo peso insuficiente da lama e abastecimento incorreto do poço durante a manobra. Assim, destacam-se:

#### a) Pistoneio

Quando a coluna de perfuração é retirada do poço, pressões negativas são criadas, chamadas de pistoneio, reduzindo a pressão hidrostática efetiva abaixo da broca.

#### b) Lama Cortada por Gás

Gases contidos nos poros de uma formação normalmente se misturam com o fluido de perfuração devido ao corte dos cascalhos pela broca. Estes gases se expandem até chegarem a superfície diminuindo a densidade da mistura. Se o fluido não for devidamente tratado, um *kick* pode ocorrer.

#### c) Perda de Circulação

A perda de fluido de circulação diminui a pressão hidrostática e abaixa o nível de fluido no poço, isto pode provocar a entrada de fluido da formação.

#### d) Cimentação Inadequada

No início da pega do cimento pode ocorrer a criação de uma estrutura auto-sustentável com a redução da pressão hidrostática da pasta de cimento.

#### e) Outras Causas

O teste de formação tem levado poços a entrarem em *kick*. Na ocorrência de um *kick*, o poço deve ser fechado através dos preventores de erupções ou BOP.

### 1.6.2 - Pescaria

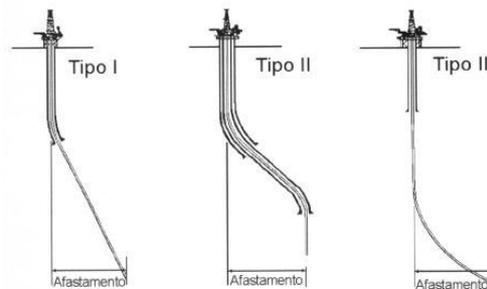
Quando um objeto cai, se parte ou fica preso no interior de um poço, na indústria do petróleo dá-se o nome de “peixe”, este processo de retirada do “peixe” interrompe as operações normais de perfuração e é chamado de “pescaria”. Alguns exemplos de pescaria são: quebra, aprisionamento ou queda da coluna de perfuração, ruptura da broca, queda de acessórios de perfuração, etc.

### 1.6.3 - Testemunhagem

É a retirada de uma amostra real da subsuperfície de uma formação rochosa, chamada testemunho, para obter informações referentes à geologia, engenharia de reservatórios, completção e perfuração, porosidade, textura, permeabilidade, saturação de óleo e água, etc.

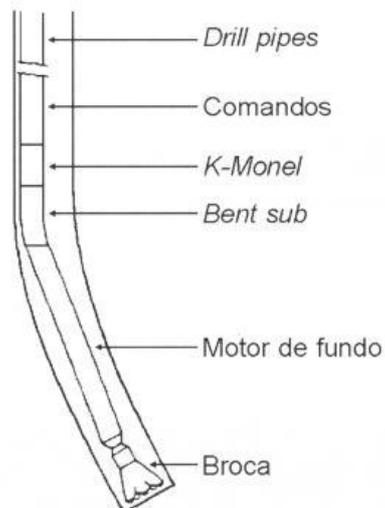
### 1.7 - Perfuração Direcional

A perfuração direcional é o processo de perfurar um poço de petróleo fora da vertical para atingir um objetivo desalinhado com a localização na superfície. Na prática não existe poço rigorosamente vertical, mas são controlados dentro de uma faixa até  $5^\circ$  e se necessário medidas corretivas são aplicadas. Existem três tipos de poços direcionais, que são ilustrados na Figura 1.25.



**Figura 1.25** - Tipos de Poços Direcionais [18].

A operação de desvio procede da seguinte forma: ao se atingir a profundidade de desvio ou KOP (*kick-off point*), retira-se a coluna de perfuração e desce-se a coluna ilustrada na Figura 1.26. O motor de fundo é operado pela circulação do fluido de perfuração que passa entre um estator solidário ao corpo do motor e um rotor acoplado à broca. Parte da potência hidráulica é convertida em movimento rotativo da broca, enquanto a coluna de perfuração não se movimenta. Acima do motor existe um *sub* torto que desvia o motor de fundo da vertical e orienta para direção desejada. A trajetória da perfuração é monitorada continuamente e quando o poço atinge a direção correta, retira-se a coluna com o motor de fundo e desce-se uma coluna normal de perfuração, com estabilizadores, perfurando até o objetivo final do poço. Se uma correção da trajetória for necessária, o motor de fundo é novamente inserido no poço e orientado.



**Figura 1.26** - Coluna de Desvio [18].

## 1.8 - Perfuração Marítima

As primeiras Unidades de Perfuração Marítima (UPM) eram simplesmente sondas terrestres montadas sobre estruturas de madeira para perfurar em águas rasas. Com o passar do tempo a necessidade de buscar mais petróleo em águas mais profundas fez avançar as pesquisas em novas técnicas e equipamentos direcionados à perfuração marítima.

### 1.8.1 - Tipos de Unidades

As Unidades de Perfuração Marítima podem ser de dois tipos: as que possuem BOP na superfície e as que possuem BOP no fundo do mar. As que possuem BOP na superfície são as: fixas, auto-eleváveis, submersíveis e *tension leg*. Já as que possuem BOP no fundo do mar, conhecidas como flutuantes, são as: semi-submersíveis e navios-sonda.

A escolha de cada uma destas unidades depende da profundidade, condições de mar, relevo do fundo mar, finalidade do poço, disponibilidade de apoio logístico e, principalmente, à relação custo/benefício.

#### a) Plataformas Fixas

Foram as primeiras plataformas utilizadas, que sendo empregadas em profundidades de até 300 metros são responsáveis por grande parte do petróleo produzido no mar.

A estrutura da plataforma é constituída de aço e apresenta estacas cravadas no fundo do mar. A Figura 1.27 ilustra uma plataforma fixa.



**Figura 1.27** - Plataforma Fixa do Campo de Garoupa, na Bacia de Campos [18].

#### **b) Plataformas Auto-Eleváveis**

As plataformas auto-eleváveis (Figura 1.28) são constituídas, basicamente, de uma balsa equipada com estruturas de apoio, ou pernas, que acionadas mecânica ou hidraulicamente movimentam-se para baixo até atingirem o fundo do mar. Em seguida, inicia-se a elevação da plataforma acima do nível da água, a uma altura segura e fora da ação das ondas. Podem atuar em profundidades entre 5 a 130 metros.

São plataformas móveis, sendo transportadas por rebocadores ou propulsão própria.

Estatisticamente este tipo de Unidade de Perfuração Marítima tem apresentado o maior número de acidentes.



**Figura 1.28** - Plataforma Auto-Elevável [18].

### c) Plataformas Submersíveis

São plataformas que atuam em profundidades pequenas, em águas calmas, baías e rios, com uma estrutura flutuante, que pode ser lastreada até o casco encostar-se ao fundo.

### d) Plataformas Flutuantes

As plataformas flutuantes podem ser as semi-submersíveis (Figura 1.29) e os navios-sonda (Figura 1.30). As primeiras possuem uma estrutura com um ou mais conveses, apoiada por colunas em flutuantes submersos. Já os navios-sonda apresentam modificações de projeto para perfuração.

As plataformas estão sujeitas a movimentos sobre a superfície devido à influência das ondas, da corrente e ventos. Estes movimentos ameaçam a integridade da estrutura, as operações de perfuração e equipamentos submarinos da embarcação. Assim, para que não ocorram problemas operacionais nem funcionais, a plataforma pode “passear” numa faixa determinada por um círculo, este passeio é denominado *offset*. O *offset* é expresso em percentuais de lâmina d’água e ditado pelas limitações dos equipamentos de subsuperfície, operações e pela profundidade.

Existem dois tipos de sistemas para controle do posicionamento da embarcação: sistema de ancoragem e sistema de posicionamento dinâmico.

O sistema de ancoragem é composto por oito a doze âncoras e cabos e/ou correntes atuando como molas para restabelecer a posição do flutuante.

O sistema de posicionamento dinâmico não apresenta contato físico da embarcação com o fundo do mar, a não ser pelos equipamentos de perfuração. Sensores de posição determinam a localização da embarcação e propulsores no casco acionados por computador restauram a posição da plataforma.



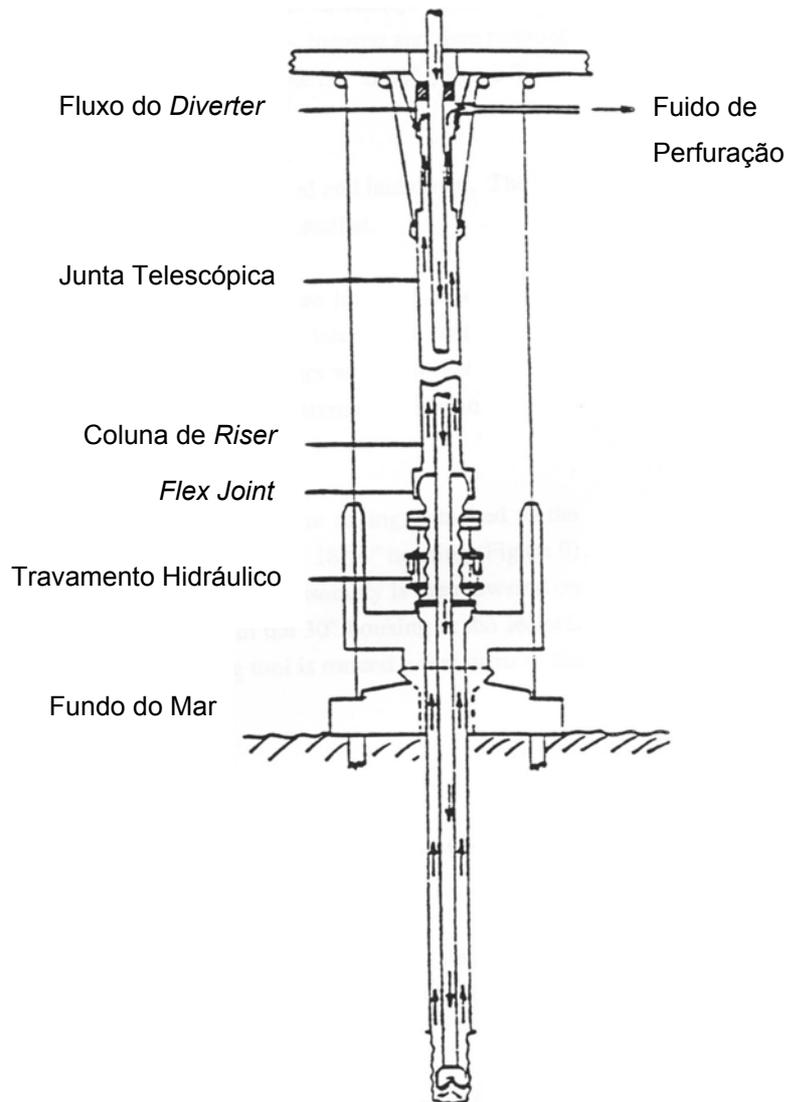
**Figura 1.29** - Plataforma Semi-Submersível [18].



