Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado – Doutorado

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA COLUNA DE HASTE DE BOMBEIO MECÂNICO DE POÇOS DE PETRÓLEO

por

Adelaide Costa de Mélo

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

João Pessoa, Paraíba **Janeiro, 2019**

ADELAIDE COSTA DE MÉLO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICODE UMA COLUNA DE HASTE DE BOMBEIO MECÂNICO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

João Pessoa, Paraíba **Janeiro, 2019**

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M528a Melo, Adelaide Costa de.
Análise do comportamento dinâmico de uma coluna de haste de bombeio mecânico de poços de petróleo / Adelaide Costa de Melo. – João Pessoa, 2019.
77 f. : il.

Orientação: Marcelo Cavalcanti Rodrigues.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT.

1. Hastes de Bombeio. 2. Pêndulos múltiplos. 3. Falhas. I. Rodrigues, Marcelo Cavalcanti. II. Título.

UFPB/BC

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA COLUNA DE HASTE DE BOMBEIO MECÂNICO DE POÇOS DE PETROLEO

por

ADELAIDE COSTA DE MÉLO

Dissertação aprovada em 30 de janeiro de 2019

Prof. Dr. MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES
Orientador – UFPB

Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Examinador Interno - UFPB

Prof. Dr. KOJE DANIEL VASCONCELOS MISHINA
Examinador Externo – UFPB

João Pessoa - PB *2019*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha filha e meu esposo que me motivaram no dia a dia para essa jornada.
A minha família pelo apoio, especialmente aos meus pais, professores da minha vida.
Agradeço ao meu orientador Professor. Dr. Marcelo Cavalcanti pelo apoio e conhecimento depositados nesse trabalho.
Ao laboratório de Integridade e Inspeção da Universidade Federal da Paraíba e toda sua equipe, entre eles Heitor, Pedro e Gilsivan que colaboraram no experimento e na simulação desenvolvida.
E por fim agradeço a Deus por todas as conquistas.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA COLUNA DE HASTE DE BOMBEIO MECÂNICO DE POÇOS DE PETRÓLEO

RESUMO

Foi observado que as hastes de bombeio, componentes mecânicos utilizados no método de elevação artificial por bombeio mecânico de petróleo estão sujeitas a grandes esforços cíclicos e têm sofrido falhas que levaram às sucessivas rupturas causando danos físicos e financeiros a empresa produtora. Determinar e analisar essas causas são importantes para evitar futuras quebras de hastes. Uma forma seria utilizar uma analogia com pêndulos múltiplos para modelar os deslocamentos transversais no sistema e encontrar as hastes mais suscetíveis a falha. Os deslocamentos transversais podem ocasionar batidas/choques da coluna de hastes com a parede interna da tubulação de produção, essas batidas podem ocasionar danos a coluna de hastes prejudicando o funcionamento do sistema, e consequentemente paradas de produção e aumento de intervenção nos poços. Neste trabalho de dissertação, procura-se através de um experimento (analogia com pêndulos múltiplos), no qual utiliza-se uma corrente de bicicleta que simula a dinâmica da coluna de hastes através do movimento vertical de bombeio, obter os deslocamentos transversais para comparação com uma análise numérica. Os resultados experimentais e numéricos mostram a região da haste em relação à profundidade do poço com maiores deslocamentos transversal. No trabalho realizam-se duas simulações, uma de uma coluna de haste de um poço de petróleo e outra do experimento com a corrente de bicicleta e mostra-se que é possível simular o comportamento dinâmico de uma coluna de haste em poço petróleo por bombeio mecânico.

Palavras chaves: - Hastes de Bombeio, pêndulos múltiplos, falhas.

DYNAMICAL BEHAVIOR ANALYSIS OF A SUCKER ROD PUMPED VERTICAL PETROLEUM WELLS

ABSTRACT

It was observed that the sucker rods pumping, mechanical components used in the method of artificial lift by mechanical pump of petroleum are subject to great cyclical efforts and they have suffered failures that have led to successive ruptures causing physical damage to the production company. Determining and analyzing these causes are important to avoid future rod breaks. One way is to use an analogy with the dynamic of multiple pendulums to model the transverse displacements in the system and find the rods most susceptible to failure. The transverse displacements can cause beating/shocks of the rod string with the inner wall of the production tubing, these beats can cause damage to the rod column, damaging the system operation, and consequently the production stops and increase intervention in the wells. In this dissertation, looking through an experiment (analogy with multiple pendulums) where a bicycle chain is used to simulate the dynamics of the sucker rod's string through the vertical movement of the pump, obtaining the transverse displacements to compare numerical analysis. Numerical and experimental results shows the rod's region in relation to the well's length with majors displacements. In the work two simulations are carried out, one of a sucker rod's string in petroleum well and another one experiment with bicycle chain and shows that is possible simulate dynamical behavior of a sucker rod pumped vertical petroleum wells.

Key-words: Sucker rods, multiple pendulums, failures.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I 13

1. INTRODUÇÃO 13

1.1 Motivação e Justificativa 17

CAPÍTULO II 21

2. SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO E OUTROS MÉTODOS DE ELEVAÇÃO 21

2.1 Introdução 21

2.2 Sistema de Elevação 21

2.2.1 Sistemas de Elevação Artificial 21

2.2.2 Gás *Lift* Contínuo e Intermitente 22

2.2.3 Bombeio Centrífugo Submerso 23

2.2.4 Bombeio por cavidades Progressivas 24

2.2.5 Bombeio mecânico 25

2.3 Hastes de bombeio 28

2.3.1 Cargas Verdadeiras e efetivas 32

2.3.2 Flambagem em Hastes de Bombeio 34

2.4 Torque e Força da Unidade de Bombeio 35

2.4.1 Torque na Unidade de Bombeio 36

2.4.2 Condições de funcionamento 38

CAPÍTULO III 39

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 39

3.1 Introdução 39

3.2 Equipamentos 39

3.2.1 Servomotor 39

3.2.2 Arduino 40

3.2.3 Corrente de Bicicleta 40
3.2.4 Outros equipamentos 41
3.3 Realização do procedimento 41
CAPÍTULO IV 45
4. ANÁLISE NUMÉRICA 45
4.1 Introdução 45
4.2 Análise numérica 45
4.2.1 Cálculo das componentes horizontais e verticais da força 46
4.3 Análise numérica do procedimento experimental 49
CAPÍTULO V 51
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 51
5.1 Introdução 51
5.2 Resultados do procedimento experimental 51
5.3 Resultados da análise numérica 54
5.3.1 Resultados da análise numérica do experimento 58
CAPÍTULO VI 62
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64
ANEXOS 66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do método de elementos finitos 15
Figura 2 - Coluna de produção em forma helicoidal devido a flambagem no teste de poço na simulação 15
Figura 3 - Modelo mecânico da dinâmica do sistema de bombeio mecânico 16
Figura 4 – Modelo mecânico das hastes. 16
Figura 5 - Poço equipado com gás *lift* 22
Figura 6 - Poço equipado com BCS. 24
Figura 7 – Poço equipado com BCP 25
Figura 8 – Sistema de Bombeio Mecânico. Fonte: Tacaks (2003) 26
Figura 9 – Imagem da extremidade da haste de bombeio API da TENARIS® 28
Figura 10 – Detalhe construtivo da extremidade da haste pela norma API 29
Figura 11 – Desenho em corte de uma luva para conectar hastes pela API 31
Figura 12 – Luva com haste conectada da TENARIS ® 31
Figura 13 – Dados geométricos da Unidade de Bombeio convencional 35
Figura 14 – Servomotor MGR996R 39
Figura 15 – Arduíno Uno R3 40
Figura 16 – Seção da corrente de Bicicleta com marcador 41
Figura 17 – Esquema do procedimento experimental 42
Figura 18 – Procedimento experimental montado 43
Figura 19 – Esquema do método de elementos finitos 45
Figura 20 – Componentes da força na cabeça da viga 46
Figura 21 – Display do LABVIEW 51
Figura 22 – Valores da coordenada X de cada ponto 52
Figura 23 – Deslocamento em milímetros dos quatros elos escolhidos. 53
Figura 24 – Resultado na análise transiente 55
Figura 25 – Deslocamento em X do ponto 1 56
Figura 26 – Deslocamento em X do ponto 2 56

Figura 27 – Deslocamento em X do ponto 3 57
Figura 28 – Deslocamento em X do ponto 4 58
Figura 29 – Deslocamento em X do ponto 1 na simulação e no experimental 59
Figura 30 – Deslocamento em X do ponto 2 na simulação e no experimental 60
Figura 31 – Deslocamento em X do ponto 3 na simulação e no experimental 60
Figura 32 – Deslocamento em X do ponto 4 na simulação e no experimental 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores calculados de dados das hastes em relação aos diâmetros de hastes disponíveis 30
Tabela 2 – Valores calculados de Fator de Torque e Força para UB C-228-213-86 48
Tabela 3 – Valores calculados de Força pelo torque do servomotor 49

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área da seção transversa corrigida da haste
A_r	Área da seção transversal da haste
API	*American Petroleum Institute*
BM	Bombeio Mecânico
BCP	Bombeio por Cavidade Progressiva
BCS	Bombeio Centrífugo Submerso
F_{eff}	Carga efetiva
F_{true}	Carga verdadeira
LOC	Modelo Localizador
GLC	Gás *lift* contínuo
GLI	Gás *lift* Intermitente
IP	Índice de Produtividade
w_r	Média do peso da haste no ar
E_r	Constante elástica da haste
p	Pressão hidrostática
F_0	Carga do fluido no pistão
WHP	Pressão na cabeça de poço
$SpGr$	Gravidade específica do fluído produzido
L_{dyn}	Nível do líquido dinâmico no anular

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O segmento de Petróleo e gás é um dos mais disputados devido a sua alta lucratividade, diante da alta concorrência as empresas têm investido cada vez mais em pesquisas para redução de custo e otimização dos processos. E esses estudos são realizados em todas as áreas do sistema: *upstream* (exploração, perfuração e produção), *midstream* (refinamento) e *downstream* (logística da distribuição e transporte até os locais de consumo), de modo a melhorar a eficiência global das operações industriais petrolíferas.

