

FELIPE HIROKI SUENAGA

**SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE HEAVE EM COLUNAS DE
PERFURAÇÃO**

São Paulo
2015

FELIPE HIROKI SUENAGA

SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DE HEAVE EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Petróleo do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo da Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Marcio Yamamoto

São Paulo
2015

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser o mais justo e também tornar possível o progresso até esta etapa.

A toda a minha família, principalmente a meus pais, irmã e avó que tem me apoiado durante todos estes anos de graduação e de dificuldade durante a vida.

Aos professores do departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da USP, principalmente ao professor Márcio Yamamoto pela dedicação, apoio, compartilhamento do conhecimento e pela orientação neste trabalho de formatura.

A todos os meus outros familiares, como tios, tias e primos por sempre estarem ao lado, principalmente nos momentos mais difíceis e também nos momentos mais alegres.

A todos os meus amigos verdadeiros, por compartilhar as alegrias, aos momentos inesquecíveis que passamos e pelo apoio em todas as situações.

RESUMO

Neste trabalho será apresentado um estudo mecânico da coluna de perfuração em plataformas de petróleo. A este estudo será associado o movimento de *heave* à coluna, para ser apresentado posteriormente os sistemas de compensação que diminuem os esforços ao qual a coluna está submetida, evitando possíveis falhas na mesma.

Será apresentada uma revisão da literatura sobre a linha de pesquisa em sistemas de compensação de *heave* em plataformas de petróleo, com ênfase nas colunas de perfuração. Todas as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho serão obtidas através de consulta de artigos científicos, periódicos, livros didáticos, dissertações, teses e projetos, que abordam todo o assunto.

Com a conclusão do trabalho poderão ser evidenciadas as principais vantagens destes sistemas compensadores e também serão apresentados os diferentes tipos de projetos de sistemas compensadores atuais.

Palavras chave: perfuração de poços de petróleo, compensação de *heave*, coluna de perfuração, mecânica da coluna, compensador de coluna de perfuração.

ABSTRACT

This paper is going to present a mechanical study of the drillstrings on oil rigs. In this study, the heave motion will be associated to the drillstring, to be presented posteriorly the compensation systems that decrease the tensions effects acting in the drillstring, avoiding possible failures in it.

It will be presented a literature review, about heave compensation systems on oil rigs with emphasis on drillstrings research lines. All necessary information for the development of this work will be obtained through consultation of papers, periodicals, textbooks, dissertations, theses and projects that involves the subject.

With the conclusion of this paper, it may be evidenced the major advantages of these compensation systems, and diferent types of current compensating systems desings will also be presented

Key words: oil wells drilling, heave compensation, drill string, mechanics of drill string, drill string compensator.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVAS	7
1.2	OBJETIVO.....	8
2	MECÂNICA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO	9
2.1	CARGAS ESTÁTICAS	9
2.2	CARGAS DINÂMICAS	10
2.3	MODOS DE VIBRAÇÃO DA COLUNA.....	10
2.3.1	VIBRAÇÕES LATERAIS.....	11
2.3.2	VIBRAÇÕES TORCIONAIS.....	14
2.3.3	VIBRAÇÕES AXIAIS	15
3	SISTEMAS DE COMPENSAÇÃO DE HEAVE	15
3.1	DEFINIÇÃO DE SISTEMAS COMPENSADORES DE HEAVE.....	15
3.1.1	COMPENSADOR PASSIVO DE HEAVE	16
3.1.2	COMPENSADOR ATIVO DE HEAVE	17
3.2	SISTEMAS COMPENSADORES EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO.....	17
4	PROJETOS DE SISTEMAS COMPENSADORES DE HEAVE ATUAIS	19
4.1	COMPENSAÇÃO ATIVA DE HEAVE EM NAVIOS SONDA.....	19
4.2	COMPENSAÇÃO DE HEAVE EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO MULTI-SEGMENTADAS	22
4.3	INTERAÇÕES DA COLUNA DE PERFURAÇÃO COM A PAREDE DO POÇO	24
5	CONCLUSÕES.....	27
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	27
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

Desde o início dos tempos de exploração de óleo, a perfuração dos poços de petróleo sempre apresentou grande complexidade, além da necessidade de utilização de ferramentas que apresentavam elevado custo financeiro, e também a necessidade de assumir grandes riscos devido à incerteza na presença de reservas que trariam o retorno dos investimentos iniciais.

Recentemente, a expansão das fronteiras exploratórias e de produção para regiões que apresentam lâminas d'água cada vez mais profundas geram uma necessidade de adaptação das operações para estas regiões. Para a operação em águas ultra profundas, surgem várias condições adversas, como por exemplo as condições ambientais que além de diminuir o ritmo operacional aumentam muito o custo final dos projetos.

O custo diário de aluguel de sondas de perfurações de águas ultraprofundas pode chegar a mais de 500 mil dólares, e qualquer falha que possa prejudicar a perfuração e acarretar na parada da operação da plataforma podem causar grandes aumentos nos custos.

Durante a perfuração, são necessárias paradas para manutenção, troca e reparo de equipamentos desgastados ou danificados, devido às condições em que são submetidas, e também devido ao desgaste ao uso. Se somarem-se ao tempo de manutenção necessário aos tempos de improdutividade ocasionados por falhas, os projetos se tornam cada vez mais dispendiosos.

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVAS

Atualmente 90% dos poços de petróleo são de construção submarina, e deste modo as vibrações em que são submetidas as colunas de perfuração devido à interação da broca com a formação e a ação da gravidade são intensificadas pelo movimento de *heave* que a plataforma está submetida.