**Figura 1.30** - Navio-Sonda (Foto de autoria de Enrique Fernandez, 1987) [18].

Devido à grande movimentação da embarcação, os revestimentos ficam apoiados no fundo do mar por intermédio de sistemas especiais de cabeça de poço submarino. Sobre estes se conectam os equipamentos de segurança e controle do poço. O fluido de perfuração retorna para superfície através de uma coluna, denominada *riser*, que se estende até a plataforma (Figura 1.31).

As plataformas flutuantes podem possuir ou não autopropulsão, mesmo não possuindo propulsão própria apresentam boa mobilidade. São as preferidas para a perfuração na busca de petróleo.



**Figura 1.31** - Retorno do Fluido de Perfuração Pela Coluna de *Riser* (*Marine Riser*) [20].

#### **e) Plataformas *Tension Leg***

Este tipo de plataforma (Figura 1.32) é usado para perfuração de poços em desenvolvimento e tem como característica principal cabos tubulares ancorados no

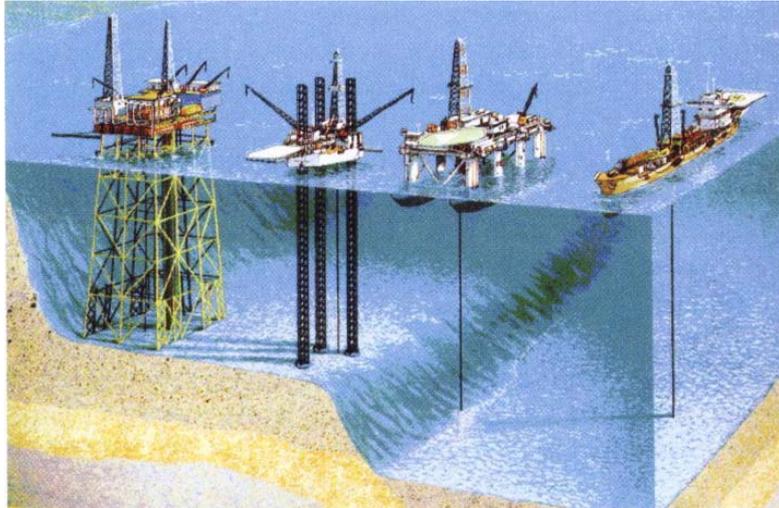
fundo do mar, que mantêm a plataforma tracionada constantemente para evitar o movimento na vertical, por conseguinte tráz resistência ao movimento lateral, permitindo assim a perfuração e completação como nas plataformas fixas.



**Figura 1.32 - Tension Leg [18].**

### **1.8.2 - Sistemas de Cabeça de Poço Submarino**

O Sistema de Cabeça de Poço Submarino apresenta dois aspectos diferentes: a perfuração com o BOP na superfície como nas plataformas fixas e auto-eleváveis e a com o BOP no fundo do mar como nas semi-submersíveis e navios-sonda (Figura 1.33). Nos dois sistemas as colunas de revestimentos são inseridas no fundo do mar para evitar sobrecarga na embarcação, gerar mais estabilidade e facilitar o abandono do poço.



**Figura 1.33** - Tipos de Sondas Marítimas [18].

### **1) Sistema de Cabeça de Poço para Plataformas Fixas e Auto-Eleváveis**

Mesmo com os revestimentos ancorados no fundo do mar, há a necessidade de um cabeçal de superfície, que tem a função de vedação secundária e de sustentação do peso dos tubos de revestimentos que se encontram acima do fundo do mar.

### **2) Sistema de Cabeça de Poço para Plataformas Flutuantes**

Todo o sistema de cabeça de poço submarino se localiza no fundo do mar, assim, cargas provenientes do revestimento de superfície e do condutor podem ser transmitidas para bases especiais, que funcionam como fundação submarina para o poço. Outras cargas oriundas dos equipamentos de segurança e controle do poço durante a perfuração e cargas dos equipamentos de produção após a completação também são transmitidas às bases especiais.

Os sistemas de cabeça de poço submarino para unidades flutuantes podem ser de dois tipos: sistema com cabos guias (*Guideline System*) e sistema sem cabos guias (*Guidelineless System*).

O sistema com cabos guias se limita a profundidades em torno de 400 metros.

A Base Guia Temporária (BGT) é o primeiro equipamento descido no fundo do mar, que servirá como guia primária do poço, para perfurar a primeira fase (Figura 1.34).

Após o assentamento da BGT, é descida a coluna de perfuração com a broca de 26" e alargador de 36". Esta primeira fase é perfurada com água do mar e retorno dos cascalhos diretamente para o fundo do mar. Após é descido o condutor de 30" junto com a Base Guia Permanente (BGP) (Figura 1.35).

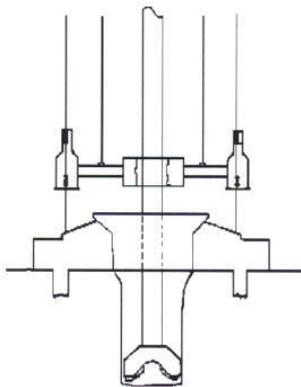
O conjunto BGP, alojador e condutor de 30" é montado na superfície e descido ao poço de 36". O condutor de 30" é cimentado a sua volta e logo depois passa-se

para a fase seguinte, com broca de 26" e continuando com água do mar e retorno dos cascalhos para o fundo do mar.

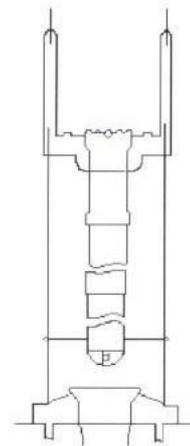
Após a perfuração de 26", é descido e cimentado o revestimento de superfície de 20", que possui um alojador de alta pressão. Este alojador serve para fazer a conexão com os equipamentos de segurança, como sede para os suspensores dos revestimentos intermediários, etc. O alojador de alta pressão é usualmente especificado para pressão de trabalho de 10.000 psi.

Após a cimentação do revestimento de superfície, são descidos e conectados o BOP e o *riser*, que permitirão a perfuração das fases seguintes até a conclusão do poço.

Quando não ocorrer a completação nem a produção logo após o término da perfuração, uma capa de abandono é instalada sobre o alojador de alta pressão.



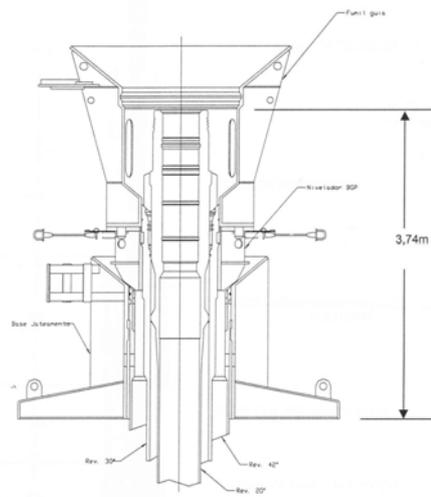
**Figura 1.34** - Base Guia Temporária, com Cabos Guias na Perfuração da 1ª Fase [18].



**Figura 1.35** - Base Guia Permanente, com Cabos Guias [18].

O sistema sem cabos guias (Figura 1.36) é utilizado para águas profundas com unidades flutuantes equipadas com sistema de posicionamento dinâmico.

O solo marinho em águas profundas apresenta-se, geralmente, pouco consolidado e sem estabilidade para a BGT e poço, durante a perfuração da primeira fase. O sistema desenvolvido pela Petrobras acrescenta um tubulão, usualmente de 46" a 42" de diâmetro externo, que desce conectado à BGT.



**Figura 1.36** - Esquema de Base Guia de Perfuração sem Cabos Guias [1].

As principais diferenças implementadas nas BGP *guidelineless* são a forma e tamanho. Estas são maiores e mais altas, para facilitar a sua localização, e possuem estrutura guia em forma de funil. Não possuem os postes guias que compõem as BGP *guideline* e são mais resistentes, como consequência dos maiores esforços impostos pela longa coluna de *riser*.

Os alojadores de alta pressão utilizados em águas profundas são diferentes dos convencionais apenas na especificação do diâmetro nominal interno.

Os demais equipamentos e componentes empregados nos sistemas *guidelineless* são estruturalmente e conceitualmente iguais aos usados nos sistemas *guideline*.

### 1.8.3 - Cabeça de Poço em Sondas Flutuantes

Na cabeça de poço em sondas flutuantes, os equipamentos são instalados no fundo do mar, distantes das plataformas. Devido a estas distâncias e a necessidade de abandono rápido do poço, várias modificações foram feitas, tornando-os mais seguros e confiáveis.

O BOP *stack* é um equipamento submarino projetado para resistir aos esforços extras, aos quais estão submetidos. É composto basicamente por gavetas vazadas, gaveta cisalhante, válvula anular, linhas de *choke* e *kill* e válvulas associadas. Existe ainda um sistema de acionamento remoto e acumuladores de fluido de acionamento, que permitem o controle das principais funções (abertura e fechamento das válvulas) a partir da superfície.

O *Lower Marine Riser* (LMR) é um equipamento acoplado ao BOP *stack* por um conector. O LMR pode ser rapidamente desconectado do BOP pelo sistema remoto, quando por motivo de casos extremos de ocorrência de acidentes, permitindo assim o abandono seguro do poço.