O ramo de exploração e produção de petróleo é um setor bastante oneroso, muitas pesquisas vêm sendo realizadas para reduzir os custos com manutenção nos processos operacionais, principalmente em campos antigos que os componentes mecânicos estão mais sujeitos a falha e/ou danos devido à ação do tempo e são bacias com declínio natural de produção, a redução de custo com falhas possibilitam o desenvolvimento da produção dessas regiões e a continuidade de suas operações. Essas falhas geram além do prejuízo financeiro devido à parada da produção de petróleo e dos custos com intervenções, acidentes no ambiente, nas instalações e na vida. O conhecimento das possíveis falhas é fundamental para o não comprometimento do projeto.

As falhas em hastes de bombeio mecânico trazem danos físicos e financeiros as indústrias de petróleo, pois além do prejuízo financeiro na intervenção e substituição do equipamento há uma perda de produção, para os poços de bombeio mecânico se a falha ocorre abaixo da superfície ela é imperceptível e em alguns casos demoram-se dias para ser detectada.

Diversos estudos foram realizados para análise e identificação das falhas em componentes mecânicos do sistema petrolífero, os estudos seguintes relacionam as falhas e o contato entre a coluna de hastes e coluna de produção e as conseqüências dessas falhas que serviram como base para o desenvolvimento desse trabalho.

No trabalho realizado por Rodrigues (2007) foi realizada a análise da integridade estrutural de uma coluna de hastes de bombeio por cavidade progressiva, através da análise modal e elementos finitos, o autor fez uma analogia do comportamento do conjunto do

poço com o movimento de pêndulos múltiplos e os resultados mostram a construção do modelo o Localizador (LOC) proposto na tese que encontra a falha ao longo do comprimento do sistema de forma satisfatória reduzindo tempo e custo com intervenções para substituições de hastes.

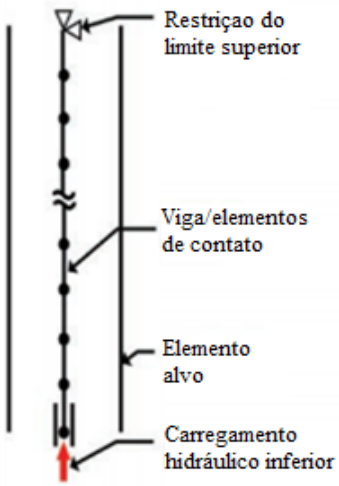
Em 2008 foi desenvolvida análise harmônica de pêndulos simples para estudo da dinâmica de uma coluna de hastes de bombeio BCP, que o autor realizou uma analogia entre os deslocamentos transversais da haste e a dinâmica de pêndulos múltiplos, identificando a influência da frequência de oscilação de acordo com a variação do ângulo de deslocamento da coluna. (RODRIGUES, 2008)

Estudos no trabalho de Duan *et al* (2013) demonstraram o mecanismo de falha nos acoplamentos das hastes de bombeio, as falhas ocorrem constantemente em campos de petróleo ao redor do mundo. Os autores realizam análises micro-morfológicas, microdureza, microestrutura, e composição química de amostras de acoplamentos das hastes de poços da Califórnia. Os resultados apontam que os danos são causados inicialmente por abrasão devido ao contato da coluna de hastes e a parede da tubulação. A abrasão acelera o processo de corrosão no equipamento ocasionando danos na estrutura.

Falhas por fadiga em hastes de bombeio foram estudadas por Zhou (2014) baseada na mecânica de danos, as falhas por fadiga são resultantes do carregamento cíclico alternativo do bombeio mecânico, a teoria da mecânica de danos é aplicada ao dano de fadiga da haste de bombeio, estabelecida pela equação da evolução do dano da haste, e o método de elementos finitos da mecânica do dano é adotado para resolver a falha por fadiga. O estudo contribui para uma nova teoria para prever o ciclo de vida da haste.

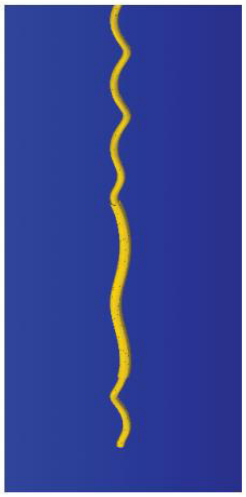
Em 2014 (Revista ANSYS) utilizaram novos modelos de simulação com elementos finitos (*BEAM188*) onde colunas de produção com *packer* em operação de testes em poços sofrem flambagem helicoidal devido aos esforços do processo no topo da coluna e no final pelo *packer* conforme figura 1 e 2, o *BEAM188 element* tem seis graus de liberdade em cada nó é baseado na teoria de deformação de cisalhamento (*shear*) de primeira ordem, o novo método permite prever com mais precisão o comportamento antes e após a flambagem, para garantir a segurança da operação. “A simulação precisa melhora a confiabilidade e garante a implantação econômica de colunas de tubulação em poços de petróleo” afirma Jim Filas.

Figura 1 - Desenho esquemático do método de elementos finitos



Fonte: Filas J. (2014) adaptada pelo autor.

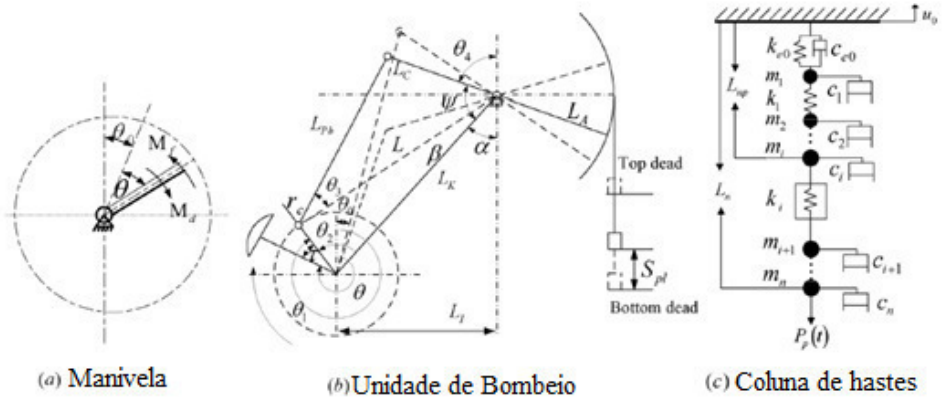
Figura 2 - Coluna de produção em forma helicoidal devido a flambagem no teste de poço na simulação



Fonte: Filas J. (2014) adaptada pelo autor

Um estudo em 2016 por XING apresentou a resposta da análise de vibração longitudinal de uma haste de bombeio mecânico considerando a flambagem da haste, no trabalho, a dinâmica das hastes de bombeio é simplificada para um sistema massa-mola amortecido, considerando o efeito da rigidez equivalente instantânea, mostrada na figura 3, e depois é encontrada a solução analítica, em que a rigidez equivalente na seção de flambagem helicoidal segue uma distribuição exponencial. E por fim comparou as características da frequência de ressonância para diferentes materiais de hastes.

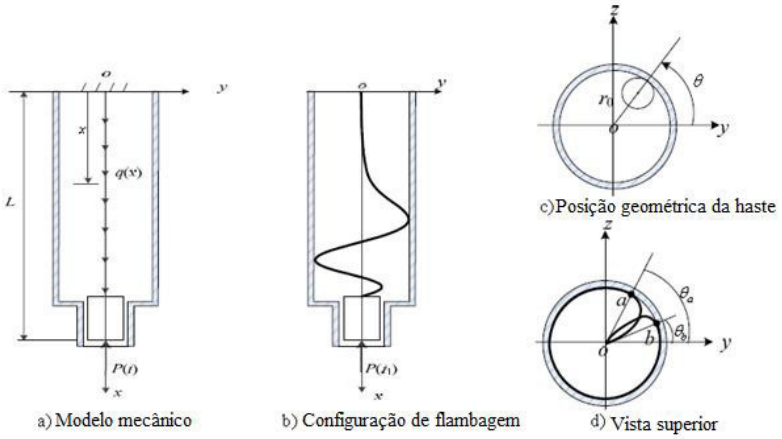
Figura 3 - Modelo mecânico da dinâmica do sistema de bombeio mecânico



Fonte: Xing (2016) adaptada pelo autor

Xiurong (2018) desenvolveu um novo método de análise dinâmica da vibração transversal coluna de haste de bombeio mecânico abaixo do espaço de deformação por flambagem em hastes que sofrem desgastes excêntricos. No modelo mecânico na figura 4, o autor utiliza o método de elementos finitos para discretizar a profundidade do poço e considera a colisão após a flambagem da haste. Os resultados mostram que a colisão entre a haste e o tubo ocorre no curso descendente após a flambagem da coluna de hastes e a força de colisão é distribuída gradualmente ao longo da coluna da cabeça do poço até o fundo. A colisão ocorre com maior frequência e maior força abaixo do ponto neutro e no curso descendente. O trabalho contribui para otimização da localização de centralizadores.

Figura 4 – Modelo mecânico das hastes.



Fonte: Xiurong (2018) adaptada pelo autor**.**

Poços na Indonésia que possuem óleo com alta viscosidade tinham frequentemente problemas por danos na coluna de hastes de bombeio, no estudo de Firtrianti (2018) que analisou o funcionamento de 41 poços e concluiu que 37 desses poços funcionavam com pancada de fluido, encontro do pistão com a superfície do fluido no fundo do poço no curso descendente. A pancada de fluido contribui para flambagem da haste e contato entre coluna e tubulação. O trabalho analisa as cargas na coluna de hastes dos poços e as sugestões na alteração dos parâmetros de cada poço, como tamanho da bomba, velocidade e curso de bombeio, para evitar a pancada de fluido e falhas na coluna de hastes.

A análise da integridade estrutural dos componentes mecânicos é necessária para evitar futuras falhas e tornar o sistema seguro e eficiente, a empresa é responsável na previsão dessas falhas e há normas rígidas que regulamentam as metodologias utilizadas nas análises.

As falhas por contato entre a coluna de hastes e coluna de produção estão presentes nos sistemas de elevação dos poços de petróleo terrestres ao redor do mundo, e na bacia Potiguar, localizada no Rio Grande do Norte, observou-se uma elevada frequência em falhas por hastes partidas que poderiam ser originadas pelo contato entre as duas colunas. A alta frequência de falhas e as falhas por contato das colunas nos estudos apresentados nos motivou a estudar e analisar a dinâmica e mecânica do sistema de bombeio para analisar e identificar a falha nessas estruturas.