O movimento de *heave* provém basicamente da ação das ondas aumentando a flutuação e produzindo um deslocamento vertical na estrutura. Com o desenvolvimento de campos de exploração de petróleo em água ultraprofundas, é de vital importância a instalação segura de equipamentos submarinos para a realização da perfuração.

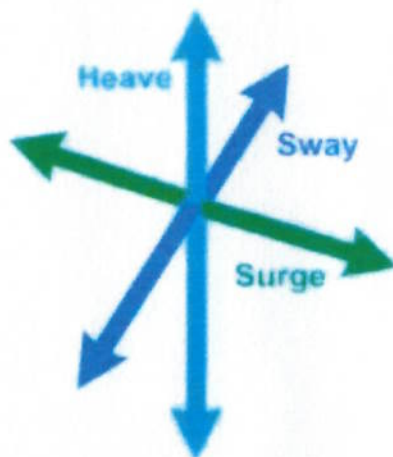


Figura 1.1 Movimentos translacionais em três eixos perpendiculares

Estas vibrações mecânicas são um dos maiores problemas operacionais de perfuração, pois não só limitam o desempenho da operação, e também as estruturas como os risers e as colunas de perfuração estão submetidas constantemente a esforços oscilatórios gerados devido ao movimento das ondas, deste modo, causam falhas em equipamento e aumentam os custos do desenvolvimento de campo devido ao tempo de ociosidade.

A elaboração de tecnologias como o sistema de compensação de *heave* em plataformas de perfuração visam a otimização da etapa de perfuração de poços de petróleo offshore, fazendo com que haja um melhor aproveitamento dos recursos, equipamentos e ferramentas utilizadas, além de diminuição de custos e o desenvolvimento de um ambiente de trabalho mais seguro.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das colunas de perfuração e sua interação com a formação, e o impacto do movimento de *heave* na

mesma. Com o estudo desta interação, é possível a obtenção de modelos de sistemas de compensação de *heave*.

Será explicado neste trabalho também como atuam as vibrações mecânicas axiais nas colunas de perfuração, a partir da revisão bibliográfica da mecânica de colunas de perfuração e risers, apresentado por DAREING (2012)

Logo em seguida serão apresentados os diferentes tipos de compensadores de *heave*, e também os diferentes projetos em desenvolvimento que terão seu funcionamento explicado.

Finalmente será realizada a conclusão do projeto e a explicação da importância dos sistemas compensadores do movimento de *heave*, e também a recomendação e sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2 MECÂNICA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Neste capítulo serão discutidos os principais esforços atuantes nas colunas de perfuração, e também serão apresentados os tipos de vibrações aos quais a coluna de perfuração está sujeita.

2.1 CARGAS ESTÁTICAS

A coluna de perfuração tem como função principal transmitir o torque até a broca, e também circular o fluido de perfuração pelo poço, para o movimento do motor de fundo, o resfriamento da broca, sustentação da parede do poço e também para transportar o cascalho do fundo do poço até o topo. Para isto é necessário a aplicação de torque na coluna de perfuração para girar a broca, e também é aplicada pressão interna, para a movimentação do fluido.

Outra carga muito importante que atua na coluna é o seu próprio peso. Quase todo o peso da coluna é suportado na superfície, resultando em tração da coluna, na ordem de milhares de kN. Poucas centenas de metros da coluna são suportadas pela broca, as quais estão sujeitas a compressão. Nesta região da coluna é evitada a flambagem devido à presença dos comandos e a pequena distância entre os estabilizadores (5 a 50 m).

2.2 CARGAS DINÂMICAS

A coluna de perfuração é fundamental na perfuração de poços de petróleo, e falhas em seus componentes podem acarretar em um aumento indesejado nos custos operacionais devido ao período de ociosidade. O comportamento geral de coluna de perfuração é bem complexo. O confinamento do fundo do poço, a sua interação com a coluna e os diferentes tipos de carga que variam conforme os componentes da coluna e a composição de fundo de poço são os principais fatores que causam a maior dificuldade para a previsão do comportamento da coluna de perfuração. (DAREING, 2012)

Pode se aprender muito através dos vários modelos matemáticos desenvolvidos para os diferentes modos de vibração que a coluna pode ser submetida (axial, torcional e lateral). Em conjunto com análise de medidas de dos parâmetros do fundo de poço durante a perfuração, os modelos matemáticos podem fornecer muita informação sobre o comportamento e o controle das colunas de perfuração.

2.3 MODOS DE VIBRAÇÃO DA COLUNA

As vibrações as quais a coluna é submetida são as principais causas de falhas nos equipamentos, e alguns deles são componentes eletrônicos sensíveis presentes na região próxima a broca, podendo acarretar em uma retirada da coluna de perfuração para reparo ou troca destes equipamentos, devido a impossibilidade de continuação da operação, pois muitas vezes estes equipamentos fornecem informações essenciais sobre a formação.

Além das falhas, as altas vibrações podem prejudicar a estabilidade do poço devido a impactos laterais da coluna, além de contribuir para a diminuição da taxa de penetração na formação e interfere também negativamente na orientação de perfuração do poço.

A seguir serão apresentados os três tipos de vibração que podem agir na coluna de perfuração. Os três tipos são a lateral, a torcional e a axial conforme mostra a figura 2.1., e suas principais características serão discutidas abaixo.