Na ocorrência de influxo ou erupção, o BOP é fechado e o fluido passa a retornar pela linha de *choke*, pois as longas colunas de *riser* não são projetadas para suportar altas pressões. Válvulas de segurança também atuam em caso de queda de pressão na linha de acionamento através de controle automático, mantendo-se abertas ou fechadas.

Os comandos enviados da superfície podem ser hidráulicos ou elétricos multiplexados por meio de ligação física com o BOP, utilizando mangueira ou cabo elétrico multiplexado.

Existe ainda um sistema de acionamento acústico, que atua em caso de falha do sistema feito por ligação física. Em águas profundas a desconexão de emergência do LMR pode ser feita por um simples toque de botão na superfície, de maneira rápida e segura.

#### **1.8.4 - Movimentos de uma Sonda**

Os movimentos de uma sonda são considerados em um sistema de eixos xyz e possuem três rotações e três translações (Figura 1.37).

##### **1) Movimentos Lineares**

- Avanço ou *Surge*, translação na direção x;
- Deriva ou *Sway*, translação na direção y;
- Afundamento ou *Heave*, translação na direção z;

##### **2) Movimentos Angulares**

- Jogo ou *Roll*, rotação em torno do eixo x;
- Arfagem ou *Pitch*, rotação em torno do eixo y.
- Guinada ou *yaw*, rotação em torno do eixo z.

O movimento de afundamento ou *heave* é o que mais preocupa as operações de perfuração.

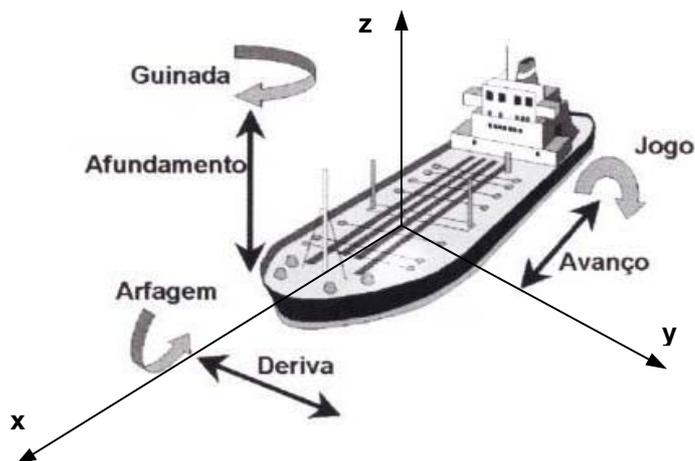


Figura 1.37 - Movimentos de uma Sonda, Modificado de [18].

### 1.8.5 - Equipamentos Auxiliares

Existem alguns equipamentos auxiliares para suavizar os movimentos da plataforma. Os que se destacam são:

#### 1) Tensionadores do *Riser*

A ligação do BOP, que permanece imóvel no fundo do mar, à plataforma que se movimenta constantemente, é feita pela coluna de *riser*. Assim, para que estes movimentos não afetem a estrutura do *riser*, a ponta superior da coluna é fixa na plataforma e uma junta telescópica é instalada abaixo deste ponto para evitar o movimento de translação na vertical. Juntas flexíveis são instaladas nas duas extremidades do *riser*, permitindo movimentos de translação e rotação no plano horizontal. Os cabos tensionadores são fixos num anel rotativo e permitem rotação da plataforma no plano vertical.

Em [21], um novo arranjo (Figura 1.38) para o sistema de tensionadores do *riser*, patenteado como *N-Line Drilling Riser Tensioner System (DRTS)*, apresenta algumas vantagens sobre o sistema convencional, tais como: redução dos custos, controle direto do *riser*, redução da manutenção a longo prazo, etc.

O sistema *N-Line DRTS* consiste tipicamente de 6 cilindros com curso (*stroke*) de 50 ft e podendo ser fabricado com curso de 65 ft. Os seis cilindros ficam suspensos e fixos a plataforma pela parte superior, a parte inferior é conectada ao anel rotativo, solidário a junta telescópica (junta de deslizamento).

#### 2) Compensadores de Movimento

O objetivo dos compensadores é manter o peso constante da coluna de perfuração sobre a broca. O sistema dos compensadores é composto por cilindros e fluidos, que atuam por diferença de pressão.

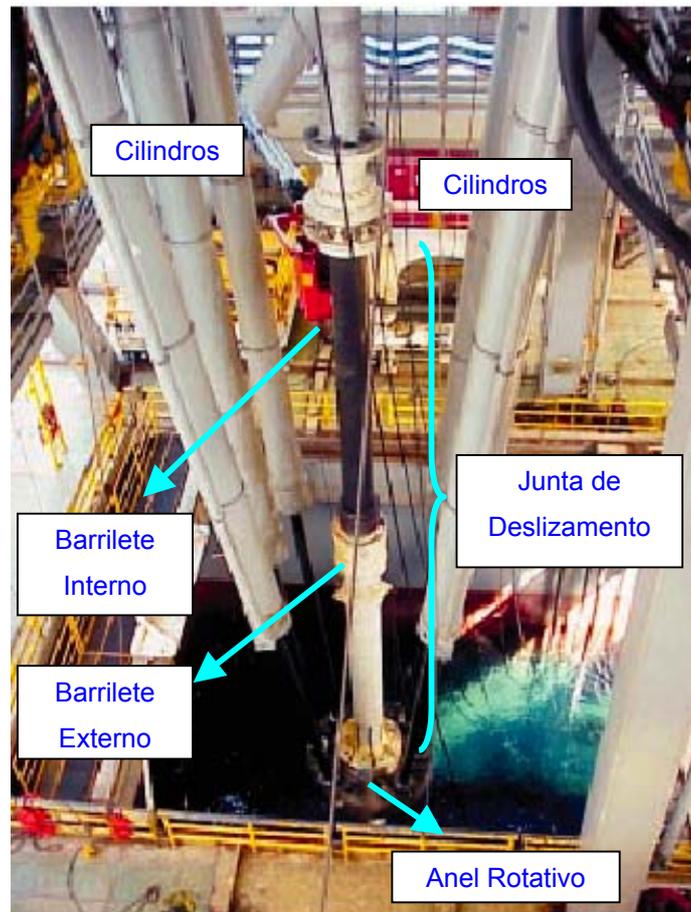


Figura 1.38 - Sistema *N-Line* DRTS [21].

### 1.8.6 - Sistema de Posicionamento Dinâmico

O sistema de posicionamento dinâmico é responsável por manter a embarcação dentro dos limites pré-estabelecidos sem a necessidade de possuir contato físico do flutuante com o fundo do mar.

Os elementos básicos de um sistema de posicionamento dinâmico são: controlador, sistema de sensores e sistema de *thrusters*. O controlador, que usualmente é um computador, recebe as informações dos sensores, converte em posicionamento da embarcação e aciona os propulsores (*thrusters*), que por sua vez combatem as forças ambientais. Os propulsores são instalados no casco da embarcação.

A maioria dos sistemas de posicionamento dinâmico se baseiam na leitura dos ângulos de topo e fundo do *riser*. Em [22] a posição ótima da embarcação é obtida através da minimização da soma do quadrado dos ângulos. O controle lógico é baseado em redes neurais, na qual incorpora a tração do *riser*, densidade da lama, ângulos do topo e fundo, profundidade da água e velocidade da corrente como entrada

de dados. Foi desenvolvido um programa para simulação da análise dinâmica das deformações do *riser* e um experimento no tanque, para validar o programa e verificar a viabilidade do projeto.

YAMAMOTO *et al.* [23] desenvolveram dois tipos de simuladores: DP-TOP e DP-MAP. O DP-TOP (*Dynamic Positioning system - Thruster force Optimal distribution Program*), determina a potência, número e localização do *thruster* pela análise estática do Sistema de Posicionamento Dinâmico (DPS). Já o DP-MAP (*Dynamic Positioning system - Motion Analysis Program*), simula o comportamento do movimento da plataforma pela análise dinâmica. Os autores utilizaram um modelo inteligente, constituído de um distribuidor de força de controle do *thruster*, através da teoria de programação não-linear e lógica *fuzzy*. Os simuladores foram desenvolvidos em linguagem de programação C e Fortran com interface gráfica de entrada e saída de dados, e os resultados do DP-MAP se aproximaram dos resultados experimentais.

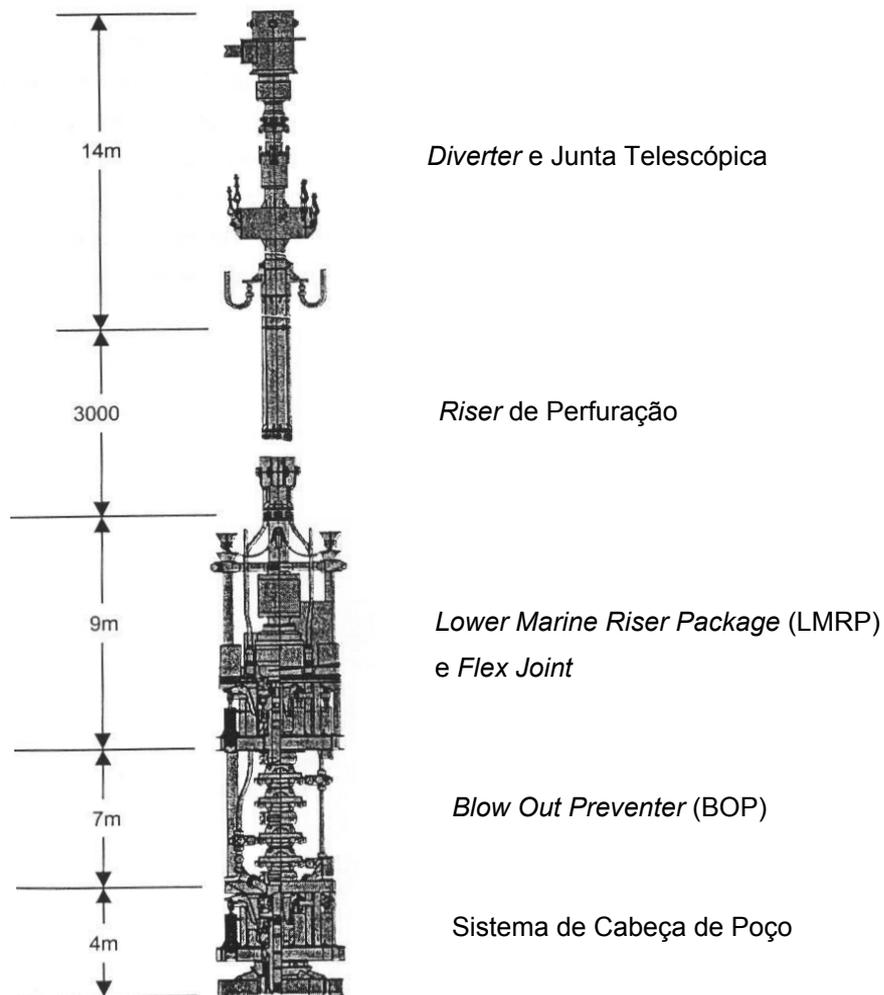
Conforme descrito em [19], a operadora Noble Drilling em 2002 resolveu investir num sistema de posicionamento dinâmico constituído por: Sistema de Posicionamento Global (GPS) receptor, receptores *beacons* (são emissores de sinais do sistema acústico de posicionamento dinâmico) e o *software* HYDROpro. O sistema foi instalado na semi-submersível Noble Amos Runner no Golfo do México, equipado com interface gráfica e numérica em tempo real do posicionamento da embarcação para auxiliar as decisões de restabelecimento do posicionamento.