1.1 Motivação e Justificativa

Após a ocorrência de falhas em hastes de bombeio em alguns campos de Petróleo na bacia do Rio Grande do Norte, Bacia Potiguar, que tem como característica ser um campo com óleo viscoso e profundidade em torno de 1000 metros, foi selecionado um poço que em um ano ocorreram duas falhas em hastes utilizadas em método de elevação por bombeio mecânico e nas duas ocasiões as hastes partiram, aumentando os custos com intervenções e parada de produção da empresa.

Os deslocamentos transversais das hastes de bombeio ocasionam batidas internas na coluna de produção, essas batidas levam a falhas superficiais ou até ruptura da haste de bombeio. O contato entre a coluna de hastes e a tubulação de produção gera pontos de concentração de tensão, esses pontos podem originar diversas falhas, como abrasão,

corrosão, falha por fadiga. As falhas prejudicam a produção, ocasionam paradas e aumento no número de intervenções em poços.

Os deslocamentos ocorrem devido a haste ser extremamente delgada, além de possuir um comportamento elástico elas se conectam uma a outra como um pêndulo múltiplo em série, além disso, fatores externos como atrito contribuem para a flambagem da haste que também possibilita o contato entre a coluna de hastes e a parede da coluna de produção.

As falhas por fadiga são progressivas e ocorrem devido ao ponto de concentração de tensão originado por corrosão, por danos superficiais, desacoplamento das conexões das hastes, entre outros. As falhas nas hastes podem ter início na colisão entre a coluna e a haste, esse contato pode gerar pontos de concentração de tensão, abrasão na superfície, desenvolvendo corrosão e consequentemente a quebra da haste. Como no trabalho de DUAN (2014) que estudou o mecanismo de falha nos acoplamentos da haste e concluiu que elas ocorriam devido a abrasão na superfície seguida de corrosão do acoplamento das hastes, proveniente do contato entre a coluna e a tubulação de produção.

No campo do Rio Grande Norte as falhas por haste partida representam 1,15% das falhas que ocorrem na haste, como abrasão, ruptura, desacoplamento, entre outras. Em uma das regiões, denominada Serraria, essa falha por haste partida representa 15% das falhas que ocorrem anualmente. Em virtude da alta frequência de falha por haste partida nessa região, foi analisado um poço em que a haste havia partido duas vezes em um ano, na análise estudamos as cargas na haste e os esforços da unidade de bombeio, para encontrar a possível causa da falha por haste partida.

Considerando a alta frequência de falhas por ruptura da haste nessa região e o possível contato entre a coluna de hastes e a tubulação de produção causado pelo deslocamento transversal da coluna, realizamos um estudo nesse trabalho para verificar se existe contato entre as duas colunas, de hastes e de produção que podem causar falhas no equipamento.

Por isso neste trabalho objetivamos encontrar os possíveis locais de concentração de tensão devido ao impacto da coluna de hastes na tubulação de produção, que podem originar diversas falhas na haste e tubulação como abrasão das superfícies, corrosão, vazamento e quebra da haste.

Com o objetivo de analisar se as falhas por haste partida podiam ser originadas do contato entre as hastes e a parede interna da tubulação de produção, foi estudada a

dinâmica das hastes e os movimentos transversais da coluna de hastes que ocorrem no interior da tubulação, a análise foi feita pela analogia entre os pêndulos múltiplos em série e as hastes de bombeio, onde cada pêndulo representa uma haste. A analogia foi realizada por um experimento, o experimento consiste de uma corrente de bicicleta posicionada verticalmente e cada elo da bicicleta representa uma haste de bombeio. A corrente é movimentada por um servomotor verticalmente com um mecanismo semelhante ao movimento alternado do bombeio mecânico. No movimento é possível observar o movimento lateral de cada elo e encontrar os seus deslocamentos em tempo real. Com base nos deslocamentos é possível saber se há falhas por contato entre as hastes e a parede da tubulação e em que região da coluna elas possuem maior probabilidade de acontecer.

Estudos demonstram as ocorrências de falhas como conseqüência da colisão entre a coluna de hastes e a coluna de produção devido os deslocamentos transversais da estrutura, mas ainda não havia um estudo para relacionar as regiões mais suscetíveis a falhas para posteriormente identificá-las e evitá-las. No trabalho a analogia com pêndulos múltiplos contribui para encontrar os pontos mais suscetíveis.

Com o experimento é possível analisar se as falhas por hastes partidas podem ter ocorrido pelo contato da coluna de hastes com a parede da tubulação, para identificar os pontos sujeitos a concentração de tensão e evitar as futuras falhas.

1.2 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo analisar a possibilidade de ocorrências de falha originadas por contato entre a coluna de hastes e a tubulação de produção em poços produtores de petróleo da bacia potiguar através da análise da dinâmica de uma haste de bombeio mecânico por analogia ao movimento de pêndulos múltiplos,

1.3 Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento e interpretação dos resultados deste trabalho, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

a) Identificar os esforços dinâmicos sofridos pela coluna de haste de bombeio mecânico;

b) Elaboração de teste experimental de um sistema análogo ao movimento da haste de bombeio;

c) Realizar simulação numérica da dinâmica das hastes de bombeio mecânico semelhante ao experimento;

d) Correlacionar resultados obtidos no teste experimental com os resultados obtidos na simulação numérica.

CAPÍTULO II

2. SISTEMAS DE BOMBEIO MECÂNICO E OUTROS MÉTODOS DE ELEVAÇÃO

2.1 Introdução

Nesse capítulo abordaremos a utilização dos sistemas artificiais de elevação de petróleo, aprofundaremos o estudo para bombeio mecânico, e os esforços presentes nas hastes de bombeio, a analogia do movimento da haste com pêndulos múltiplos, o modelo mecânico utilizado na analogia, os resultados encontrados na análise e as considerações finais.

2.2 Sistema de Elevação

Há dois tipos de elevação do fluido no reservatório até a superfície: o natural e o artificial. Na elevação natural é necessário que pressão do reservatório seja elevada o suficiente para deslocar o fluido até a superfície, os poços com esse método são denominados poços surgentes. Na elevação artificial a pressão do reservatório não é alta o suficiente para os fluidos alcançarem a superfície necessitando de um sistema artificial para aumentar o diferencial de pressão sobre o reservatório. Com o passar do tempo os poços surgentes tem um declínio de vazão e passam a utilizar dos meios artificiais para elevar o óleo. (THOMAS, 2004)

2.2.1 Sistemas de Elevação Artificial

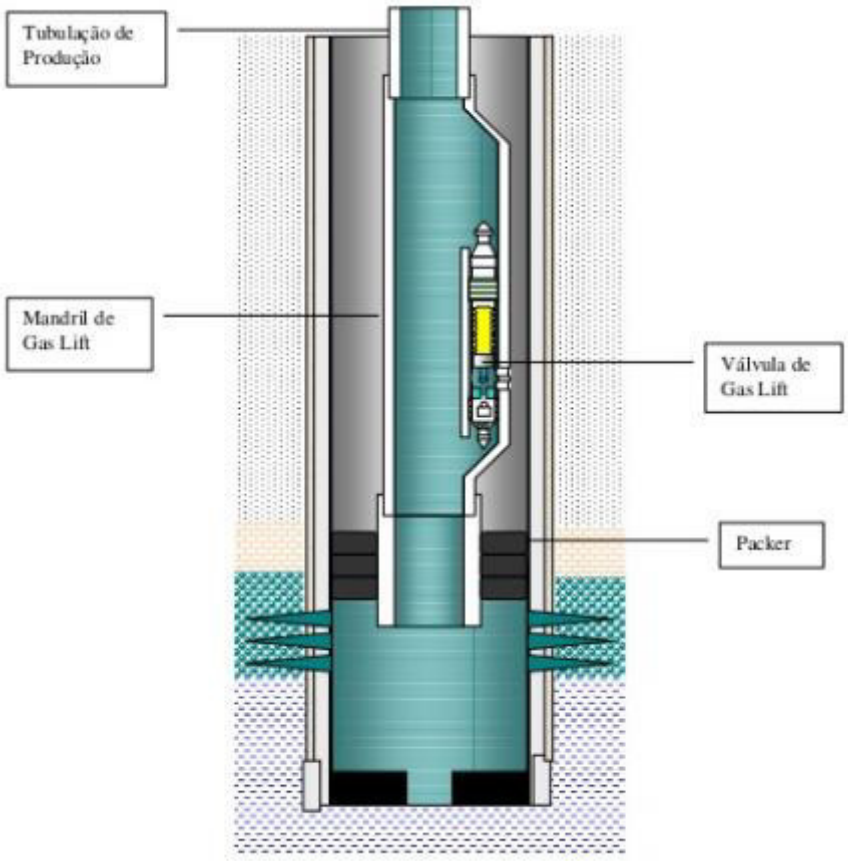
Os métodos de elevação mais utilizados na indústria de Petróleo são *Gás lift,* Bombeamento centrífugo submerso, Bombeamento por cavidade progressiva e Bombeamento mecânico. A escolha do método mais adequado está relacionada ao estudo da capacidade atual e futura do reservatório e vai depender de fatores como viscosidade do fluido, profundidade do poço, número de poços, produção de areia, razão gás-óleo, condições de operação, segurança e custos. Cada método possui vantagens e desvantagens e o dimensionamento inadequado acarreta em perda na produção e problemas operacionais e financeiros. (THOMAS, 2004)

2.2.2 Gás *Lift* Contínuo e Intermitente

Consiste em utilizar a energia de um gás comprimido para reduzir a densidade do fluido para elevar até o fluido até a superfície. “É um método muito versátil em termos de vazão (1 a 1700 m³/d), de profundidade (até 2600 metros, dependendo da pressão do gás de injeção), e é propício para poços que produzem fluidos com alto teor de areia, elevada razão gás-líquido, além de exigir investimentos relativamente baixos para poços profundos”. (THOMAS, 2004).

A figura 5 mostra o funcionamento do sistema no fundo do poço.

Figura 5 - Poço equipado com gás *lift*



Fonte: Costa (2008)

Segundo TAKÁCS (2003) o método de injeção de *gás lift* pode ser contínuo ou intermitente:

No *gás lift* contínuo (GLC) a injeção ocorre de forma contínua, gaseificando a coluna de fluido, diminuindo sua densidade e reduzindo a pressão de fluxo no fundo, assim

a pressão no reservatório é suficiente para elevar o fluido até a superfície e consequentemente ocorre um aumento de vazão. Utiliza-se um regulador de fluxo, ou *choque* na superfície para que a injeção ocorra de forma contínua e controlada.