Figura 2.1. Modos de vibração em colunas de perfuração (ROCHA, AZUAGA, et al., 2008)

2.3.1 VIBRAÇÕES LATERAIS

Vibrações laterais podem ser descritas como uma rotação anormal tanto da broca como da coluna de perfuração. Neste caso, a coluna e a broca não rotacionam em torno de seus próprios eixos. A rotação se torna uma combinação entre a rotação entre a linha central do poço com o seu próprio eixo. Deste modo, a vibração lateral é um movimento complexo, no qual são gerados deslocamentos laterais, causando impactos e atrito com a parede do poço. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

As vibrações laterais ocorrem principalmente no BHA (Composição de fundo de poço - do inglês, *Bottom Hole Assembly*), pois durante a perfuração o BHA está sob compressão, sendo suscetível à flambagem. Os trechos superiores da coluna de perfuração estão tracionados, sendo assim menos suscetíveis às vibrações laterais. As vibrações laterais na coluna podem ser facilmente detectadas através de movimentos laterais da catarina, que são chamados de “chicotadas” (do inglês, *whipping*). Abaixo é apresentado na figura 2.2. o BHA. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

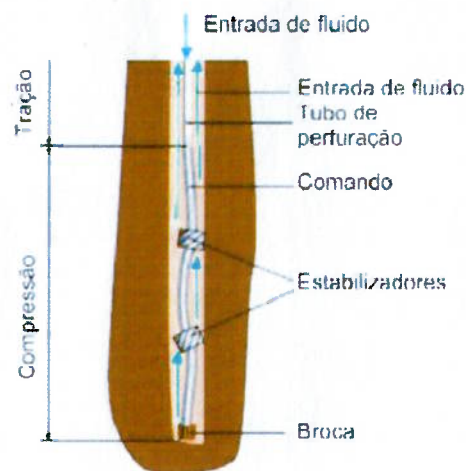


Figura 2.2. Composição de fundo de poço ou BHA (*bottom hole assembly*)

Diferentemente das “chicotadas” as vibrações laterais no BHA são de difícil detecção. Durante o fenômeno de vibrações laterais no BHA, seus componentes sofrem grandes deslocamentos laterais que geram tensões devido à flexão. Quando os deslocamentos se tornam muito grandes, ocorre o contato de alguns componentes do BHA e a parede do poço, causando grandes choques laterais. Em alguns casos pode ocorrer o contato contínuo com a parede do poço, acarretando em um aumento na taxa de desgaste sofrida pela coluna. Todos estes fenômenos aumentam drasticamente a fadiga nos elementos do BHA, e principalmente em suas conexões. Como as vibrações laterais são de difícil detecção, o acúmulo da fadiga durante a perfuração pode levar finalmente à falha de um componente, e acarretar num custoso trabalho para sua reposição. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Antes do uso da ferramenta de LWD (perfilagem durante a perfuração – do inglês, *Logging While Drilling*), não era possível a detecção das vibrações laterais no BHA. Atualmente se tornou possível a detecção deste fenômeno através do processamento dos sinais obtidos pelas medições de superfície.

Com a ocorrência das vibrações laterais, ocorre a flambagem do BHA, o qual assume uma forma sinuosa como é mostrado na figura 2.3..

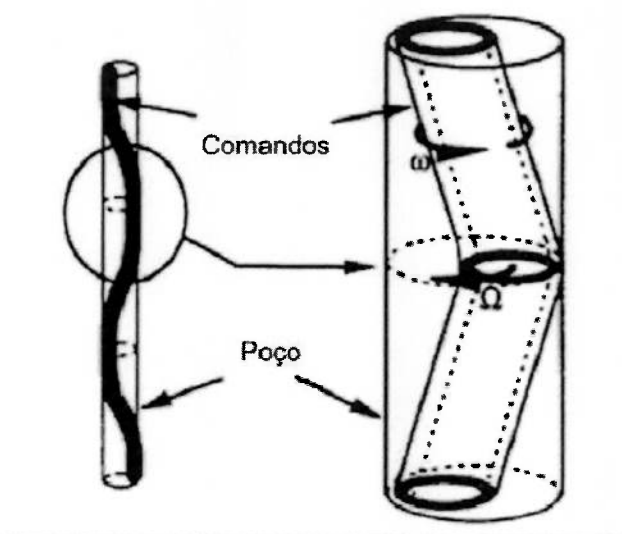


Figura 2.3. Representação esquemática da coluna de perfuração durante a ocorrência de vibrações laterais. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Pode-se observar que a coluna gira a uma velocidade angular ω , enquanto a sua linha de centro gira a uma velocidade angular Ω . A velocidade angular ω corresponde à velocidade angular instantânea da coluna. Sua média temporal é igual à velocidade angular que é constante em superfície (rotações por minuto). A velocidade angular da linha de centro da coluna pode estar no mesmo sentido de ω , neste caso tratando-se de uma vibração lateral direta (*forward whirling*), e também pode estar no sentido inverso de ω , tratando-se de uma vibração lateral inversa (*backward whirling*). (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

2.3.2 VIBRAÇÕES TORCIONAIS

As vibrações torcionais estão principalmente relacionadas com o aparecimento do fenômeno *stick-slip* de oscilação periódica. As principais causas para o seu aparecimento são a fricção existente entre a broca e a formação, e as características dos diferentes tipos de brocas utilizadas na perfuração.

O fenômeno é a oscilação torcional do BHA, no qual ocorre a redução da velocidade ou até mesmo a parada da rotação aplicada na broca, e então a energia que é acumulada nesta torção é liberada, causando uma rotação do conjunto com velocidades muito maiores do que a inicial. Este fenômeno pode ser identificado através de variações sutis no torque, e estas variações podem ser melhor identificadas por sensores de fundo localizados próximos a broca.

A vibração torcional pode se manifestar de duas maneiras diferentes. A transiente que é relacionada com as variações repentinas das condições de perfuração, como a heterogeneidade da formação e a resposta geralmente cai com o avanço do tempo de atividade. Já a do tipo estacionário ocorre devido a ressonância do BHA e é mais propensa a causar o fenômeno de *stick-slip* durante a perfuração.