Os principais sistemas de posicionamento [1] são: o acústico e o por satélite. No Brasil, especificamente na Bacia de Campos, estes sistemas apresentam algumas limitações, pois a proximidade das unidades em áreas congestionadas como Marlim ou Roncador geram interferência acústica e a cintilação ionosférica afeta o sistema via satélite, principalmente no verão.

Um sistema de posicionamento dinâmico eficaz contribui com a redução das paradas operacionais indesejadas causadas por condições ruins do tempo, pois as decisões de parar ou não uma operação de perfuração tornam-se mais precisas. As paradas geram grandes perdas econômicas, porque equipamentos e mão de obra têm que aguardar a melhoria das condições ambientais para voltarem à operação.

### **1.8.7 - Principais Componentes do *Riser* de Perfuração**

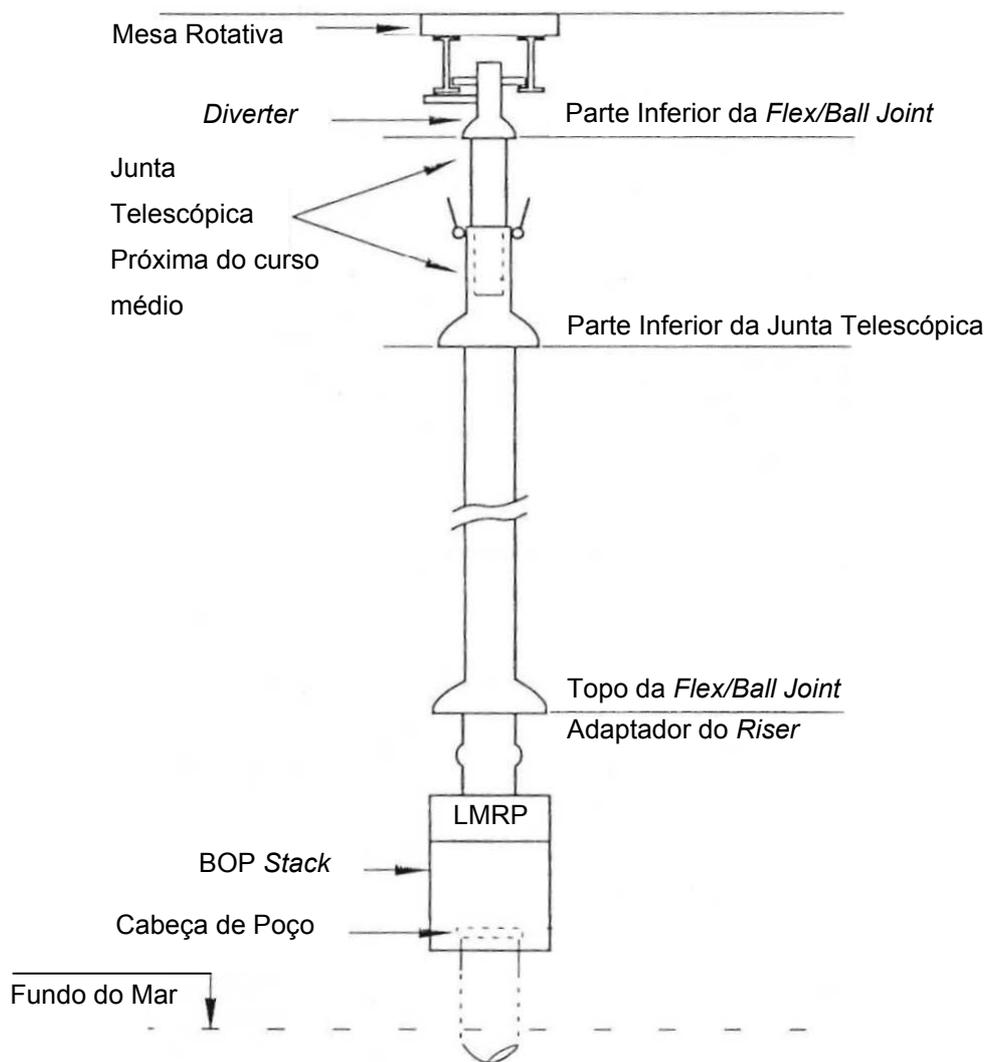
Os principais equipamentos que fazem parte da coluna de *riser* (Figura 1.39) são:



**Figura 1.39** - Sistema BOP e *Riser* de Perfuração [1].

### 1) Junta Telescópica (*Slip Joint*)

É uma junta de expansão (Figura 1.40) situada na parte superior da coluna de *riser*, e serve para compensar os movimentos de *heave*. Possui dois barriletes, cilindros concêntricos, um interno e outro externo. O interno é fixo ao *diverter* e o externo é anexado ao *riser*, cabos tensionadores são ligados a um anel solidário ao barrilete externo, permitindo tração. Procura-se manter tração constante no *riser*, variando a tração dos cilindros e com movimento vertical somente do barrilete interno. O curso (*stroke*) máximo da junta varia de 45 a 55 ft.



**Figura 1.40** - Esquema do *Riser* de Perfuração e Funcionamento da Junta Telescópica [13].

## 2) *Riser* de Perfuração (*Riser Joint*)

A função do *riser* de perfuração é fazer a comunicação entre a embarcação e os equipamentos da cabeça de poço. Assim, permitindo o retorno do fluido de perfuração pelo seu interior até chegar a superfície. Presta-se também para passagem de ferramentas da embarcação para o poço e vice versa. É composto por vários trechos de tubos, juntas, que são conectados por flanges (Figura 1.41) localizados nas extremidades dos *risers*. Cada tubo apresenta normalmente diâmetro de 21" e comprimento de 40 ft, 50 ft ou 80 ft, mas existem comprimentos menores para ajustar o tamanho desejado. As linhas de *choke* e *kill* também fazem parte do *riser* e para lâmina d'água profunda é comum o aparecimento de mais uma linha (*booster*) para ajudar na remoção dos cascalhos no interior das longas colunas de *riser* (Figura 1.42).



Figura 1.41 - Esquema e Foto da Conexão do Riser [24].

### 3) Juntas Flexíveis (*Flex Joints/Ball Joints*)

As juntas flexíveis podem ser as *flex joints* ou as *ball joints* que se diferem no processo de fabricação e componentes internos, mas que possuem a mesma função, ou seja, aliviar o movimento angular do *riser*. Podem ser instaladas no topo do *riser* (entre o *diverter* e a junta telescópica) ou no fundo do mar junto ao BOP, permitindo rotação máxima de 10° (este valor pode variar de acordo com o fabricante).

### 4) Linhas de *Choke* e *Kill*

As linhas de *choke* e *kill* são projetadas para resistirem altas pressões causadas por *kicks* ou *blowouts*, que se originam do influxo de fluidos indesejáveis partindo do poço para o espaço anular entre o *riser* de perfuração e a coluna de perfuração, já que as colunas de *riser* não possuem resistência para o combate ao controle de *kicks* ou *blowouts*. O procedimento para o controle do poço é o seguinte: fecha-se o BOP, o fluido passa a circular pela linha de *choke* e então fluido adensado é bombeado pela linha de *kill* para auxiliar a retirada do fluido indesejado até atingir o controle.