No *gás lift* intermitente (GLI) a injeção do gás ocorre de forma periódica à alta pressão no deslocamento de golfadas, abaixo de uma coluna de fluidos que é deslocada até a superfície. A injeção acontece em um intervalo de tempo definido por válvula controladora.

Thomas (2004) afirma que a escolha depende de fatores como o índice de produtividade do poço (IP) e a pressão estática do reservatório. Para poços com IP e pressão estática baixos é utilizado o GLI, pois nesses casos o GLC resulta em uma menor vazão de óleo.

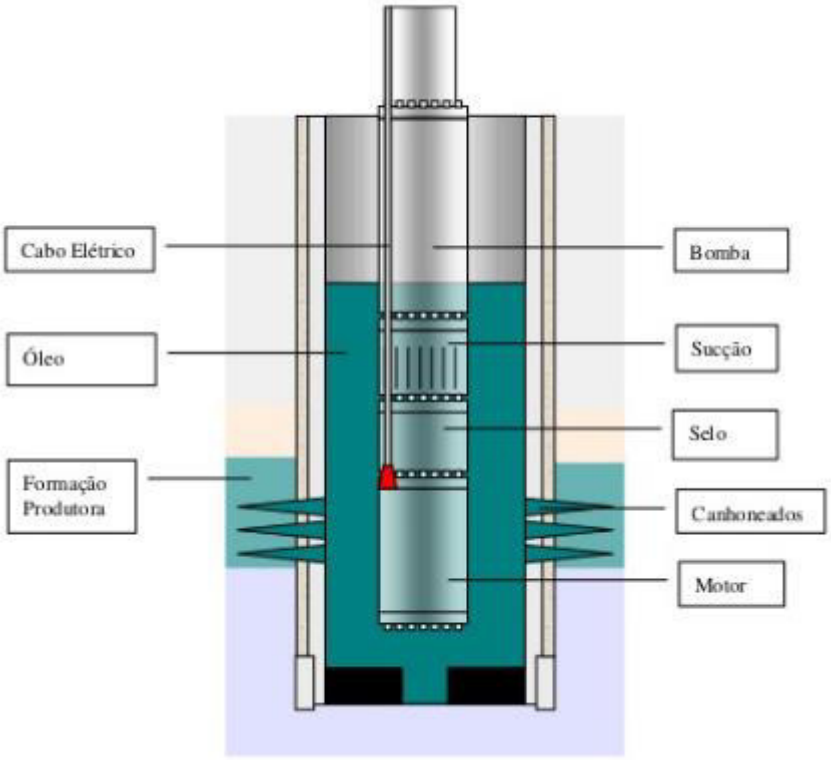
2.2.3 Bombeio Centrífugo Submerso

Para fornecer energia ao reservatório o sistema possui uma bomba centrífuga no fundo poço acionada por um motor de subsuperfície alimentado por um cabo elétrico trifásico que transmite a energia elétrica da superfície para o motor. O conjunto motor-bomba fica submerso no fluido do reservatório.

A bomba é centrífuga de múltiplos estágios onde o mecanismo de cada estágio consiste de um difusor e impulsor, o impulsor é preso a um eixo e gira a altas velocidades e o difusor redireciona o fluido para o estágio acima deslocando-o para a superfície. (THOMAS, 2004)

O sistema de BCS é composto por equipamentos de superfície e subsuperfície, na figura 6 é possível observar o mecanismo no fundo do poço.

Figura 6 - Poço equipado com BCS.

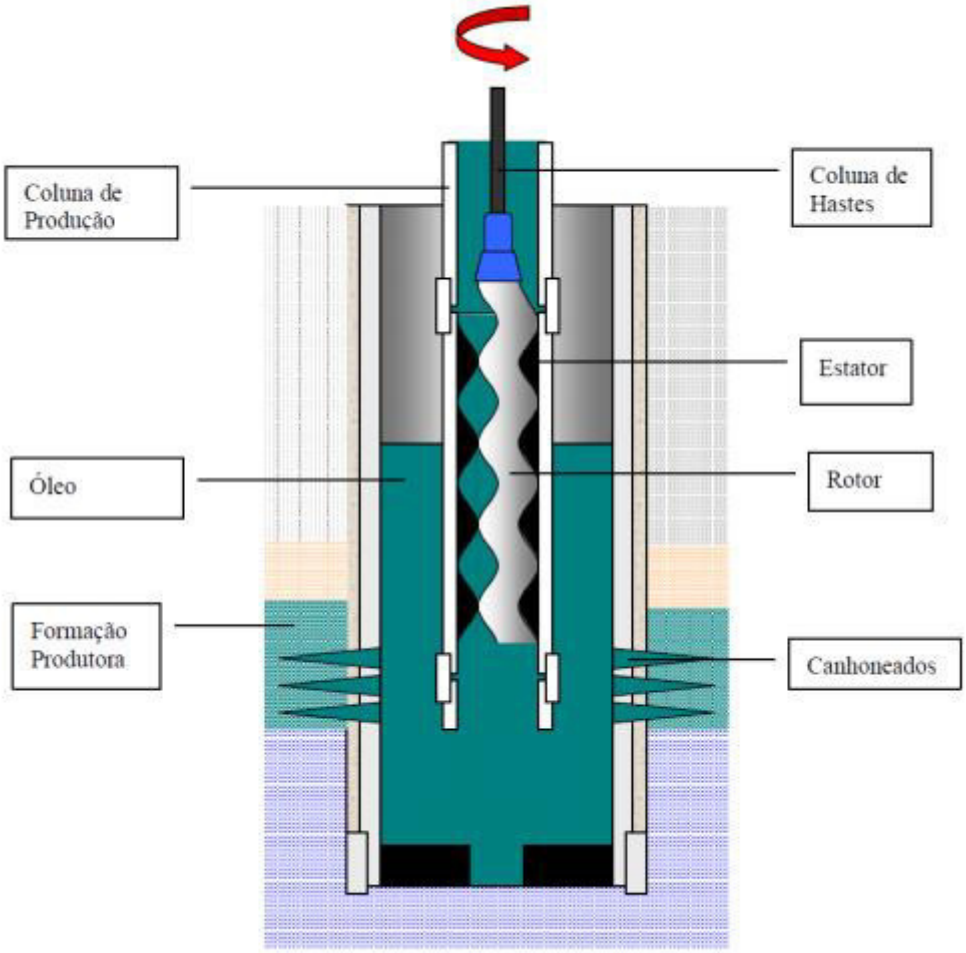


Fonte: Costa (2008)

2.2.4 Bombeio por cavidades Progressivas

Consiste em uma bomba de deslocamento positivo composta por um rotor e um estator, a elevação do fluido ocorre quando o rotor gira por dentro do estator elevando o fluido pelas cavidades existentes entre eles progressivamente. Uma coluna de hastes conecta a bomba no fundo do poço a um cabeçote na superfície. O cabeçote transmite o movimento de rotação do motor para a coluna de hastes, na figura 7 é possível observar o funcionamento no fundo do poço. (NASCIMENTO, 2005).

Figura 7 – Poço equipado com BCP



Fonte: Costa (2008)

O cabeçote além de transmitir o movimento rotativo para as hastes precisa sustentar os esforços axiais que hastes estão submetidas e realizar a vedação entre a coluna de hastes e coluna de produção através do *stuffing box*.

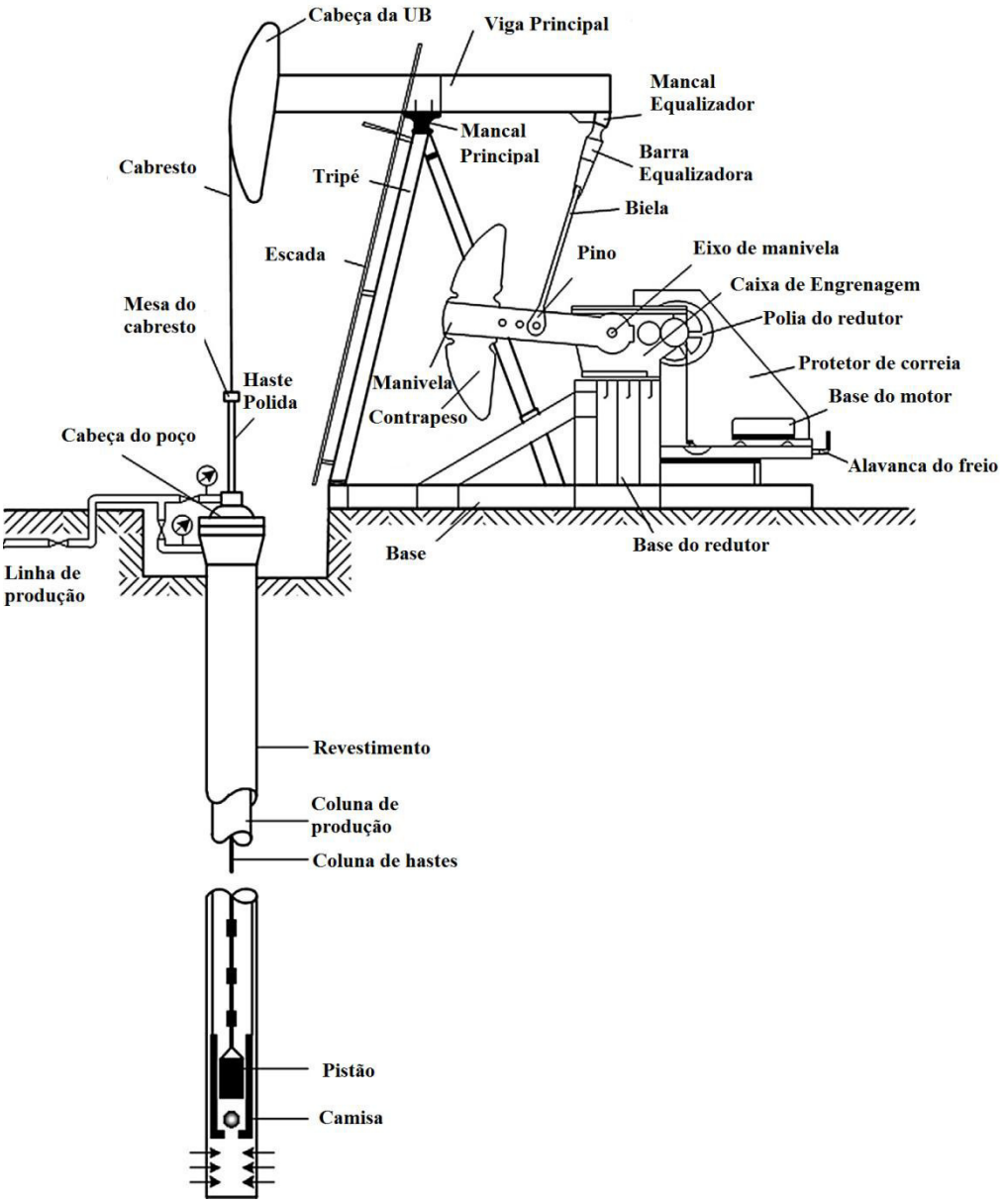
A coluna de haste está submetida a cargas axiais e torque. A carga máxima e o torque máximo ocorrem na haste polida, primeira haste, que é polida na superfície para garantir a vedação. A carga máxima é a soma do peso da coluna de hastes no fluido mais a carga atuando sobre o rotor e o torque máximo corresponde a soma do torque hidráulico e de fricção na bomba mais o torque resistente da coluna de hastes. (THOMAS, 2004)

2.2.5 Bombeio mecânico

Neste método de elevação o movimento rotativo de motor é transformado em movimento alternativo através de uma coluna de hastes que é acionada por uma unidade de

bombeio na superfície e transmite o movimento para uma bomba no fundo do poço para elevar os fluidos até a superfície.