A presença do fluido de perfuração no poço ameniza os efeitos da vibração torcional. Ele atua como um amortecedor viscoso, no qual reduz as oscilações do BHA, o que é uma grande vantagem durante a perfuração.

Este tipo de vibração é um dos mais danosos durante a perfuração em rotações baixas. Como consequência do fenômeno *stick-slip* ocorre uma falha prematura dos componentes eletrônicos presentes no LWD, além do desgaste acentuado nos cortadores da broca, reduzindo assim sua vida útil, fadiga nas conexões dos *drill-collars*, a redução da taxa de penetração e aumentar a instabilidade do poço.

2.3.3 VIBRAÇÕES AXIAIS

As vibrações axiais são o ponto principal de estudo neste trabalho. Estas vibrações estão relacionadas com movimentos paralelos ao eixo da coluna de perfuração, que corresponde à mesma direção do movimento de *heave* das plataformas.

Em casos extremos, a broca desenvolve um movimento intermitente podendo periodicamente perder o contato com o fundo. Consequentemente, as vibrações axiais impactam diretamente a taxa de penetração devido à constante variação de peso sobre a broca, além de poder causar deslocamentos laterais da coluna.

As brocas de cones rolantes apresentam maior facilidade para a geração de vibrações axiais do que brocas sem partes móveis. Isso ocorre devido à interação dos dentes da broca com a formação, as quais quebram a formação por compressão, gerando as forças axiais cíclicas. O efeito é mais acentuado em poços verticais ou quase verticais.

A vibração axial do BHA é diretamente associada a vibração axial da broca (*bit bounce*), e pode ser medida somente no eixo correspondente a esta vibração.

3 SISTEMAS DE COMPENSAÇÃO DE HEAVE

3.1 DEFINIÇÃO DE SISTEMAS COMPENSADORES DE HEAVE.

Um sistema compensador de *heave* é um dispositivo que atua diminuindo os efeitos indesejados de movimento entre dois objetos conectados, seria o movimento vertical relativo entre a coluna de perfuração e a plataforma de petróleo. O movimento de *heave* é o mais crítico, ou seja, podem causar grandes esforços oscilatórios sobre a coluna de perfuração.

Este sistema compensador não elimina por completo o movimento indesejado, mas tem como função principal amenizar os seus efeitos negativos, que são principalmente a variação de força e geração de *stress* na coluna, causando repuxo da coluna, podendo levá-la a fadiga. Estes compensadores geralmente são implementados

com sistemas de mola-amortecedor pneumáticos/hidráulicos. O principal foco de estudo a seguir é a apresentação dos sistemas compensadores em colunas de perfuração.

3.1.1 COMPENSADOR PASSIVO DE HEAVE

Os sistemas compensadores passivos de *heave* são utilizados para a redução da influência das ondas durante as operações de perfuração. O funcionamento de um sistema compensador passivo simples é a presença de uma mola macia que utiliza o princípio de isolamento vibracional, para reduzir a transmissibilidade (transferência da vibração da coluna para a broca que é dado pela razão de frequência de vibração da onda pela frequência de vibração do sistema) para valores abaixo de 1.

O princípio de funcionamento dos sistemas passivos de compensação é o armazenamento de energia das forças externas (geralmente das ondas) que atuam no sistema, e dissipá-las ou reaplica-las posteriormente. Um típico sistema passivo de compensação de *heave* consiste em um cilindro hidráulico e um acumulador de gás. Quando o pistão estiver estendido, ocorrerá uma redução no volume total do gás, e conseqüentemente irá comprimir o gás que irá aumentar a pressão atuante no pistão. A razão de compressão deve ser baixa, para garantir baixa rigidez. Um bom sistema pode atingir uma eficiência de até 80%.

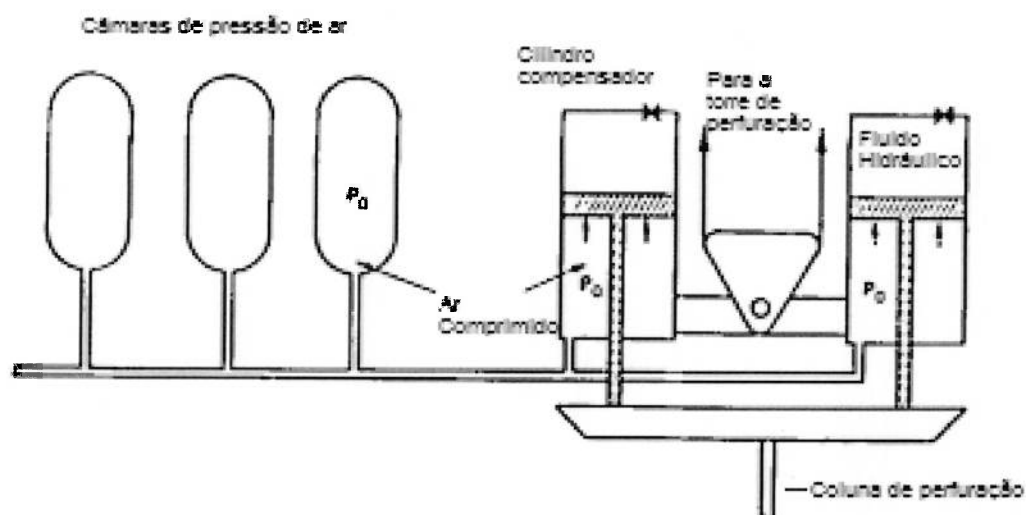


Figura 3.1 Esquema de um sistema compensador passivo de *heave* (NIEDZWECKI e THAMPI, 1998)

3.1.2 COMPENSADOR ATIVO DE HEAVE

Os compensadores ativos de *heave* diferem dos sistemas compensadores passivos pois apresentam um sistema de controle realimentado que ativamente tentam compensar qualquer tipo de movimento em um ponto específico, usando energia externa para ganhar precisão. Compensadores ativos de *heave* são basicamente sistemas em tempo real que conseguem calcular e compensar qualquer deslocamento em questão de milissegundos. A sua precisão depende principalmente das forças atuantes no sistema, ou seja, depende diretamente do tamanho e do formato das ondas que causam os movimentos indesejados.