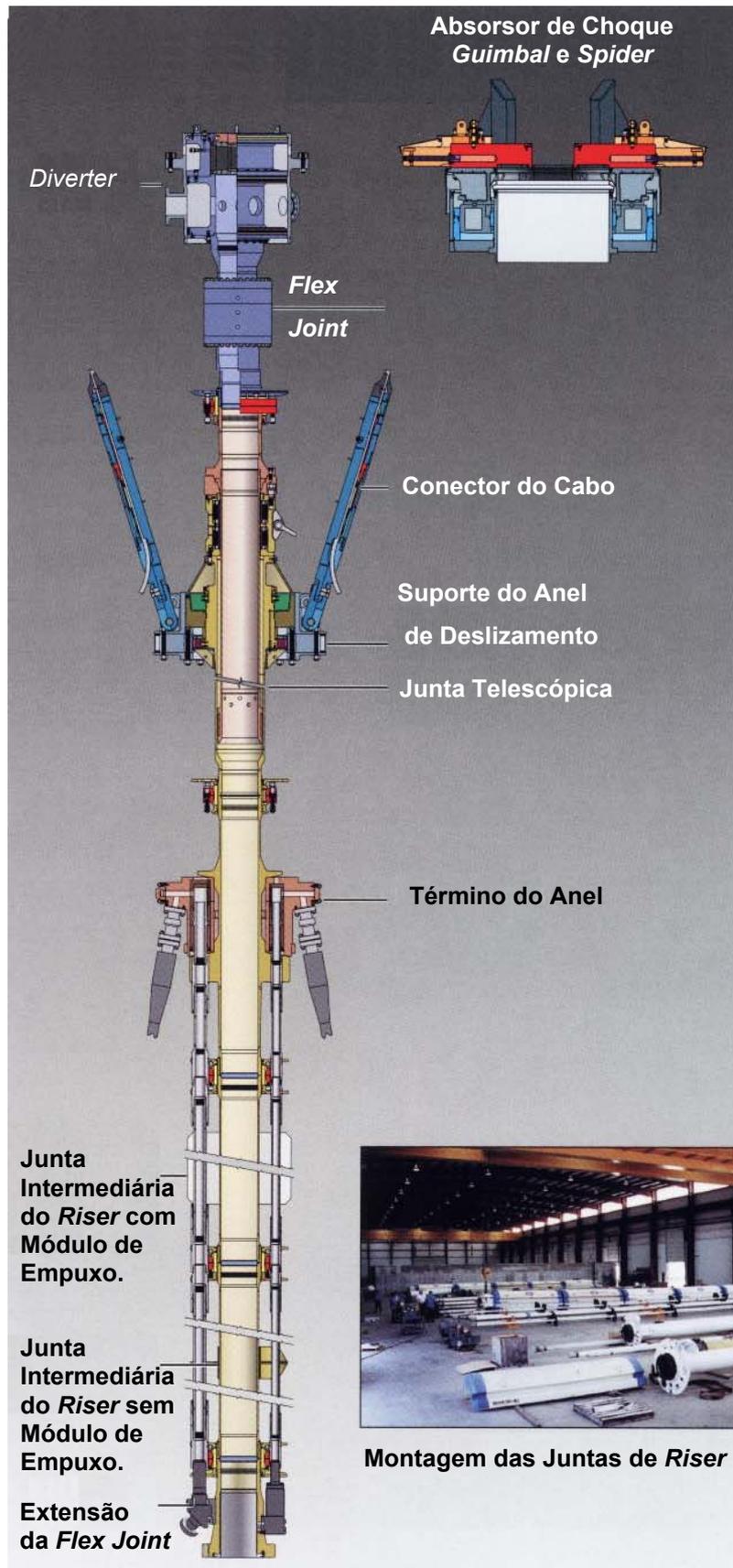


Figura 1.42 - Coluna de Riser de Perfuração [24].

### 5) Lower Marine Riser

O conjunto completo do BOP *stack* é montado numa armação de aço, que pode pesar em torno de 200 toneladas fora da água. Em caso de emergência (falha operacional ou condições ambientais extremas), com o poço fechado, é possível desconectar a parte superior do BOP *stack*, que é conhecida como *lower marine riser* (LMR) ou *lower marine riser package* (LMRP) (Figura 1.43). Os cabos eletro-hidráulico partem do LMR até a superfície pelo interior de um condutor chamado umbilical.

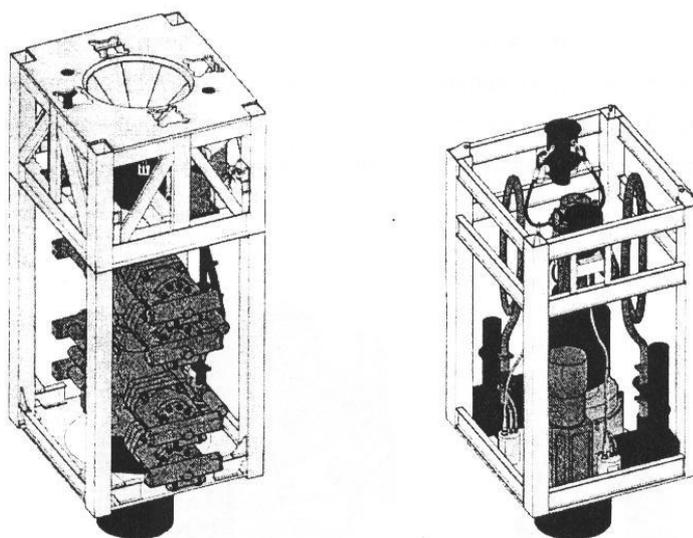


Figura 1.43 - BOP à Esquerda e LMRP à Direita [1].

### 6) Diverter

*Diverter* é um preventor anular de baixa pressão, geralmente localizado entre o barrilete interno e a embarcação. Permite o redirecionamento do fluido de perfuração e cascalhos durante um *kick*, podendo ocorrer durante os primeiros estágios da perfuração. O sistema é projetado para suportar velocidades altas de impactos de areia e cascalhos, mas não pressão alta. O controle é acionado automaticamente, abrindo as *flowlines*, quando o *diverter* é fechado.

### 7) Jumper Lines

A função das *jumper lines* é dar flexibilidade às conexões das linhas de *choke* e *kill* com a *ball joint* e junta telescópica. Compreendem as mangueiras de alta pressão ou os *loops* verticais helicoidais em aço, incorporados ao LMR.

### 8) Módulos de Empuxo

A tração máxima do *riser* ocorre no topo, assim, os módulos de flutuação são anexados ao *riser* para diminuir a tração requerida na superfície. Os módulos de empuxo podem ser fabricados de espuma sintética. Apesar de trazer grandes

vantagens, deve-se tomar cuidado com o aumento da força de arrasto devido a corrente, pois esta força é diretamente proporcional ao diâmetro total do *riser*, incluindo o módulo de empuxo (Figura 1.44).



**Figura 1.44** - Módulos de Empuxo para *Riser* de Perfuração à Esquerda [25] e à Direita [24].

## **ANEXO 2**

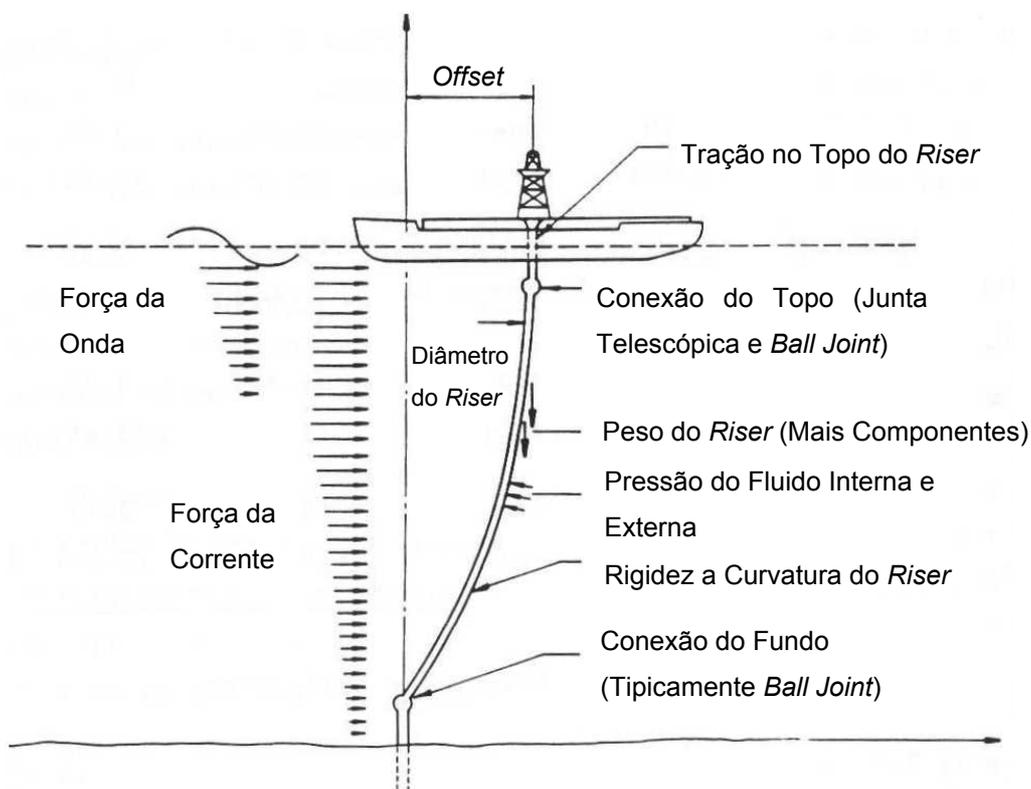
### **PRINCIPAIS EQUAÇÕES PARA ANÁLISE DE *RISER***

## ÍNDICE DO ANEXO 2

TÓPICO	PÁGINA
1 - FORMULAÇÃO DO CARREGAMENTO .....	123
2 - EQUAÇÕES PARA ANÁLISE DO <i>RISER</i> .....	126
3 - <i>RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR (RAO)</i> .....	131
4 - TENSÕES NO <i>RISER</i> .....	132
5 - PRINCIPAIS TEORIAS DE FALHA DO <i>RISER</i> .....	135

## 1 - FORMULAÇÃO DO CARREGAMENTO

A tração no topo do *riser* destina-se ao combate à flambagem, devido ao peso próprio da estrutura. A Figura 1.1 ilustra um esquema dos principais carregamentos que agem no *riser* em uma embarcação flutuante.



**Figura 1.1** - Principais Carregamentos que Agem no *Riser* em uma Embarcação [7].

Um outro carregamento importante é o causado pela vibração axial, que aumenta com o aumento da lâmina d'água (a partir de 900 metros ou 3.000 ft).

As forças internas compreendem o momento fletor, força cortante, tração axial e peso da estrutura. A aceleração lateral do *riser* resulta em carregamento de inércia. Também surgem forças devido às pressões hidrostáticas interna e externa. A dinâmica do fluido interno pode contribuir para carregamentos no *riser*. Forças hidrodinâmicas também são impostas ao *riser* através das ondas, corrente e movimentos da embarcação.

O fluxo não estacionário em torno do *riser* é complexo e não é totalmente compreendido. Um modelo simples para o carregamento hidrodinâmico em um cilindro vertical é descrito em [26]. A equação de Morison primeiramente foi desenvolvida para carregamento hidrodinâmico em cilindro vertical (*riser*) em águas rasas, mas tem sido implementada e experimentalmente verificada em modelos com carregamento

hidrodinâmico em cilindros esbeltos, arbitrariamente orientados em águas profundas. Geralmente a equação de Morison, que representa a força total da onda, é expressa da seguinte forma [27]:

$$F_x = (F_I)_x + (F_D)_x \quad (1.1)$$

$$F_x = C_M \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot |u| \cdot u \quad (1.2)$$

Onde:

$F_x \Rightarrow$  Componente horizontal da força combinada (eixo x, na direção da propagação da onda).