Figura 8 – Sistema de Bombeio Mecânico. Fonte: Tacaks (2003)



Fonte: Takacs (2003) adaptado pelo autor.

O ciclo de bombeio é composto do curso ascendente e descendente. No curso ascendente, o peso do fluido que está dentro da coluna de produção mantém a válvula de passeio fechada. A baixa pressão criada na camisa da bomba abaixo do pistão e acima da válvula de pé faz com ela abra, permitindo a passagem do fluido que está no anular para o interior da bomba. Todo fluido que está acima do pistão é deslocado em direção a superfície. No curso descendente, como o pistão continua descendo, a pressão interna na

camisa da bomba aumenta devido a incompressibilidade dos fluidos. Quando a pressão interna supera a pressão acima do pistão, a válvula de passeio abre, permitindo a passagem de fluido para cima do pistão. Ao atingir o final do curso descendente e iniciar o curso ascendente, a válvula de passeio fecha e a de pé abre, iniciando um novo ciclo. (THOMAS, 2004)

A primeira haste do conjunto é denominada de haste polida devido a sua superfície externa ser polida para melhorar a vedação na cabeça do poço.

Segundo Thomas (2004), dentro da variedade de tipos de hastes existentes, podem-se citar as de aço e as de fibra de vidro. As de aço são usadas com maior frequência. Devido ao custo elevado das hastes de fibra de vidro, as mesmas são mais utilizadas quando o poço apresenta grande problema de corrosão e cargas elevadas.

Devido à alternância de esforços a coluna de hastes é um ponto crítico do sistema. A coluna de hastes está sujeita força de tração, força de empuxo, força de aceleração e força de fricção e por ser um esforço repetitivo está sujeito a falha por fadiga, ou seja, esforços combinados tração-compressão-abrasão, flexão e flambagem em ciclos repetidos, e além desses esforços mecânicos está exposta ao ambiente abrasivo e corrosivo do fluido composto por óleo e água.

Parte significativa destas falhas deve-se ao ataque de agentes corrosivos, presentes no fluido produzido, combinados com efeitos mecânicos (fadiga e erosão), que comprometem a integridade física das hastes. Esforços combinados de tração-compressão-abrasão e um ambiente corrosivo induzem a degeneração drástica do material levando-o até a ruptura. Em virtude das falhas ocorridas com as hastes de bombeio, um significativo investimento torna-se necessário para a continuidade da operação deste método de elevação artificial. (SANTOS, 2008)

O Bombeio mecânico com hastes é o método artificial mais utilizado do mundo. Pode ser utilizado para elevar vazões médias de poços rasos. Para grandes profundidades, só consegue elevar baixas vazões. (THOMAS, 2004)

As falhas associadas aos sistemas de elevação artificial podem ser atribuídas a três componentes do poço: Bomba, hastes de bombeio e tubos de produção. E qualquer uma dessas falhas representa danos sérios a empresa. Os campos em que seus poços apresentam alta frequência na ocorrência dessas falhas são campos problemáticos.

Como são falhas que ocorrem no fundo do poço não são visíveis a olho nu, porém são possíveis de serem detectadas com a simulação do comportamento mecânico e

relacionando a frequência que ocasionam batidas da haste na coluna de produção que prejudicam a estrutura é possível correlacioná-las e evitá-las. Por analogia com pêndulos pode-se realizar testes para identificar pontos sujeitos a falhas.

2.3 Hastes de bombeio

A coluna de hastes de bombeio é uma parte vital do sistema de bombeio mecânico, ela conecta a unidade de bombeio na superfície a bomba no fundo do poço, tem um comportamento de uma barra delgada, extremamente longa em relação ao diâmetro, tem um impacto fundamental na eficiência da elevação do fluido e em falhas eventuais com vazamento e perda da produção.

A coluna de hastes é composta de hastes individuais conectadas uma a outra. Antigamente as hastes eram feitas de madeira com conexões de aço. Com o alcance de poços mais profundos as hastes de aço surgiram para suportar mais cargas. As hastes de aço são barras sólidas com as extremidades forjadas, moldadas e usinadas para conectar as roscas machos e fêmeas. Há vários tipos de hastes além das sólidas: ocas ou em tubo, continuas e flexíveis. (TAKACS, 2003)

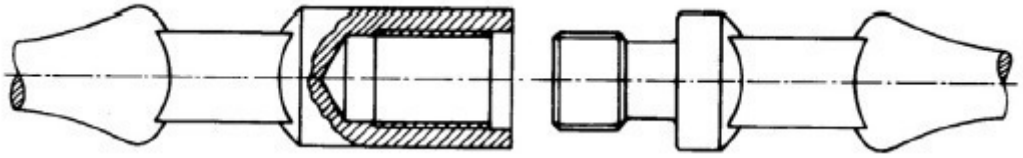
Figura 9 – Imagem da extremidade da haste de bombeio API da TENARIS®

Fonte: Tenaris® (2018)

Em uma extremidade das hastes possui uma rosca e na outra uma luva. Antes do forjamento e processo de moldagem as extremidades são aquecidas em fornos de indução e tratadas termicamente, segundo a TENARIS® (2018), após tratamento térmico para aumentar resistência são jateadas com granalha metálica e as extremidades inspecionadas em uma bancada antes da usinagem que fará a rosca.

É possível observar o detalhe da extremidade pela figura 10

Figura 10 – Detalhe construtivo da extremidade da haste pela norma API



Fonte: API (2010)

As hastes sólidas de aço são normatizadas pelos *American Petroleum Institute* API, a norma API Spec 11B diz que as hastes têm entre 25 e 30 pés de comprimento (7,62 a 9,14m), com diâmetro entre 5/8 até 1 ¼ de polegadas com incremento de 1/8 de polegadas (15,875 mm a 31,75 mm). As hastes possuem conexões forjadas a quente e são rosqueadas, as extremidades das hastes possuem conexões machos e são conectadas com acoplamentos do tipo fêmea.

Os dados físicos pela norma API são detalhados a seguir:

- Área do metal: área da seção transversal da haste $A_r = d_r^2 \pi / 4$
- Peso médio da haste no ar: Calculado adicionando 9% do diâmetro do corpo da haste devido as juntas. E usando a média da densidade do aço (487.5 lb./ft³. = 7809 Kg/m³), a média do peso da haste no ar é $w_r = 1.09x487.5A_r / 144$ e no SI $w_r = 1.09x7809A_r / 144$
- Área da seção transversal corrigida: A_c representa a média da área da seção transversal corrigida (considerando o peso das extremidades e acoplamentos) de uma seção da haste calculada para um pé de comprimento por:

$$A_c \frac{\rho}{144} = w_r \rightarrow A_c = 0{,}295 w_r \qquad (1)$$

E no SI

$$A_c \rho = w_r \rightarrow A_c = 1{,}2806 w_r \qquad (1a)$$

Onde:

A_c = Área da seção transversal corrigida da haste de bombeio, em pol² (SI m²)

w_r = Média do peso da haste no ar, lb/ft (SI kg/m)

- Constante elástica da haste, E_r (in/lb/ft), representa a tensão por polegada de um pé de comprimento para a carga de 1 lb. Definida como $E_r = 12/A_r/E$, onde $E = 3.1 \cdot 10^7$psi (213,7374 GPa) para o aço.

A tabela 1 demonstra um resumo os dados físicos da norma API pelo diâmetro da haste.

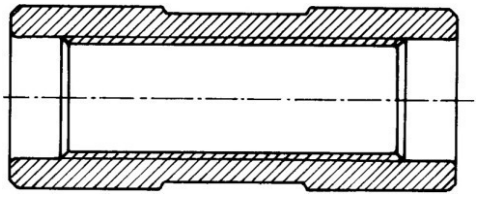
Tabela 1 Valores calculados de dados das hastes em relação aos diâmetros de hastes disponíveis

Dados físicos das hastes pela norma API				
Diâmetro da haste, in (m)	Área da seção transversal, sq in (m²)	Peso no ar, lb./ft.(kg/m)	Área corrigida, sq in (m²)	Constante elástica, in/(lb.ft.) –(mm²/Nm²)
5/8 (0,0159)	0.307 (0,000198)	1.135 (1,689)	0.335 (0,000216)	1.262 E-6 (2,8346E-07)
¾ (0,0191)	0.442 (0,000285)	1.634 (2,431)	0.482 (0,000311)	8.762 E-7 (2,8346E-07)
7/8 (0,0222)	0.601 (0,000388)	2.224 (3,309)	0.656 (0,000423)	6.437 E-7 (1,4479E-07)
1 (0,0254)	0.785 (0,000506)	2.904 (4,321)	0.857 (0,000553)	4.929 E-7 (1,1085E-07)
1 1/8 (1,1250)	0.994 (0,000641)	3.676 (5,470)	1.084 (0,000699)	3.894 E-7 (8,7548E-08)
1 ¼ (1,2500)	1.227 (0,000792)	4.538 (6,753)	1.339 (0,000864)	3.154 E-7 (7,0923E-08)

Fonte: Takacs, 2003.

