1
Introdução

Os esforços pioneiros de Euler e Bernoulli no século XVII estenderam as leis de Newton, de massas pontuais, para qualquer corpo deformável e, assim, iniciaram o reconhecimento independente do Princípio do Momento Angular. Com a introdução do conceito de tensor de esforço por Cauchy no século XIX, as bases da elastodinâmica clássica foram completadas. Mas a implementação dessas bases para a resolução de problemas práticos tiveram que esperar por ferramentas matemáticas efetivas. Naturalmente, o primeiro uso dessa teoria envolve linearizações das equações em torno de configurações estacionárias.

No entanto, a priori não é possível supor que as aproximações baseadas em deslocamentos pequenos, em torno de uma configuração particular, irão prever uma dinâmica exata do sistema para períodos longos de tempo.

1.1
Teorias Reduzidas

Historicamente, as teorias dimensionalmente reduzidas estavam disponíveis antes que a teoria tridimensional fosse totalmente desenvolvida. Especificamente, teorias unidimensionais de vigas e teorias bidimensionais de cascas ganharam acesso para aplicações de engenharia e, embora se tenha disponível uma teoria tridimensional bem desenvolvida, é geralmente aceito que o tratamento de problemas de elasticidade de elementos esbeltos é melhor estudado usando teorias dimensionalmente reduzidas.

Existem dois métodos para derivar as teorias dimensionalmente reduzidas: o método tridimensional e o método direto.

– **Método Tridimensional**

  Neste primeiro método, as equações que governam o sistema são reduzidas usando suposições no campo de deslocamentos (ou outros campos físicos), resultando em teorias uni- ou bi-dimensionais de vigas ou cascas, respectivamente. A suposição adotada com muita freqüência é a variação linear do campo de deslocamentos sobre a espessura do corpo tridimensional.

– **Método Direto**

  Neste segundo método, as equações que governam a dinâmica do sistema são derivadas considerando que o sistema possui dimensão menor que 3, mas com maior número de graus de liberdade para cada ponto material do sistema; neste segundo método encontra-se o contínuo de Cosserat, para vigas e cascas. O contínuo de Cosserat é caracterizado por um vetor de deslocamentos e um conjunto de diretores unido a cada ponto material do sistema. Esses diretores constituem os graus de liberdade adicionais que, para corpos tridimensionais, levam em conta efeitos típicos como flexão, extensão e torção. O contínuo de Cosserat é considerado de dimensão um ou dois, dependendo do tipo de teoria usada, teoria de vigas ou cascas.

Uma estrutura esbelta, tipo viga, é um corpo tridimensional que é basicamente uma curva no espaço e possui uma secção transversal pequena se comparada com seu comprimento. Esse tipo de estrutura pode ser modelada usando o contínuo de Cosserat unidimensional. Na engenharia, a análise desse tipo de estrutura é de grande interesse porque elas são usadas para modelar braços de robô, hélices de helicópteros, seqüências do DNA, cadeia de polímeros, etc. Neste trabalho, a teoria de Cosserat é estendida ao estudo da dinâmica de colunas de perfuração.

Resumidamente, o contínuo de Cosserat unidimensional considera, em cada ponto ao longo da curva de centróides da secção transversal da viga, um conjunto de três vetores ortogonais, usualmente chamados de diretores. Esses diretores descrevem a flexão, a torção, a extensão e o cisalhamento da viga. Usando equações constitutivas adequadas, é possível expressar a relação que existe entre as deformações elásticas e os esforços aplicados sobre a viga. Neste trabalho, o interese é a modelagem de estruturas esbeltas, como uma coluna de perfuração, consequentemente considera-se desprezível o cisalhamento.

A descrição simples, usando o contínuo de Cosserat, de estruturas esbeltas, fornece uma delineação clara entre os princípios físicos básicos, as propriedades do material e as aproximações matemáticas. Em problemas em que os métodos lineares são inapropriados (condições de contorno não lineares, material não linear, geometria complexa, impacto, precessão, interação interna, etc) o método de Cosserat é uma alternativa viável.

A teoria de Cosserat foi desenvolvida no início do século XX pelos irmãos Eugene e François Cosserat (1909), mas a recente retomada dessa teoria é devida, por um lado, ao incremento drástico da capacidade computacional e, por outro, ao estudo crescente de sistemas não lineares.

Atualmente, o contínuo de Cosserat unidimensional está sendo usado amplamente para modelar diferentes sistemas, entre eles pode-se citar: colunas verticais de poços de petróleo [36], cabos para aplicações cirúrgicas [46], modelagem de componentes de MEMS [52], comportamento mecânico de cadeias de DNA [53], componentes esbeltos de automóveis [63], modelagem do fluxo sangüíneo em vasos [64], entre outros.

1.2
Perfuração de Poços de Petróleo

O termo poço de petróleo é usado para qualquer perfuração, através da superfície do solo, projetada para encontrar e extrair petróleo ou gás. Um desenho esquemático de um sistema de perfuração vertical para poços de petróleo, com seus principais componentes, pode ser observado na Fig. 1.1. Neste trabalho, adota-se a seguinte tradução para os componentes da coluna de perfuração: *Drill pipe* (Tubo de perfuração), *BHA-Bottom Hole Assembly* (Comando) e *Bit* (Broca).