$(F_I)_x \Rightarrow$  Componente horizontal da força de inércia (direção do eixo x).

$(F_D)_x \Rightarrow$  Componente horizontal da força de arrasto (direção do eixo x).

$A \Rightarrow$  Área do cilindro por unidade de comprimento.

$\frac{\partial u}{\partial t} \Rightarrow$  Componente horizontal da aceleração da partícula da água.

$V \Rightarrow$  Volume do cilindro por unidade de comprimento.

$u \Rightarrow$  Velocidade relativa ao corpo submerso da partícula da água, normal ao eixo longitudinal do cilindro.

$|u| \cdot u \Rightarrow \pm u^2$ , Termo quadrado da velocidade, que contém o sinal da direção da onda.

$C_D \Rightarrow$  Coeficiente de arrasto.

$C_M \Rightarrow$  Coeficiente de inércia.

$\rho \Rightarrow$  Massa específica do fluido.

O coeficiente de inércia é expresso por:  $C_M = 1 + C_m$ , onde  $C_m$  é o coeficiente de massa adicional. Os coeficientes de arrasto e de massa adicional são funções do número de Reynolds,  $R$  e do número de Keulegan Carpenter,  $K$ . Estes números são dados por:

$$R = \frac{2 \cdot r \cdot U_m}{v} \quad (1.3)$$

$$K = \frac{U_m \cdot T}{2 \cdot r} \quad (1.4)$$

Onde:

$U_m \Rightarrow$  Velocidade de pico do fluxo.

$\nu \Rightarrow$  Viscosidade cinemática do fluido.

$T \Rightarrow$  Período de oscilação do fluido.

$r \Rightarrow$  Raio do cilindro.

KUBOTA [28] apresenta a equação de Morison para o caso do *riser* na presença de um campo de onda e correnteza da seguinte forma:

$$F_x = C_m \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left( \frac{du}{dt} - \frac{d^2x}{dt^2} \right) + \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{du}{dt} + C_D \cdot \rho \cdot r \cdot |u + U_c - \frac{dx}{dt}| \cdot (u + U_c - \frac{dx}{dt}) \quad (1.5)$$

$U_c \Rightarrow$  Velocidade da corrente normal ao *riser*.

A equação de Morison (1.5) é usada para modelar o carregamento hidrodinâmico do *riser* no plano. Fora do plano existe uma força transversal denominada de Força de Sustentação que é gerada pelo desprendimento de vórtices [28] e [29]. A força de sustentação,  $dL$ , para um segmento de comprimento,  $ds$ , em um cilindro de raio  $r$  pode ser escrita como:

$$dL = C_L \cdot \rho \cdot r \cdot U_m^2 \cdot ds \quad (1.6)$$

$C_L \Rightarrow$  Coeficiente de sustentação.

Os coeficientes de inércia, sustentação e arrasto podem ser determinados [7] através de gráficos com duas coordenadas  $x$ - $y$ , onde  $C_L$ ,  $C_M$  e  $C_D$  distribuem-se no eixo  $y$  e no eixo  $x$  distribuem-se valores do número de Reynolds. O resultado destes gráficos são curvas com valores de  $K$ . Na teoria o valor do coeficiente de inércia,  $C_M$ , pode ser calculado; por exemplo igual a 2,0 para cilindro polido num fluido ideal.

A força de oscilação transversal ao fluxo (força de sustentação) pode ocorrer na frequência de Strouhal para determinada velocidade crítica do fluxo, com número de Strouhal normalmente próximo de 0,2. A frequência de desprendimento de vórtice,  $f$ , é dada por:

$$f = \frac{St \cdot U}{2 \cdot r} \quad (1.7)$$

St ⇒ Número de Strouhal.

U ⇒ Velocidade do fluido normal ao cilindro.

Para cilindros lisos pode-se usar  $C_L = 0,2$ , para Reynolds maior do que  $1,5 \times 10^6$ . Para cilindros rugosos, outros valores de  $C_L$  e St são desenvolvidos. A oscilação natural da força de sustentação pode induzir excitação dinâmica do membro carregado. Sabe-se que, quando o período de desprendimento de vórtice se aproxima do período natural, a força de sustentação aumenta consideravelmente devido ao movimento do cilindro e uma instabilidade dinâmica pode ocorrer.

A força de arrasto constante,  $f_c$ , por unidade de comprimento do *riser* devido a corrente é dada por :

$$f_c = \rho r C_D U_c^2 \quad (1.8)$$

$U_c$  ⇒ Velocidade da corrente normal ao cilindro.

A força de arrasto pode contribuir com uma significativa proporção do carregamento lateral estático do *riser*.

A influência do movimento da embarcação sobre o *riser* pode ser decomposta em duas partes. A primeira componente é o deslocamento constante da embarcação a partir da cabeça de poço, como resultado de forças ambientais constantes. Este deslocamento é o *offset* estático da embarcação. Sobreposto com o *offset* estático estão os movimentos dinâmicos em resposta das ondas. O movimento da embarcação representa as condições de contorno dinâmicas a qual define o deslocamento horizontal do topo do *riser*.

O *riser* é restringido lateralmente na cabeça do poço. As condições de contorno rotacionais dependem dos equipamentos da base e do topo do *riser*. Uma *ball joint* é freqüentemente instalada na base e no topo do *riser* para assegurar rotação livre e momento nulo em ambas as partes. Porém, na prática existe alguma rigidez rotacional associada à rotação das extremidades do *riser* e precisa ser medida ou estimada para o propósito da análise de *riser*.

## 2 - EQUAÇÕES PARA ANÁLISE DO RISER

O *riser* de perfuração pode ser considerado como uma viga coluna. Além de carregamento lateral como numa coluna simples, o *riser* apresenta carregamento devido às pressões hidrostáticas interna e externa e carregamento axial.

Considerando o *riser* como uma viga coluna, então a equação diferencial que governa o problema, usada para a deflexão lateral estática é:

$$\frac{d^2}{dy^2} \cdot (EI \cdot \frac{d^2x}{dy^2}) - T(y) \cdot \frac{d^2x}{dy^2} - w \cdot \frac{dx}{dy} = F \quad (2.1)$$

Onde:

$EI \Rightarrow$  Rigidez à flexão do *riser*;

$T(y) \Rightarrow$  Tração axial na parede do *riser*,  $T =$  Tração no topo - Peso efetivo;

$w \Rightarrow$  Peso por unidade de comprimento do *riser*, peso efetivo, que é o peso imerso do *riser*, componentes e acessórios:  $w = W - B$ . ( $W =$  Peso do *riser* e  $B =$  Empuxo);

$F \Rightarrow$  Força lateral por unidade de comprimento;

$\frac{d^2}{dy^2} \cdot (EI \cdot \frac{d^2x}{dy^2}) \Rightarrow$  Resistência ao carregamento lateral, devido a rigidez à flexão do *riser*;

$T(y) \cdot \frac{d^2x}{dy^2} \Rightarrow$  Carregamento lateral proporcionado pela tração axial;

$w \cdot \frac{dx}{dy} \Rightarrow$  Componente lateral do peso do *riser* como resultado da curvatura deste.

Se o *riser* contém tubos de perfuração ou linhas de controle externo, para o propósito da análise, são usualmente incorporados nas propriedades físicas do *riser*.

Se as pressões hidrostáticas interna e externa são incluídas na análise, a equação para a deflexão lateral estática torna-se:

$$\frac{d^2}{dy^2} \cdot (EI \cdot \frac{d^2x}{dy^2}) - [T(y) + A_0 p_0(y) - A_i p_i(y)] \cdot \frac{d^2x}{dy^2} - (\gamma_s A_s - \gamma_0 A_0 + \gamma_i A_i) \cdot \frac{dx}{dy} = F \quad (2.2)$$

Onde:

$p_0 \Rightarrow$  Pressão hidrostática externa ao redor do *riser*;

$p_i \Rightarrow$  Pressão hidrostática interna;

$A_0 \Rightarrow$  Área da seção transversal externa da parede do *riser*;

$A_i \Rightarrow$  Área da seção transversal interna da parede do *riser*;

$A_s \Rightarrow$  Área da seção transversal da espessura da parede.

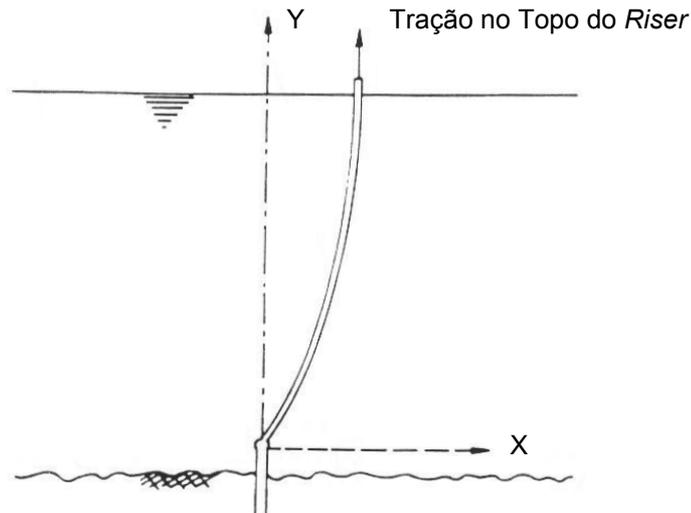
$\gamma_i \Rightarrow$  Peso específico do fluido no interior do *riser*;

$\gamma_0 \Rightarrow$  Peso específico do fluido externo ao redor do *riser*;

$\gamma_s \Rightarrow$  Peso específico do material do *riser*.

A equação (2.2) é válida para pequenas rotações, para ângulos menores que  $10^\circ$  a partir da vertical.

O sistema de coordenadas global (X-Y) usado é mostrado na Figura 2.1.