A conexão das hastes é feita através de uma luva com rosca interna, as luvas normalmente têm o mesmo diâmetro nas duas extremidades, com exceção dos casos em que há alterações dos diâmetros das hastes. Pela API Spec 11B elas possuem 4 in (0,1016m) de comprimento, com exceção da haste de 1 1/8 in (0,03175m) que possui 4,5 in (0,1143m). Segue na figura 11 o desenho em corte da luva pela API e a imagem de uma luva conectada em uma haste da TENARIS® (2017) na figura 12.

Figura 11 – Desenho em corte de uma luva para conectar hastes pela API



Fonte: API (2010)

Figura 12 – Luva com haste conectada da TENARIS ®

Fonte: TENARIS ® (2018)

O peso das hastes de bombeio é distribuído no seu comprimento e cada haste deve suportar o peso de todas as hastes abaixo, isso indica que as hastes deveriam ser em forma de cone devido a isso elas são divididas em seções com diferentes diâmetros.

Uma propriedade importante na coluna de hastes é o comportamento elástico, uma força atua na coluna em dois pontos, na superfície através da haste polida e no final na bomba de subsuperfície produz uma força elástica alternada que passa pelo material da haste com a velocidade do som. Devido à complexidade muitos autores desprezam os efeitos desses carregamentos. (TAKACS, 2003)

Segundo Takacs (2003), os principais carregamentos durante um ciclo completo suportados pelas hastes em todo seu comprimento são:

Peso das hastes: Distribuída no comprimento da coluna, em qualquer seção será igual ao somatório do peso das hastes abaixo desse ponto.

Força de **Empuxo**: Oposta ao peso da haste e é igual ao volume de líquido deslocado pela imersão das hastes no óleo.

Carregamento do **fluido**: Força concentrada atuando na parte inferior da coluna de hastes apenas durante o curso ascendente. É igual à resultante da pressão hidrostática do fluido levantado, atuando no pistão da bomba.

Carregamentos **dinâmicos:** resultam do movimento acelerado do ciclo de bombeio, da dinâmica das massas (coluna de hastes e fluido). A magnitude e direção dessas forças estão em constantes mudanças durante o ciclo de bombeio, mas geralmente a sua resultante é positiva no ascendente e negativa no descendente.

Forças de **fricção:** Corresponde a fricção do fluido e fricção mecânica. A fricção do fluido está em movimento com as hastes durante o ascendente e contra as hastes no descendente. A fricção mecânica é oposta ao movimento das hastes: positiva no ascendente e negativa no descendente.

Uma análise dos esforços durante um ciclo completo mostra que a coluna de hastes está exposta a um carregamento cíclico. Apesar das hastes acima sempre estarem tensionadas, a tensão aumenta consideravelmente durante o ascendente devido aos carregamentos dinâmicos do fluido e as forças de fricção. Então as cargas na coluna de hastes são intermitentes, devido a isso as colunas precisam ser projetadas para evitar falhas por fadiga.

2.3.1 Cargas Verdadeiras e efetivas

As hastes são consideradas delgadas pela relação do diâmetro com o comprimento e as componentes mais importantes nos carregamentos da coluna de hastes são as forças gravitacionais e as forças de empuxo. As cargas são axiais e as hastes delgadas são extremamente vulneráveis a compressão. (TACAKS, 2003)

As cargas verdadeiras são as forças atuais que agem na seção da haste. Elas representam as forças atuais no material da haste e são usadas para encontrar as tensões mecânicas nas seções das hastes. As cargas efetivas são forças imaginárias que indicam a ocorrência de flambagem na coluna de hastes. Flambagem ocorre apenas quando as cargas efetivas se tornam negativas. A definição de carga efetiva é apresentada pela seguinte fórmula 2. (NICKENS, 2005)

$$F_{eff} = F_{true} + pA_c \qquad (1)$$

F_{eff} = Carga efetiva, lb.(N),

F_{true} = Carga verdadeira, lb (N).,

A_c = Área da seção transversal da haste de acordo com a profundidade, em in² (m²)

p = Pressão hidrostática na mesma profundidade em psi (Pa).

Para calcular o carregamento estático durante o curso ascendente é simples: a carga do fluido no pistão da bomba de fundo deve ser adicionada em cada componente de carga calculado previamente. A carga do fluido no pistão é calculada pelo volume de líquido elevado, representado pelo nível de líquido dinâmico, e a área do pistão, como mostrado na fórmula 3. (TACAKS, 2003)

$$F_0 = (WHP + 0.433 SpGrL_{dyn}) A_p \quad (2)$$

Para o SI

$$F_0 = (640{,}5232 \cdot WHP + 0{,}0123 \cdot SpGrL_{dyn}) A_p \quad (3a)$$

F_0 = Carga do fluido no pistão, lb., (SI N)

WHP = Pressão na cabeça de poço, psi, (SI N/m²)

$SpGr$ = Gravidade específica do fluído produzido, -,

L_{dyn} = Nível do líquido dinâmico no anular, em pés, (m)

A_c = Área da seção transversal do pistão da bomba, em in². (m²)

Segundo Takacs (2003) para a distribuição do carregamento estático é preciso considerar que:

- Os carregamentos efetivos e verdadeiros na parte superior da haste são iguais se desprezarmos a pressão na cabeça do poço com apenas pequenas diferenças para valores de pressão na cabeça de poço diferentes de zero.

- A curva da distribuição do carregamento e a mudança de carga para cada aumento na profundidade é diferente nos dois casos. Para cargas verdadeiras é igual ao peso

das hastes no ar, w_r, onde o carregamento efetivo é igual ao peso do empuxo das hastes, w_{rf} .

Essas condições são válidas para carregamentos estáticos sem atuação de forças externas. Entretanto, na prática podem ocorrer diversas forças externas na parte superior da coluna de haste e no seu comprimento e essas forças podem mudar consideravelmente os valores de cargas nos cursos ascendentes e descendentes.

As possíveis forças externas que atuam nas hastes são:

- Força de arrasto oposta ao movimento do pistão na coluna;
- Força causada pela perda de carga do fluido nas válvulas da bomba;
- Forças dinâmicas por mau funcionamento da bomba;
- Fricção do fluido com a coluna de hastes;
- Forças da inércia do fluido.

2.3.2 Flambagem em Hastes de Bombeio

A coluna de hastes de bombeio como uma coluna delgada, em que a relação entre comprimento e diâmetro é extremamente alta, é suscetível a flambagem: deflexão instável quando a coluna está sujeita a tensão de compressão acima do nível crítico. A alta tensão de deformação presente na flambagem da haste pode levar a falha imediata (quando a tensão máxima ultrapassa o limite de elasticidade do aço) e redução no ciclo de vida da coluna.

A deflexão na coluna de hastes ocasiona o contato com a parede interna da coluna de produção em vários locais, as batidas laterais entre a coluna de produção e as hastes causam problemas mecânicos severos em ambos componentes, levando a ruptura das hastes e vazamentos na coluna de produção.

Segundo NICKENS (2005) e LUBISKIN (1967) as forças externas são as principais causas para flambagem e ocorrem durante o curso descendente devido a:

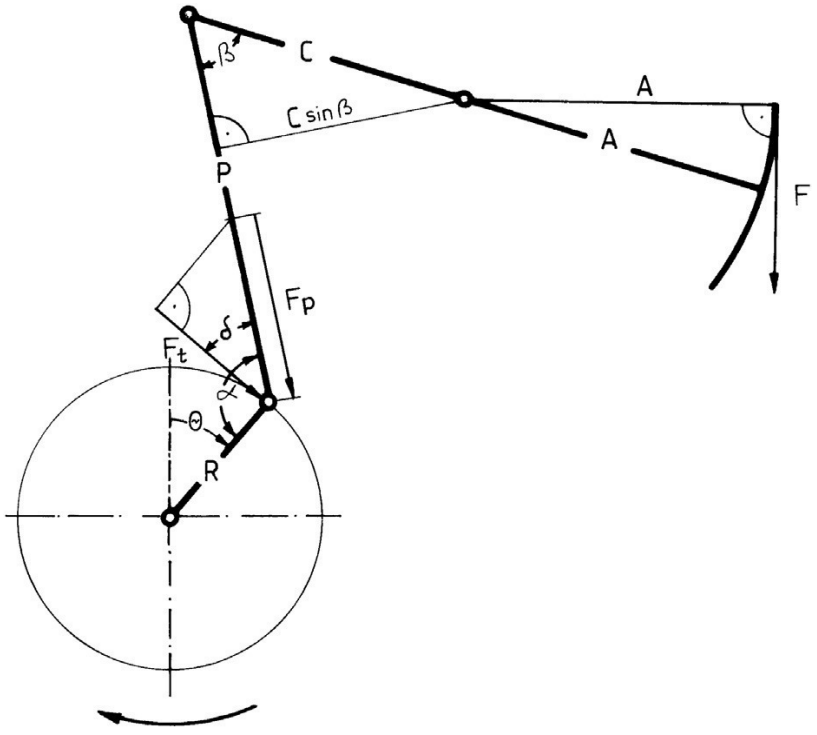
- Atrito no cilindro pistão para fluidos com baixa e média viscosidade com velocidade de bombeamento normal é geralmente desprezado, mas pode influenciar principalmente em fluidos viscosos;

- Perda de carga na válvula de passeio para altas velocidades de bombeio e quando pequenas válvulas são usadas, resultam em compressão na área do pistão que podem flambar as hastes superiores;
- Presença de pancada de fluido, quando a bomba se choca na interface entre o gás e o líquido;
- Fricções mecânicas entre a haste e coluna de produção contribuem para cargas compressivas principalmente em poços direcionais.

2.4 Torque e Força da Unidade de Bombeio

Os parâmetros cinemáticos da UB são baseados na geometria convencional representada na figura 13. (TAKACS, 2003)

Figura 13 – Dados geométricos da Unidade de Bombeio convencional



Fonte: Takacs (2003)

Onde A e C representam a viga principal, P a haste da Biela e R é o raio do braço da manivela. O torque na manivela pode ser encontrado multiplicando a F_t Forca tangencial pelo raio da manivela.