O princípio de funcionamento dos sistemas ativos de compensação é o de manter uma carga realizada por um equipamento em uma embarcação ou plataforma imóvel em relação ao fundo do mar.

O desempenho dos sistemas compensadores ativos é normalmente limitado pela energia aplicada, a velocidade do motor do sistema e de seu torque, pela precisão e pelo atraso das medições dos sistemas de detecção de posição presentes nas plataformas, e pelos algoritmos computadorizados utilizados. Com a escolha do método de controle do sistema, como a utilização de valores pré-definidos ou dados de captações de sinais atrasados podem afetar o seu desempenho final, causando movimentos residuais indesejados.

3.2 SISTEMAS COMPENSADORES EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO

O sistema compensador presente em colunas de perfuração tem como função principal minimizar a influência do movimento de *heave* que atuam nas embarcações e nas plataformas na broca.

Os compensadores em colunas de perfuração consistem em molas gigantes entre a plataforma e a broca, com a presença de cilindros hidráulicos e câmaras de ar. A presença da mola evita a transmissão imediata de esforços da plataforma para a região da broca, retirando-a do contato com a formação.

Para melhorar a eficiência da curva de transferência de carga pela plataforma em função do movimento de *heave*, poderiam ser aplicados os sistemas ativos de compensação de *heave*. Porém, tal dispositivo requer quantidades muito grandes de energia e resfriamento. Uma melhor solução seria a de implementação de um sistema de compensação semiativo, contendo ambos os sistemas de compensação, passivo e ativo, no qual maior parte da carga é suportado pelo sistema passivo, enquanto um sistema ativo extra trabalha em paralelo, monitorando o aumento de carga em função do *heave* e a curva de operação das molas.

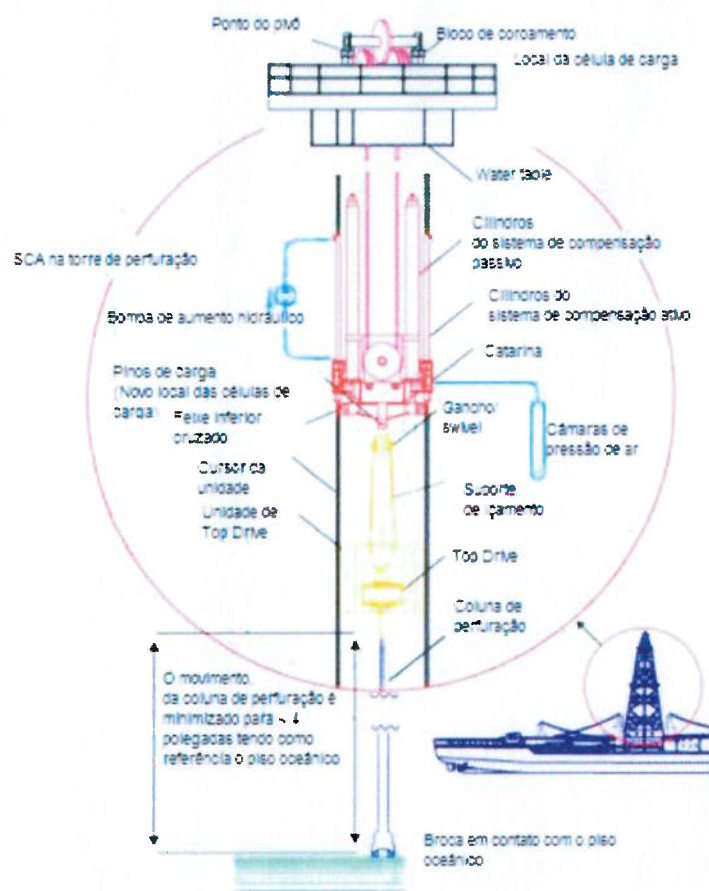


Figura 3.2 Esquema de um sistema de compensação semiativo (DO e PAN 2008)

4 PROJETOS DE SISTEMAS COMPENSADORES DE HEAVE ATUAIS

4.1 COMPENSAÇÃO ATIVA DE HEAVE EM NAVIOS SONDA

Os navios sonda utilizados em construção de poços submarinos são frequentemente operados em águas ultra profundas. A tecnologia de perfuração utilizada neste contexto compartilha algumas características com a tecnologia de perfuração de petróleo empregado nas águas mais rasas. Em navios sonda, a broca é acoplada a uma longa coluna de perfuração que é conduzida do alto de um guindaste (*'top drive'*). A torre está localizada a meio-nau, e o top drive é colocado ao longo do centro do navio. (Umesh, 1998)

Sabe-se que os movimentos de uma plataforma ou navio sonda induzidas pelas ondas impõe cargas significativas tanto na coluna de perfuração quanto nos risers. Porém, o efeito de heave é significativo, e os sistemas de compensação de heave se tornam necessários em muitos casos. Dois tipos de compensadores que são utilizados frequentemente em perfurações offshore são: (i) compensadores baseados em ar comprimido; e (ii) compensadores montados no bloco de coroamento (JAMSTEC (1991)). Os navios sondas são muito utilizados em fronteiras exploratórias ou em locais distantes da costa por terem um casco e convés maiores, o que possibilita armazenar uma grande quantidade de equipamentos e suprimentos comparadas uma plataforma semi-submersível ou outros tipos de plataformas. (UMESH, 1998)