**Figura 2.1** - Sistema de Coordenadas Global (X-Y) [7].

O termo  $(A_0\rho_0 - A_i\rho_i)$  na equação (2.2) se origina do efeito lateral das pressões hidrostáticas externa e interna. Este efeito é similar a tração verdadeira na parede do *riser*, já que, este termo também multiplica a derivada segunda do deslocamento na direção x. O termo das pressões não modifica a tração axial verdadeira, tampouco a resultante direta da tensão na parede do *riser*. Portanto, a tração efetiva,  $T_e$ , é dada por:

$$T_e = T + A_0\rho_0 - A_i\rho_i \quad (2.3)$$

Pela equação (2.3) observa-se que o efeito da pressão hidrostática externa é similar ao da força de tração axial, enquanto o efeito da pressão hidrostática interna tende a gerar compressão no *riser*.

A equação (2.2) descreve o comportamento estático de um *riser* de geometria arbitrária, e a representação das forças num elemento do *riser* pode ser vista na Figura 2.2. As forças estáticas que agem no elemento são:

- a) A tração axial e força de cisalhamento no interior da parede do tubo;

- b) A força horizontal devido a resultante das pressões hidrostáticas externa e interna,  $(F_{xo} + F_{xi})$ ;
- c) A força vertical devido a resultante das pressões hidrostáticas externa e interna,  $(F_{yo} + F_{yi})$ ;
- d) A força de arrasto da corrente estacionária. O vetor de velocidades é resolvido nas componentes normal e tangencial do elemento, mas somente a componente normal,  $N$ , é assumida para a distribuição de força por unidade de comprimento;
- e) O peso do elemento,  $W_r$ , agindo verticalmente e orientado para baixo.

A equação (2.2) pode ser estendida para o comportamento dinâmico do *riser*. Deste modo, a equação do movimento horizontal do *riser* pode ser reescrita como:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{d^2}{dy^2} \cdot (EI \cdot \frac{d^2x}{dy^2}) - [T(y) + A_0 p_0(y) - A_i p_i(y)] \cdot \frac{d^2x}{dy^2} - (\gamma_s A_s - \gamma_0 A_0 + \gamma_i A_i) \cdot \frac{dx}{dy} = F(t)$$

(2.4)

Onde:

$x \Rightarrow$  Deslocamento horizontal. Agora, função da posição  $y$  e do tempo  $t$ ;

$t \Rightarrow$  Tempo;

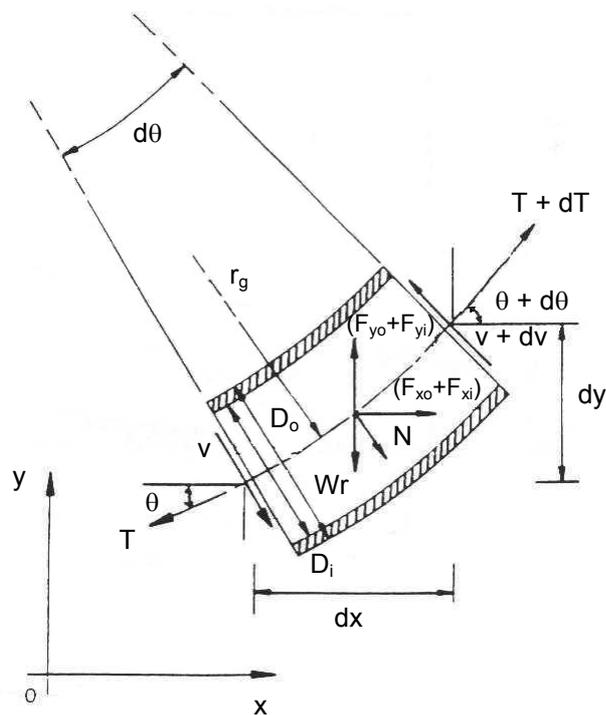
$m \Rightarrow$  Massa física do *riser* mais componentes por unidade de comprimento;

$c \Rightarrow$  Coeficiente de amortecimento estrutural linear equivalente;

$F(t) \Rightarrow$  Força lateral hidrodinâmica por unidade de comprimento em função do tempo;

$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \Rightarrow$  Força de inércia, resultado da aceleração lateral do *riser*;

$c \cdot \frac{dx}{dt} \Rightarrow$  Força de amortecimento estrutural linear equivalente.



**Figura 2.2** - Elemento Infinitesimal do *Riser* [7].

A força lateral hidrodinâmica pode ser modelada pela equação de Morison (equação 1.2 ou 1.5). Portanto:

$$F(t) = C_M \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot |u| \cdot u \quad (2.5)$$

Para que a equação (2.4) se complete, após a inclusão da equação (2.5), é preciso acrescentar a massa adicional por unidade de comprimento, na massa física do *riser*.

Não existe solução analítica da união das equações (2.4) com a (2.5), portanto, deve-se empregar uma solução numérica. Dois métodos que se destacam são: Elementos Finitos e Diferenças Finitas. Existem vários programas computacionais comerciais que utilizam estas técnicas para a análise dinâmica do *riser*, e podem ser no domínio do tempo ou da frequência, dependendo da aplicação.

O método no domínio do tempo é mais preciso e apresenta confiabilidade maior do que no domínio da frequência. A solução no domínio do tempo é empregada para prever a dinâmica ou a resposta transiente do *riser*. Já a solução no domínio da frequência presta-se para prever condições de estado estacionário e são frequentemente utilizadas porque o tempo computacional é muito menor.

### 3 - RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR (RAO)

É comum na análise de movimentos (movimento da embarcação que atua no topo do *riser*) obter-se a curva de resposta dinâmica, adimensional, tal que se relacione à amplitude de resposta com a amplitude da onda incidente. Esta curva é denominada de função de transferência do sistema ou RAO e inclui as propriedades físicas e geométricas do sistema (ex: embarcação) na presença de determinado escoamento, desta forma o RAO informa como se comportará a resposta em função da frequência de excitação.

Para os movimentos lineares *surge*, *sway* e *heave*, a função de transferência pode ser obtida pela relação: amplitude de resposta ÷ amplitude da onda incidente, em função da frequência.

Para os movimentos angulares *roll*, *pitch* e *yaw*, a função de transferência pode ser obtida pela relação: ângulo de resposta ÷ rotação da onda, em função da frequência.

O RAO pode ser expresso de forma dimensional para os movimentos angulares, relacionando a amplitude angular do movimento com a amplitude de onda (graus/metro). Portanto, entrando na curva com determinada frequência, obtém-se o ângulo de resposta (graus) correspondente a uma amplitude de onda unitária (metros).

Na obtenção do RAO, as ondas são consideradas regulares e um número suficiente de frequências é escolhido para cobrir as frequências do espectro de onda.

De forma geral, o RAO pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$RAO(\omega) = \frac{R_a}{\xi} \quad (3.1)$$

Onde:

$R_a \Rightarrow$  Amplitude de resposta;

$\xi \Rightarrow$  Amplitude da onda.

A resposta do sistema, RAO, para cada movimento é dada em função da frequência. A curva é construída ponto a ponto de forma que o sistema de equações possa ser resolvido para cada frequência. Assim, cada vez que o sistema é resolvido admite-se que a excitação é dada por uma onda regular e que apenas uma frequência está presente. Uma análise determinística, ou seja, em mar regular, basta-se entrar na curva de RAO com a frequência correspondente, que a resposta é imediata.

De posse do RAO, consegue-se construir o espectro de resposta,  $S_R(\omega)$ , pela equação a seguir:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 \cdot S(\omega) \quad (3.2)$$

A amplitude significativa de resposta,  $R_{a1/3}$ , é dada por:

$$R_{a1/3} = 2 \cdot \sqrt{m_0} \quad (3.3)$$

Onde  $m_0$  é o momento de ordem zero da resposta, dado por:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_R(\omega) \cdot d\omega \quad (3.4)$$

Substituindo a equação (3.4) na (3.3), obtém-se:

$$R_{a1/3} = 2 \cdot \sqrt{\int_0^{\infty} S_R(\omega) \cdot d\omega} \quad (3.5)$$

Substituindo as equações (3.1) e (3.2) na (3.5), obtém-se:

$$R_{a1/3} = 2 \cdot \sqrt{\int_0^{\infty} \left( \frac{(R_{a_i})^2}{\xi_i} \right) \cdot S(\omega) \cdot d\omega} \quad (3.6)$$

#### 4 - TENSÕES NO RISER

As forças internas e externas e momentos agindo no *riser* resultam numa distribuição de tensões interna na parede do tubo. Estas tensões precisam ser calculadas para assegurar que o tubo do *riser* se manterá no limite elástico do projeto, isto é, não ocorrerá escoamento do material. As tensões principais representam sempre os máximos e mínimos valores de um determinado estado de tensões e os planos onde atuam possuem tensões de cisalhamento nulas. Na seção do *riser* as tensões principais se originam da tração axial, momento e pressões interna e externa. As tensões principais que surgem de forças de torção e cisalhamento são geralmente negligenciadas. A Figura 4.1 ilustra um elemento de tensão principal tridimensional e uma seção transversal do *riser*. Para calcular as tensões no interior da parede do tubo, considera-se o *riser* como um tubo de espessura de parede elástica. Existem três tensões normais em cada ponto da parede do *riser*, que são: tensão axial total,  $\sigma_{aT}$ , que age ao longo do eixo longitudinal, tensão radial,  $\sigma_r$ , que age do centro para as extremidades do *riser* e tensão tangencial (circunferencial ou ainda de *Hoop*),  $\sigma_t$ , que é

tangencial a parede do *riser*. A tensão axial total surge da tração e do momento fletor, enquanto as tensões radial e tangencial surgem das pressões interna e externa. A tração axial é a tração verdadeira na parede do tubo do *riser* e não a tração efetiva usada nos métodos de análise hidrodinâmica.

**a) Tensão axial,  $\sigma_{aT}$**

$$\sigma_{aT} = \frac{T}{A_s} \pm \frac{M}{I_s} \cdot r \quad (4.1)$$

Onde:

$T \Rightarrow$  Tração axial ( $T =$  Tração no Topo + Força de Empuxo - Peso Efetivo);

$A_s \Rightarrow$  Área de seção transversal do tubo do *riser*;

$M \Rightarrow$  Momento fletor devido ao carregamento lateral;

$I_s \Rightarrow$  Momento de inércia da seção transversal do tubo do *riser*;

$r \Rightarrow$  Raio do *riser* onde se deseja calcular a tensão;

$T / A_s \Rightarrow$  Tensão Axial;

$M \cdot r / I_s \Rightarrow$  Tensão devido ao momento fletor.