Os primeiros poços de petróleo foram perfurados percussivamente, isto é, simplesmente martelando o solo. No entanto, a limitação na profundidade do método percussivo fez que o método rotativo fosse introduzido. Modernos poços, usando perfuração rotativa, podem alcançar profundidades de 12,000 metros.

Até os anos 70, muitos dos poços eram verticais ou, mais especificamente, vertical-desviados. O desvio era induzido por diferentes litografias do terreno e imperfeições mecânicas. No entanto, as modernas tecnologias permitem realizar poços com grandes curvaturas e inclusive podem ser horizontais. Isso é de grande utilidade porque os reservatórios que contém petróleo, geralmente, possuem dimenssões horizontais bem maiores que as verticais. Conseqüentemente, um poço que passa ao longo do reservatórios pode produzir um grande volume de petróleo. Usando a perfuração curva ou horizontal tornou-se possível alcançar reservatórios muito distantes do ponto de perfuração, permitindo extrair petróleo de lugares de difícil acesso.

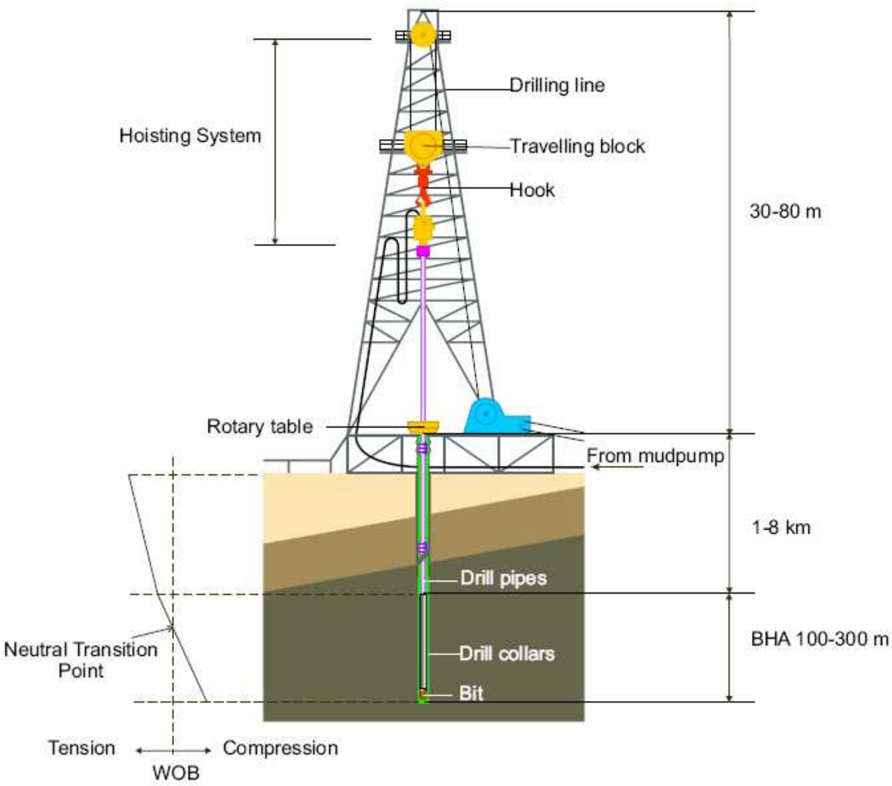

Figura 1.1: Componentes do Sistema de Perfuração [39].

1.3 Revisão Bibliográfica

A perfuração de poços de petróleo é amplamente conhecida desde os anos 1920. Desde então, muitos investigadores contribuíram enormemente para compreender e simular o comportamento dinâmico desses sistemas, por exemplo, existem várias teses de doutorado orientadas ao estudo de colunas de perfuração em poços verticais, entre elas: Jansen [20], Dykstra [25], Leine [39], Chen [54], Franca [55]. Nesses trabalhos, é possível encontrar diferentes tópicos relacionados com a perfuração de poços de petróleo verticais e, no esforço de entender o comportamento das colunas de perfuração, muitas formulações matemáticas foram reportadas.

Baseados em dados experimentais de campo, os pesquisadores Cunningham [3] e Dareing et al. [4] assinalam que as vibrações da coluna de perfuração causam baixa performance do processo de perfuração e, se não são tomadas as medidas corretivas necessárias, podem resultar em danos ao sistema de perfuração.

Observações de campo, fundamentado nas medições de vibração na superfície e na broca, indicam que as colunas de perfuração estão submetidas a vibrações severas [3, 4]. As vibrações da coluna deve-se, principalmente, ao contato broca-formação e ao contato parede do poço-coluna (tubos de perfuração, comandos e estabilizadores). Também, tubos tortos e o desbalanceamento dos componentes da coluna são os causadores das vibrações no sistema. As vibrações da coluna, em geral, são do tipo axial, flexional ou lateral e torsional [4]. Essas vibrações quando excessivas conduzem à perda de eficiência, à fadiga dos componentes, à redução da vida útil das brocas, a mudanças inesperadas na inclinação e direção do poço e, eventualmente à destruição dos componentes do sistema.