Durante a perfuração de um poço offshore, o bloco de coroamento e a coluna de perfuração são suportados por um compensador, que impede o movimento do bloco de coroamento, devido ao movimento de heave da plataforma. Sem um compensador eficiente, o deslocamento da coluna de perfuração pode gerar variações de carga na broca, comprimindo, e causando flambagem da coluna de perfuração. Estes problemas podem gerar danos broca, danos coluna de perfuração, colapso da parede do poço e até mesmo a ocorrência de *kicks*. Se o sistema compensador não é capaz de funcionar de maneira satisfatória, a perfuração pode ser interrompida para evitar o risco de acidentes

graves. Com a parada da perfuração provoca-se a perda de tempo de operação, conseqüentemente, causando grandes prejuízos econômicos.

Porém, devido à sua grande área de contato com a água, os navios sonda estão submetidos a maiores esforços gerados pelo movimento das ondas do que os outros tipos de plataformas petrolíferas. Assim, para navios sonda operando em águas profundas e ultra profundas, é necessário considerar a utilização de métodos especiais de compensação de movimento, preferencialmente um sistema ativo de compensação para aumentar a efetividade sobre a larga banda de frequência de onda a qual o navio é submetido. Vantagens de utilização de um sistema destes seria uma melhor regulagem da tensão nos risers e nas colunas de perfuração, além da redução das cargas que geram a fadiga das estruturas.

Se um sistema mola-massa não amortecido é acoplado a um segundo sistema oscilante sendo excitado por uma força externa senoidal, então existe uma frequência de excitação em que a segunda massa irá permanecer estacionária para qualquer magnitude de excitação. Comportamento semelhante pode ser estudado para estabilizar um dos três osciladores acoplados no sistema. Além disso, também se verificou que o controle ativo pode ser utilizado para estender tal comportamento ao longo de uma longa gama de frequências de excitação. (UMESH, 1998)

No sistema de compensação ativo presente nos navios sonda, o oscilador a ser mantido em repouso é um bloco de massa M_c suportado por uma mola na qual a coluna de perfuração é conduzida. O navio sonda de massa M_s forma um outro oscilador, enquanto o terceiro oscilador é uma massa não amortecida chamada de M_m . Todas as massas devem primariamente se mover na direção vertical. A massa M_m deve ser controlada de tal maneira que o *feedback* fornecido por ela mantenha a massa M_c estacionária em um longo interval de frequência.

O sistema está configurado de tal maneira que a massa M_c suporta a coluna de perfuração. A massa M_m é suportada por uma mola, e controlada pela massa M_c , por um

atuador linear. A coluna de perfuração é rotacionada a partir da massa M_c . M_c é suportada em guias verticais acionadas por mola, ao longo do qual é conduzida verticalmente pela torre de perfuração por um par de atuadores lineares.

A força de amortecimento que atua em M_c não tem de ser igual a zero. No entanto, o amortecimento em M_m deve ser o menor possível. A atuação necessária para o sistema é fornecida por motores lineares ou cilindros hidráulicos. O *feedback* das três oscilações é obtido através de um acelerômetro montado em M_m mede a aceleração do mesmo. A aceleração vertical de M_c é calculada pela média de quatro saídas acelerômetros fixos próximos aos quatro cantos do bloco. A aceleração vertical do navio que é representado pela massa M_s é calculada pela média das medições de quatro acelerômetros fixos na torre de perfuração, próximo dos atuadores da massa M_c . Os sinais de controle para os dois atuadores podem ser avaliados utilizando um processador de sinal digital específico. A figura 4.1 indica todo o esquema do sistema descrito anteriormente.



Figura 4.1 Esquemática de um sistema ativo de compensação de heave (UMESH, 1998)

4.2 COMPENSAÇÃO DE HEAVE EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO MULTI-SEGMENTADAS

O uso da consideração de que a coluna de perfuração consiste em vários segmentos de tubos de perfuração é muito comum para atividades científicas no campo de perfuração em águas profundas. Deste modo, foram desenvolvidos vários modelos discretos com os diferentes parâmetros para a previsão do comportamento dinâmico da coluna para diversas configurações.

Os componentes individuais das colunas podem apresentar propriedades geométricas e podem ser compostas de diferentes materiais. A extremidade superior da coluna é conectada ao *moon pool* do navio sonda ou da plataforma, e a função principal do compensador é de isolar a coluna de perfuração e as atividades relacionadas a perfuração dos movimentos verticais das plataformas.



Figura 4.2 Área do *Moon pool* de plataforma de petróleo (drillingcontractor.org)

As considerações hidrodinâmicas de massa adicionada foram introduzidas através da modelagem das seções de conexão dos tubos de perfuração, principalmente através da fricção de arrasto nos tubos e nos encaixes dos conectores dos tubos.

As duas principais considerações hidrodinâmicas são a massa adicionada e o fluido de amortecimento, relacionado com a coluna de perfuração e os risers. As

contribuições do amortecimento hidrodinâmico surgem da fricção ao longo do interior e exterior das paredes da coluna de perfuração, e também do fluxo de separação causada pelas descontinuidades geométricas.

O Projeto do sistema compensador tem como um dos pontos mais importantes o comportamento do sistema, o qual deve ser um filtro de banda passante de frequências. O sistema compensador é projetado com frequências de corte inferiores ao de frequências de onda no local em que será realizado o projeto. Os movimentos da coluna de perfuração devem ser compensados quando a broca toca o piso oceânico. O peso do conjunto neste momento é a massa mínima que será compensada pelo sistema, e o valor máximo massa é alcançado ao final da perfuração.