Pelo somatório dos momentos temos na viga principal que:

$$AF = CF_P sin\beta \quad (4)$$

Então a força na Biela é:

$$F_P = \frac{A}{Csin\beta}F \quad (5)$$

E a força tangencial é encontrada pelas componentes ortogonais da força na Biela escrita por:

$$F_t = F_P \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = F_P\, sin\alpha \quad (6)$$

Substituindo F_P da equação 7 expressamos o torque na manivela por:

$$T = RF_t = \frac{RA}{C}\frac{sin\alpha}{sin\beta}F \quad (7)$$

Como o torque é encontrado quando multiplicamos a força vezes distância, comprimento do braço, que pode ser definido como braço imaginário que quando multiplicado pela força na haste nos retorna o torque na manivela, esse braço imaginário é chamado de fator de torque $TF(\theta)$ e varia com o ângulo θ do eixo da manivela e baseado na equação 8, o fator de torque é:

$$TF(\theta) = \frac{RA}{C}\frac{sin\alpha}{sin\beta} \quad (8)$$

No SI

$$TF(\theta) = \frac{RA}{1000C}\frac{sin\alpha}{sin\beta} \quad (8a)$$

Onde:

$TF(\theta)$ = Fator de torque do ângulo da manivela, in (SI m)

A, C, R = Dimensões da unidade de bombeio, no anexo 3, in (SI m)

α, β= variáveis dos ângulos definidos nos apêndices da API Spec 11E, no anexo 5, em graus

2.4.1 Torque na Unidade de Bombeio

Para encontrar os parâmetros operacionais da unidade de bombeio, o torque instantâneo deve ser calculado. Há três tipos de torques na Unidade de Bombeio:

- Torque na haste: Resultado das cargas na haste polida e pode ser calculado baseado nos parâmetros cinemáticos da unidade;
- Torque no contrapeso: É necessário para mover os contrapesos, e é senoidal em relação ao ângulo
- Torque inercial representa a energia acumulada e liberada da aceleração e desaceleração de partes da unidade de bombeio. Considerado quando há variação na velocidade da manivela.

O torque líquido T_{net}é a soma algébrica de todos os componentes acima. É o torque que deve ser superado pela potência do motor que aciona a unidade.

Antigamente a energia da unidade de bombeio era fornecida por máquinas a vapor, atualmente os motores elétricos são utilizados devido ao baixo custo e maior eficiência. Geralmente são utilizados motores de indução gaiola de esquilo. A velocidade síncronado motor depende da frequência da corrente alternada e do número de pólos do estator, dada por:

$$N_{synch} = \frac{120f}{p} \quad (9)$$

N_{synch} Velocidade síncrona do motor, RPM

f Frequência, Hz

p número de pólos do estator

Um dos mais importantes procedimentos para encontrar o torque líquido após a caixa de engrenagens é a partir dos parâmetros do motor, o torque no eixo do motor é menor do que o torque líquido devido a maior velocidade do motor, pois há uma redução de velocidade devido ao conjunto das engrenagens, do redutor, da manivela e viga principal, considerando a eficiência do conjunto, podemos calcular o torque por: (TAKACS, 2003)

$$T_m(t) = \frac{T_{net}(t)}{Z_d}\frac{1}{n_{surf}} \quad (10)$$

$T_m(t)$ Torque do motor instantâneo, lb in (N·m)

Z_d Razão da redução de velocidade do conjunto,-.

T_{net} Torque instantâneo líquido, lb in (N·m)

n_{surf} Eficiência da potência transmitida, - .

2.4.2 Condições de funcionamento

De acordo com Tacaks (2003), a razão de redução do conjunto é composta pela razão de redução de velocidade na caixa de engrenagem e no redutor de polias, considerando que não há escorregamento da correia, e é dada por:

$$Z_d = Z\frac{D}{d} \quad (11)$$

Z_d Razão da redução da velocidade do conjunto

Z Razão da redução de velocidade na caixa de engrenagem

D Diâmetro da polia conectada a caixa de engrenagem

d Diâmetro da polia conectada ao motor.

A velocidade de bombeamento na haste polida pode ser encontrada pela velocidade do motor e pela razão da redução de velocidade do conjunto pela fórmula:

$$N = \frac{RPM}{Z}\frac{d}{D} \quad (12)$$

RPM Velocidade do motor, rpm

Z Razão da redução de velocidade na caixa de engrenagem

D Diâmetro da polia conectada a caixa de engrenagem

d Diâmetro da polia conectada ao motor.

N Velocidade de bombeamento, ciclos por minuto.

Para o trabalho foram considerados os parâmetros do motor e as taxas de redução para encontrar o torque e as componentes da força na unidade de bombeio, detalhados no capítulo III para a simulação numérica.

CAPÍTULO III

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a metodologia do procedimento experimental e numérico descrevendo os equipamentos e softwares utilizados no procedimento experimental. Descrevem-se os testes e ensaios realizados e as melhorias utilizadas na análise.

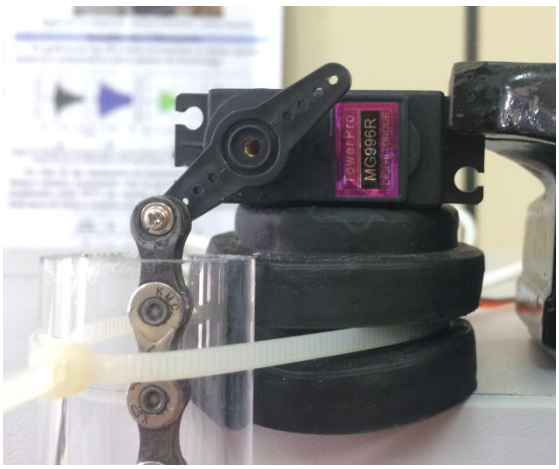
3.2 Equipamentos

Os principais equipamentos utilizados neste trabalho foram o servomotor e corrente da bicicleta, o servomotor proporciona o movimento alternativo a corrente simulando o movimento das hastes.

3.2.1 Servomotor

O Servomotor utilizado no trabalho é MG996R Tower Pro de alto torque, capaz de suportar até 0,9414 N·m, para suportar o peso da corrente o atrito entre o cilindro e a parede da tubulação.

Figura 14 – Servomotor MGR996R

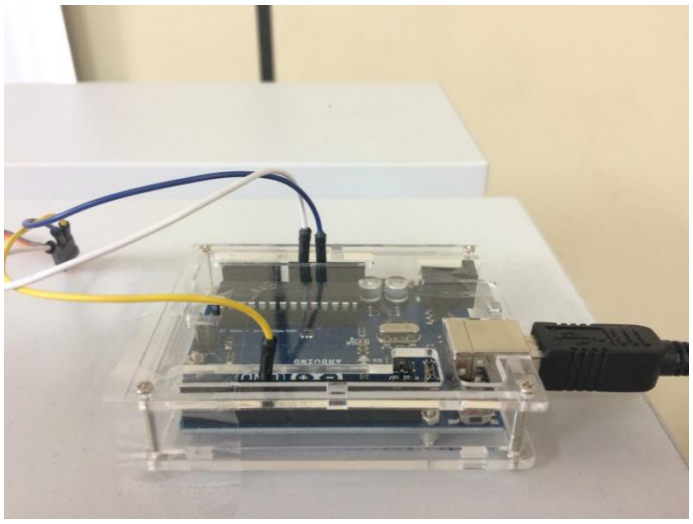


Fonte: Autor (2018)

3.2.2 Arduino

O Arduino é uma plataforma de hardware livre de placa única de fácil utilização, o arduino utilizado neste trabalho foi o uno R3, através do software é possível comandar o arduino e fornecer a energia para realizar o movimento preciso, com velocidade e ângulo necessário.

Figura 15 – Arduíno Uno R3



Fonte: Autor (2018)

3.2.3 Corrente de Bicicleta

Foi utilizada uma corrente de bicicleta na vertical, cada elo representa uma haste de bombeio. A corrente de bicicleta possui 100 elos com comprimento total de 1330 milímetros. Cada elo possui na sua largura 11 mm.

Figura 16 – Seção da corrente de Bicicleta com marcador

Fonte: Autor (2018)

3.2.4 Outros equipamentos

Para a coluna de produção utilizamos um tubo acrílico transparente com a relação do diâmetro entre a tubulação e a corrente proporcional a relação do diâmetro entre a coluna de produção e a coluna de hastes de um poço de bombeio mecânico.

Para encontrar as coordenadas em tempo real utilizamos o software LABVIEW 2018 e uma webcam para capturar a imagem, encontrar o objeto especificado e as coordenadas do objeto no momento do movimento. A webcam utilizada foi da Logitech com resolução de 1090 P.

3.3 Realização do procedimento

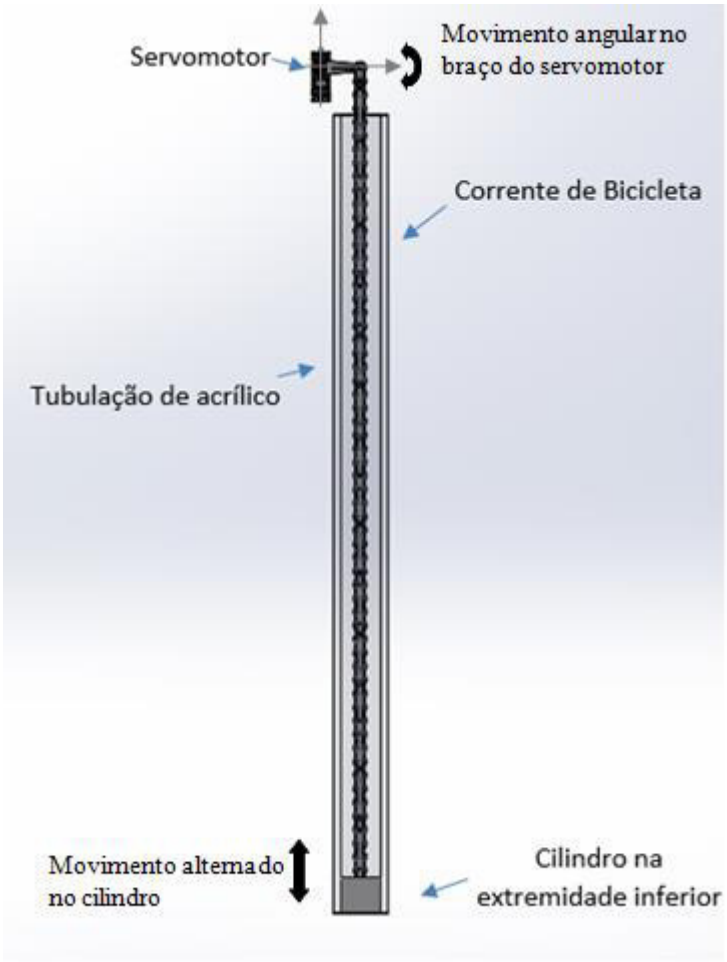
O procedimento consiste em uma simulação do movimento de deflexão nas hastes de bombeio, realizamos um experimento com um protótipo da dinâmica nas hastes com pêndulos múltiplos em série, para os pêndulos múltiplos utilizamos uma corrente de bicicleta na vertical com um servomotor conectado na extremidade superior que fornece o movimente ascendente e descendente semelhante ao movimento de uma unidade de bombeio na haste, ao redor da corrente há uma tubulação de acrílico com diâmetro proporcional ao diâmetro da tubulação de produção.