A área e o momento de inércia podem ser obtidos por:

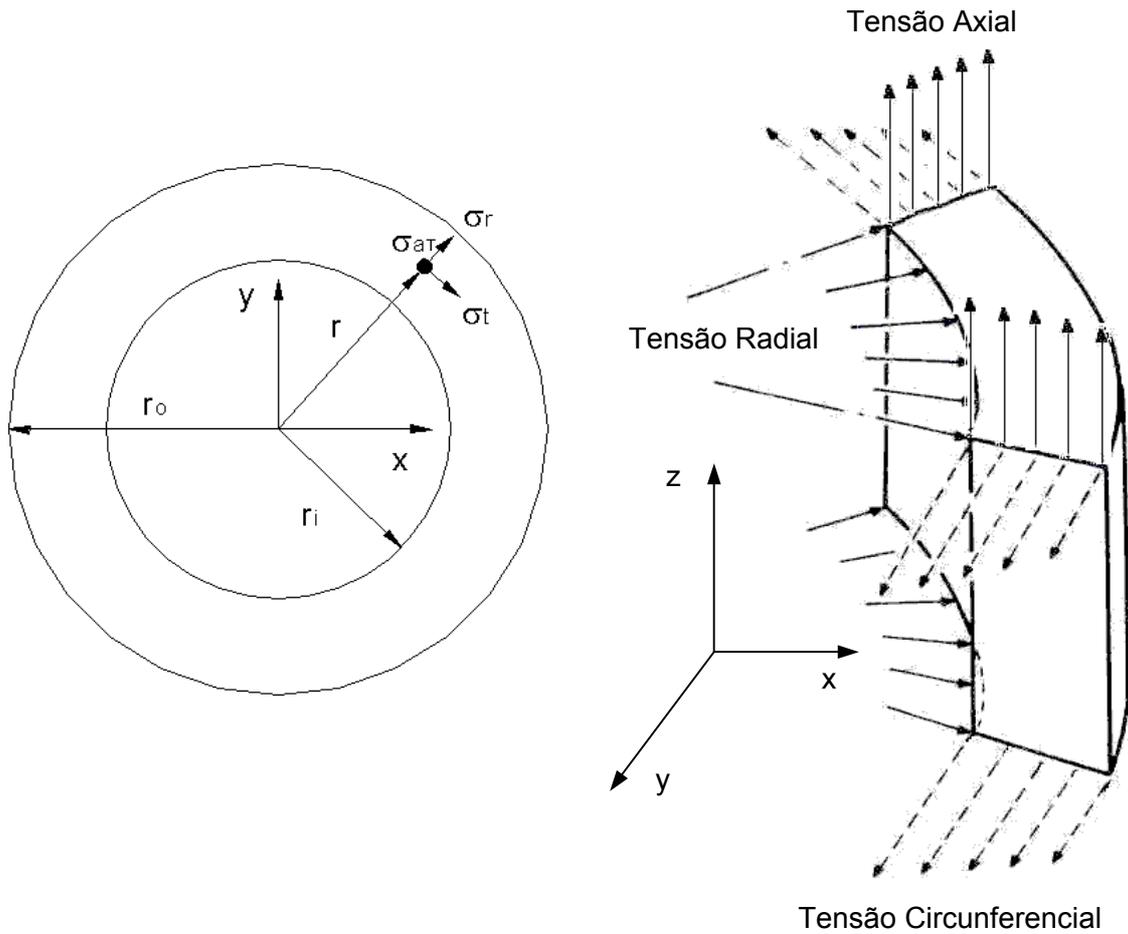
$$A_s = \pi (r_o^2 - r_i^2)$$

$$I_s = \frac{\pi}{4} (r_o^4 - r_i^4)$$

Onde:

$r_o \Rightarrow$  Raio externo da parede do *riser*;

$r_i \Rightarrow$  Raio interno da parede do *riser*.



**Figura 4.1** - Seção Transversal à Esquerda, Modificado de [7] e Elemento de Tensão Principal Tridimensional do *Riser* à Direita, Modificado de [27].

### b) Tensão Tangencial, $\sigma_t$ e Radial, $\sigma_r$

Com a consideração de tubo de parede grossa, longo, com as extremidades abertas, submetido a uma pressão interna  $p_i$  e uma pressão externa  $p_o$  e raios interno e externo  $r_i$  e  $r_o$  respectivamente, as tensões tangencial e radial são:

$$\sigma_t = \alpha + \frac{\beta}{r^2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_r = \alpha - \frac{\beta}{r^2} \quad (4.3)$$

$$\alpha = \frac{\rho_i \cdot r_i^2 - \rho_o \cdot r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\beta = \frac{(\rho_i - \rho_o) \cdot r_o^2 \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\rho_i = \gamma_i \cdot (H_m - z)$$

$$\rho_o = \gamma_o \cdot (H_w - z)$$

Onde:

$\gamma_i \Rightarrow$  Peso específico do fluido de perfuração;

$\gamma_o \Rightarrow$  Peso específico da água do mar ao redor do riser;

$H_m \Rightarrow$  Altura da coluna de fluido de perfuração;

$H_w \Rightarrow$  Altura da coluna de água do mar;

$z \Rightarrow$  Coordenada vertical.

## 5 - PRINCIPAIS TEORIAS DE FALHA DO RISER

Cada teoria propõe um critério para a causa da ruína do material, associando o critério ao colapso, em estados combinados de tensão. A tensão de ruína em um teste ou ensaio uniaxial do material pode ser utilizada para expressar o critério. Esta tensão corresponde à tensão de escoamento ou de ruptura, conforme material dúctil ou frágil.

Qualquer conjunto de componentes de tensões define completamente o estado de tensões em um ponto, portanto, definindo também as tensões principais. Desta forma, os critérios para o estado geral de tensão podem ser escritos em função das tensões principais em um ponto. Deste modo, as principais teorias de falha para o riser são:

### a) Teoria da Máxima Tensão de Cisalhamento e *Stress Intensity*

A ruína dos materiais por escoamento ocorrerá em qualquer estado de tensão quando o máximo valor em módulo da tensão de cisalhamento para aquele estado de tensão atingir um valor crítico. O valor crítico da tensão máxima de cisalhamento em módulo é aquele que existe na tração de um corpo de prova sob ensaio do material quando começa o escoamento do corpo de prova. Este valor atua em um plano a 45° relativamente ao eixo longitudinal do corpo de prova e é dado por  $\tau_{ys} = \sigma_{ys} / 2$ , onde  $\sigma_{ys}$  é a tensão de escoamento de tração do material. Para um estado geral de tensão o maior módulo da tensão de cisalhamento é dado por  $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ , onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são a maior e a menor das tensões principais para o estado de tensão considerado. Então o critério de máxima tensão de cisalhamento pode ser expresso por:

$$\tau_{ys} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (5.1)$$

$$\sigma_{ys} = \sigma_1 - \sigma_3 = \textit{Stress Intensity} \quad (5.2)$$

**b) Teoria da Máxima Energia de Distorção de Huber (1904), Von Mises (1913) e Hencky (1925).**

Esta teoria propõe que a ruína por escoamento seja associada a valores críticos de uma certa porção da energia de deformação por unidade de volume do material em um dado ponto.

A teoria da máxima energia de distorção considera que: se uma parcela de tensões hidrostáticas faz parte de um estado geral de tensão, esta parte hidrostática do estado de tensão, seja em tração ou compressão, não tem nenhuma influência no escoamento e que o mesmo ocorre quando a energia de deformação por unidade de volume, associada à parte de distorção do estado de tensão, atinge um valor crítico. O valor crítico corresponde à energia de distorção por unidade de volume que existe em um corpo de prova em escoamento sob tração.

Igualando a energia de deformação de distorção por unidade de volume de um estado geral de tensão com a energia de deformação de distorção por unidade de volume de um ensaio de tração, onde  $\sigma_1 = \sigma_{ys}$  e  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , sabendo-se que  $\sigma_2$  é o valor intermediário das tensões principais, tem-se o critério da máxima energia de distorção para a ruína em escoamento:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2 \cdot \sigma_{ys}^2 \quad (5.3)$$

**ANEXO 3**

**INFORMAÇÕES ADICIONAIS DO *RISER* DE PERFURAÇÃO E SEUS  
COMPONENTES**

**Tabela 3.1 - Comprimento, Tensão de Escoamento e Diâmetro Externo do Riser de Perfuração e seus Componentes, Modificado de [10].**

Juntas	Comprimento		Tensão de Escoamento		Diâmetro Externo do		Diâmetro Ext.	
					Tubo Principal do		do Módulo de	
	m	ft	MPa	Ksi	Riser		Empuxo	
				cm	in	cm	in	
<i>Flex Joint</i>								
Superior	5,39	17,67			53,98	21,25		
Telescópica	26,82	88			60,96	24		
<i>Riser</i>	24,38	80	551,58	80	53,34	21	137,16	54
<i>Flex Joint</i> Inferior	2,54	8,33			59,69	23,5		

**Tabela 3.2 - Diâmetros Externo, Interno e Tensão de Escoamento das Linhas Auxiliares do Riser, Modificado de [10].**

Linhas Auxiliares do Riser	Diâmetro Externo		Diâmetro Interno		Tensão de Escoamento	
	cm	in	cm	in	MPa	KSI
<i>Choke</i>	17,15	6,75	11,43	4,50	517,11	75,00
<i>Kill</i>	17,15	6,75	11,43	4,50	517,11	75,00
<i>Boost Line</i>	13,97	5,50	11,43	4,50	517,11	75,00
<i>Hydraulic Conduit</i>	9,22	3,63	6,99	2,75	248,21	36,00

**Tabela 3.3 - Rotação Máxima da Flex Joint, Modificado de [10].**

<i>Flex Joint</i>	Rotação Máxima (graus)
Superior	15
Inferior	10

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)