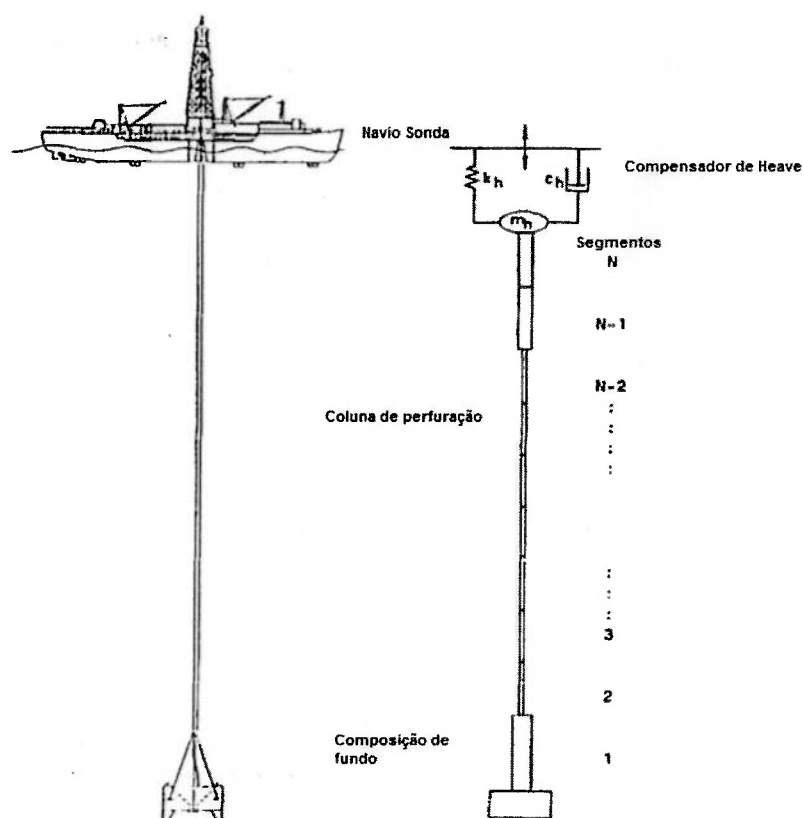


Figura 4.3 Projeto de compensador em coluna de perfuração multi-segmentada e sua idealização matemática. (NIEDZWECKI e THAMPI, 1998)

4.3 INTERAÇÕES DA COLUNA DE PERFURAÇÃO COM A PAREDE DO POÇO

A composição de fundo de poço está sujeita a fortes vibrações causadas devido as interações existentes entre a broca/formação e coluna de perfuração/paredes do poço. A vibração da coluna é um problema bastante complexo, pois gera problemas como a ressonância paramétrica, e as excessivas vibrações laterais, que são as principais responsáveis da falha por fadiga, desgaste dos componentes da coluna e o aumento indesejado no diâmetro do poço. (CHRISTOFOROU e YIGIT, 1997)

Embora tenham muitas pesquisas na área de modelagem e análise do comportamento dinâmico das colunas de perfuração, ainda não é possível a compreensão total dos fenômenos de vibração. Além disso, a natureza complexa e variável das condições de contorno e das características operacionais, enfraquecem a utilidade dos modelos disponíveis em função de suas respectivas capacidades de predição do comportamento. (CHRISTOFOROU e YIGIT, 1997)

Por esta razão, o uso de ferramentas experimentais de medidas em colunas de perfuração é atualmente o único método confiável para melhorar o desempenho e resolver os problemas de perfuração em tempo real. Alguns estudos sobre as instabilidades paramétricas causadas pela flutuação do peso sob broca levam em consideração o contato permanente entre a coluna de perfuração e a formação durante todo o seu comprimento. O efeito das vibrações laterais e torcionais foram desconsiderados também. A adoção destes vários fatores visa a simplificação do fenômeno para o desenvolvimento de diferentes modelos.

A sua modelagem dinâmica é basicamente o estudo do comportamento da composição de fundo de poço (BHA). O BHA é composto por colares de perfuração e estabilizadores. A parte inferior dos colares de perfuração suportada pelos estabilizadores está sob compressão devido ao peso das partes superiores.

A força de compressão aplicada na broca (peso sobre broca) é essencial para a perfuração. Para este caso, é assumido que a porção inferior dos colares de perfuração estão sob a combinação de vibrações axial e lateral, enquanto o restante do BHA está

somente sob a ação da vibração axial. Esta hipótese pode ser justificada pois na maioria das aplicações reais, a porção superior do BHA está em contato permanente com a parede do poço.

A seguir será apresentado um esquema do sistema.

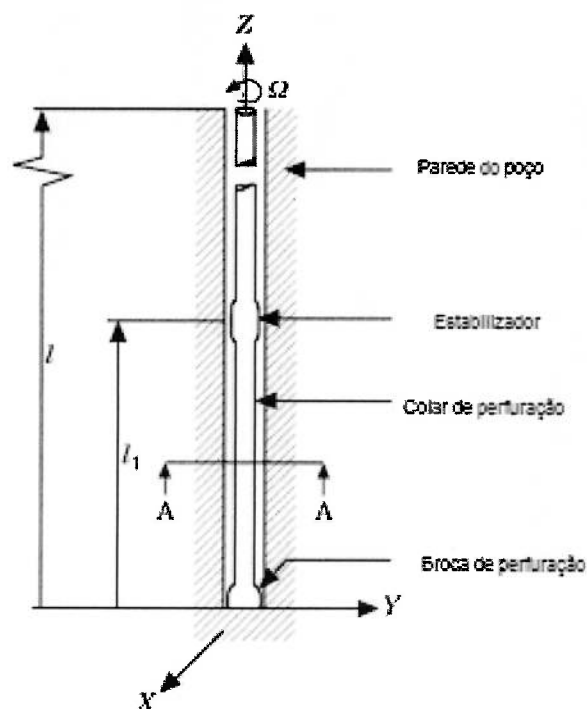


Figura 4.4 Esboço do sistema de modelagem dinâmica (CHRISTOFOROU e YIGIT, 1997)