Dareing et al. [4], empregando a teoria da elasticidade linear, estudaram as vibrações axiais e torsionais em colunas de perfuração rotativas usando métodos analíticos. Nesse trabalho supõe-se que o movimento axial da broca é uma função de seu deslocamento angular.

Jansen [18], usando parâmetros concentrados, derivou um modelo com 2-DOF para uma coluna de perfuração. O modelo massa-mola empregado é obtido a partir de uma formulação de dinâmica de rotores. Esse modelo representa o primeiro modo de vibração de uma parte do comando, suportado por estabilizadores nas extremidades, e foi utilizado para estudar a estabilidade dele mesmo. O modelo empregado ignora o acoplamento entre as vibrações de flexão e de torção.

Dunayevsky et al. [21] empregam a equação da coluna-viga para calcular os parâmetros modais da coluna de perfuração com o intuito de estabelecer os estados de alta severidade e instabilidade paramétrica. Porém, a resposta no tempo não foi investigada e não foi levado em conta o efeito giroscópico. A investigação foi centrada na modelagem das vibrações da coluna baseada em ressonância paramétrica de uma viga uniforme suportada nos extremos.

Também, Dunayevsky et al. [32] apresentaram o estudo de estabilidade da coluna, usando um modelo de parâmetros concentrados, levando em conta o acoplamento das vibrações axiais e torsionais na broca de perfuração.

Yigit et al. [26, 33, 43] apresentaram o modelo dinâmico da coluna de perfuração rotativa baseados na formulação Lagrangeana; um dos trabalhos leva em conta o acoplamento axial e lateral, o outro considera o acoplamento torsional e lateral e o último considera o acoplamento das vibrações axial, lateral e torsional e propõe uma estratégia de controle ativo para o fenômeno *stick-slip* gerado pelas vibrações torsionais.

Na década passada, Tucker e Wang [36] retomaram o contínuo de Cosserat para estudar as propriedades dinâmicas dos componentes ativos de um modelo integrado da coluna de perfuração; eles consideram a coluna de perfuração como uma curva elástica espacial e propoẽm um modelo analítico baseado na teoria unidimensional do contínuo de Cosserat. No modelo proposto, o BHA é considerado como uma massa concentrada com inércia de rotação, solidária à parte final da coluna de perfuração vertical.

Embora exista uma extensa literatura orientada à análise da dinâmica das colunas de perfuração e BHA, só recentemente elas estão sendo tratadas como um sistema integrado [36]. Da mesma forma, percebe-se que muitos dos estudos realizados são orientados à modelagem de partes do BHA [25, 54].

1.4
Objetivos do Trabalho

Como um avanço na análise dinâmica de colunas de perfuração, neste trabalho é desenvolvido o elemento de Cosserat e apresenta-se a modelagem, usando elementos finitos, de um sistema de perfuração curvo. Na modelagem são consideradas os tubos de perfuração e o BHA como sistemas contínuos discretizados pelo método dos elementos finitos. Adicionalmente ao efeito giroscópico e ao acoplamento axial, lateral e torsional, o modelo leva em conta o impacto da coluna com a parede do poço.

A teoria usada para investigar a dinâmica de uma viga elástica rotativa, que sofre pequenas deformações, é a teoria de Cosserat unidimensional, desenvolvida por Antman [23], e que a partir de agora será denominada a viga de Cosserat. O uso da viga de Cosserat é ilustrado no estudo da dinâmica de uma coluna de perfuração curva.

1.5
Organização do Trabalho

No capítulo 2 é desenvolvida a análise estática da viga de Cosserat. Resolvendo a equação do equilíbrio estático, obtêm-se as funções de deslocamento da viga. Essas funções de deslocamento são função dos deslocamentos e das rotações nodais da viga.

No capítulo 3 é descrita a equação do movimento de um viga rotativa. Usando as funções de deslocamento obtidas da análise estática e empregando o princípio de Hamilton, desenvolve-se a equação de movimento da viga no espaço. Essa equação leva em conta as não linearidades geométricas e também considera forças distribuídas, de impacto e de desbalanceamento.

No capítulo 4 são discutidos vários exemplos numéricos e experimentais. Os exemplos simples são para verificar se o código, desenvolvido em Matlab, fornece resultados confiáveis. Um modelo interessante a ser mencionado é aquele da viga rotativa curva, no qual são mostrados resultados numéricos e experimentais.

No capítulo 5 estuda-se exclusivamente a dinâmica de uma coluna de perfuração curva simplificada. A geometria dessa coluna foi definida com a ajuda do Eng. João Carlos Ribeiro Plácido do CENPES-PETROBRAS. Nesse capítulo são mostrados resultados numéricos de deslocamentos e rotações de diferentes pontos da coluna.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho. Também, discorre-se sobre as dificuldades encontradas no desenvolvimento da tese e sobre os trabalhos futuros, com ênfase na aplicação da teoria de Cosserat unidimensional.