Para o movimento axial, é assumido que a coluna é fixa no ponto da broca, e livre na seção final do BHA. A coluna de perfuração é assumida como um cilindro sólido de seção transversal uniforme, que gira em torno do eixo longitudinal z com velocidade angular constante Ω . A rotação da coluna de perfuração submetida a uma vibração transversal resulta em momentos giroscópicos. (CHRISTOFOROU e YIGIT, 1997).

O acoplamento não linear entre as deformações de flexão e axiais são retidos por meio de medidas de deformação finitas. As equações de movimento são obtidas através

do uso de métodos de abordagem de Lagrange. Neste caso as vibrações torsionais não são consideradas.

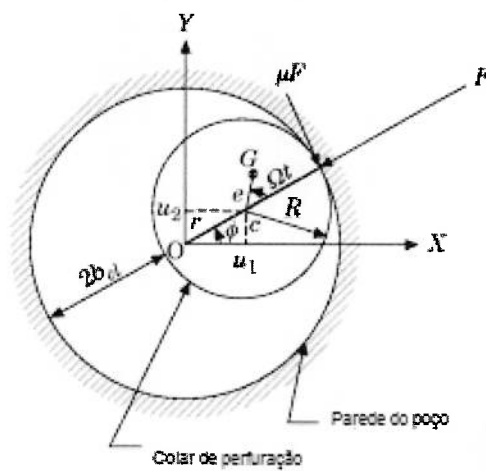


Figura 4.5 Seção cortada dentro do poço indicando deflexão do colar de perfuração (CHRISTOFOROU e YIGIT, 1997)

5 CONCLUSÕES

Os sistemas compensadores de *heave* atualmente são essenciais em plataformas que atuam em águas profundas e ultra profundas. A sua principal importância se deve pela sua capacidade de amenizar os efeitos de *heave* transmitidos pela plataforma até a coluna, deste modo evitando um aumento muito elevado da intensidade de vibração as quais a coluna está submetida.

Com a minimização destas vibrações, ocorrerá o aumento da vida útil dos equipamentos, e ocorrerá uma preservação maior dos sistemas eletrônicos presentes na coluna de perfuração, além de evitar possíveis falhas por fadiga, diminuindo ao máximo o tempo de ociosidade para a retirada e a reposição dos equipamentos danificados durante a operação. Consequentemente, ocorrerá a minimização dos custos de operação, pois haverá aproveitamento máximo do tempo.

Pode-se observar uma grande complexidade na análise dos esforços atuantes nas colunas de perfuração, devido à presença de vários fatores naturais e operacionais, que impossibilitam o desenvolvimento de um modelo único de ferramenta.

Os diversos sistemas compensadores atuais são muito efetivos, porém apresentam grande custo, devido a necessidade de sistemas ativos de compensação, pois necessitam de energia externa para o seu funcionamento. Com o constante avanço no mercado exploratório *offshore* certamente haverá um grande desenvolvimento tecnológico na área, possibilitando a criação de sistemas de compensação mais eficazes e também menos custosos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como o estudo aprofundado deste tema, as metodologias utilizadas podem ser aplicadas para outros casos como por exemplo os sistemas compensadores de movimento em risers, que apesar de serem projetos diferentes e apresentarem características diferentes (massa, esforços, tensões, equacionamento), possuem mesma base teórica de desenvolvimento. Além disso, com o estudo aprofundado dos conceitos, as informações estudadas podem ser integradas a novos projetos na área.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAREING, DON W.. Mechanics of Drillstrings and Marine Risers. 1. ed. Nova York: ASME, 2012.

DO K.D., PAN J. Ocean Engineering. NONLINEAR CONTROL OF NA ACTIVE HEAVE COMPENSATION SYSTEM, Australia, p.558-571, 2008.

GERMAY C., WOUW N. V., NIJMEIJER H., SEPULCHRE R., Siam J. Applied Dynamical Systems. NONLINEAR DRILLSTRING DYNAMIC ANALYSIS, V. 8, N. 2, p. 527-553, 2009.

NIEDZWECKI J. M., THAMPI S. K. Applied Ocean Research. HEAVE COMPENSATED RESPONSE OF LONG MULTI-SEGMENTED DRILL STRINGS, Texas USA, v. 10, n. 4, p. 181-190, 1998.

NIEDZWECK J. M. I, THAMPI S. K. Ocean Engng. HEAVE RESPONSE OF LONG RISERLESS DRILL STRINGS, Grã-Bretanha, v. 15, n. 5, p. 457-469, 1988.

REY-FABRET, I.; MABILE, M. C.; OUDIN, N. SPE Annual Technical Conference And Exhibition. DETECTING WHIRLING BEHAVIOUR OF THE DRILL STRING FROM SURFACE MEASUREMENTS. SAN ANTONIO; SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 1997.

YIGIT A. S., CHRISTOFOROU A. P. Journal of Sound and Vibration. DYNAMIC MODELLING OF ROTATING DRILLSTRINGS WITH BOREHOLE INTERACTIONS, Kuwait, p.243-260,1997.