Os pêndulos múltiplos em série simulam as hastes de bombeio que são acopladas uma a uma verticalmente, cada elo representa uma haste de bombeio. Na extremidade

inferior da haste acoplamos um cilindro de isopor com pequena folga na parede de acrílico para representar a bomba de fundo. A pequena folga contribui para o atrito entre o cilindro e a tubulação de acrílico. O atrito gerado influencia na deflexão da corrente. Utilizamos o software LABVIEW para processar as imagens em tempo real e encontrar as coordenadas dos elos da corrente.

Segue na figura 17 o esquema do procedimento:

Figura 17 – Esquema do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Pelo arduíno inserimos a programação com o ângulo e velocidade que o braço do servomotor deveria acionar para a corrente ter o deslocamento adequado. Usamos uma braçadeira para prender a tubulação e posicionamos a tubulação para ficar centralizada na corrente.

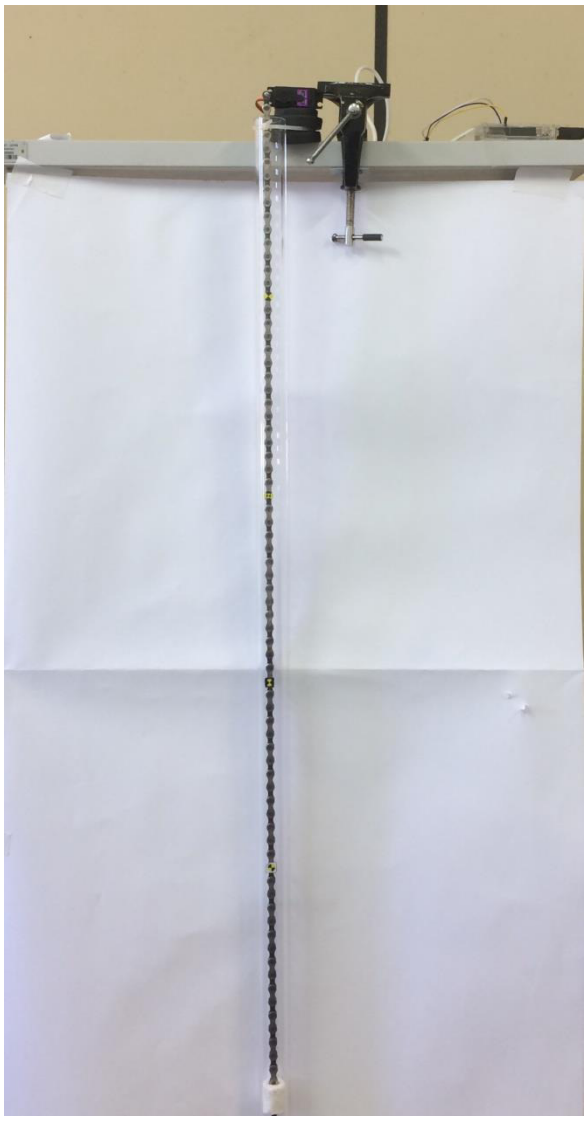
O braço do servomotor está posicionado inicialmente na posição zero no comprimento horizontal do servo, primeiro ele gira no sentido horário 33,5 graus e depois

gira no sentido anti-horário mais 67 graus, no terceiro movimento no sentido horário mais 67 graus, repetindo o movimento de 67 graus no sentido horário e anti-horário alternadamente. O movimento alternado do braço do servomotor aciona na corrente um movimento alternado, para cima e para baixo, semelhante ao movimento das hastes na unidade de bombeio mecânico.

O ângulo de 67 graus foi inserido com base no ângulo que viga da unidade de bombeio C-228D-213-86 do catálogo do anexo 3 desse trabalho realiza para esse modelo de UB.

Segue na figura 18 imagens do procedimento no laboratório:

Figura 18 – Procedimento experimental montado



Fonte: Autor (2018)

Foram marcados quatro pontos na corrente para encontrar as coordenadas, a seleção dos pontos foi realizada pela distribuição proporcional ao longo do comprimento da corrente de bicicleta e também considerando a amplitude de captura da imagem na *webcam*, cada ponto possui um marcador diferente para no processamento da imagem encontrasse o ponto correto. Inicialmente foram encontradas as coordenadas de todos os quatro pontos com a corrente estacionada por um tempo de 60 segundos para cada ponto. Em seguida alimentamos o arduíno e o movimento foi iniciado. Para a corrente em movimento as coordenadas foram capturadas por 120 segundos para cada ponto.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISE NUMÉRICA

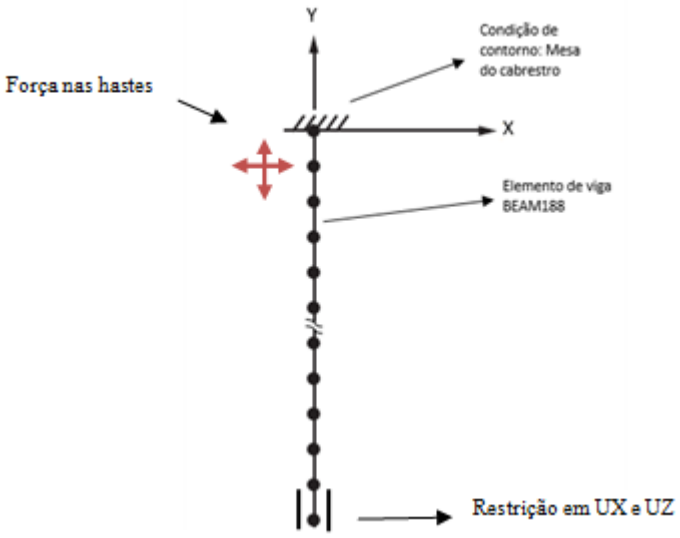
4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os procedimentos para a análise numérica das hastes de bombeio, o cálculo das componentes de força e modelo construído na simulação.

4.2 Análise numérica

Usando análise modal e dos métodos dos elementos finitos com o software ANSYS *Mechanical* APDL com o uso do elemento de viga BEAM188, conforme o esquema na figura 17. O modelo é construído para 100 hastes, cada elemento representa uma haste com 7,62 metros de comprimento e seção transversal circular com diâmetro de 7/8 polegadas. As hastes estão presas a mesa do cabresto representada no engaste.

Figura 19 – Esquema do método de elementos finitos



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O BEAM188 é um tipo de elemento baseado na teoria de viga de Timoshenko, considerando efeitos de deformação por cisalhamento. Usa três componentes de deformação: uma axial e duas de cisalhamento (transversal) O elemento é apropriado para estruturas delgadas como a coluna de hastes.

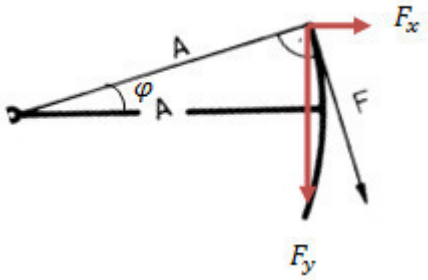
O elemento é um elemento de viga linear ou quadrático de dois nós que possui seis ou sete graus de liberdade em cada nó, na análise foram utilizados 100 elementos desse tipo. As cargas são aplicadas nos nós, e na análise foram aplicadas no segundo nó. Como condições de contorno foram as restrições de deslocamento, engaste no topo da estrutura, restrição em x e z no último nó, no fundo do poço, e entre cada elemento foram utilizadas restrições em z, e rotações em x e y.

Foram selecionados 4 nós, distribuídos ao longo da profundidade do poço. O ponto 1 situado na 23ª haste, o ponto 2 na 46ª, o ponto 3 na 60ª e o ponto 4 na 83ª, também selecionados próximos aos pontos selecionados no experimental, mas no experimental a distribuição foi limitada devido a amplitude de captura da câmera.

4.2.1 Cálculo das componentes horizontais e verticais da força

Comparando com o movimento do experimento a força nas hastes foi calculada considerando as componentes na horizontal e na vertical. A componente vertical foi calculada pela força F da equação 7 onde $F_y = F$. E a componente horizontal F_x foi calculada por $F_x = F_y \cdot tan\varphi$. Onde φ é o ângulo entre a viga principal e o eixo X. A divisão da força em componentes foi utilizada para aproximar as forças aplicadas no servomotor.

Figura 20 – Componentes da força na cabeça da viga



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Com os dados do motor, motor de 20HP (14914 Watts) com 8 pólos, foi possível calcular o seu torque, depois encontramos o torque na UB, e com os parâmetros da unidade de bombeio C-228-213-86 encontramos as forças em y, para vários ângulos, e em seguida a força em x. As componentes foram encontradas pelo seguinte passo a passo:

- Cálculo da rotação do motor: $N_{synch} = \frac{120f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{8} = 900\ rpm$

- Velocidade angular do motor: $w = \frac{2\pi}{60} N = 94{,}2478\ rad/s$

-Cálculo do Torque do motor: $Pot = T_m \cdot w \rightarrow T_m = 158{,}238\ N \cdot m$

- Encontrar o diâmetro da polia do motor:

Os valores de Z e D são da tabela no anexo 4 para a UB C-228-213-86

$$N = \frac{RPM}{Z}\frac{d}{D} \rightarrow d = 15{,}55\ in = = 0{,}395m$$

-Cálculo da razão de redução do conjunto:

$$Z_d = Z\frac{D}{d} = 75{,}01$$

- Cálculo do Torque da Manivela:

O torque foi calculado utilizando a equação (10), com uma eficiência de 80%, $n_{surf} = 0{,}8$.

$$T_m(t) = \frac{T_{net}(t)}{Z_d}\frac{1}{n_{surf}} \rightarrow T_{net} = 158{,}238\ N \cdot m$$

- Cálculo do Fator de torque para cada ângulo:

O Fator de torque foi calculado pela equação (8), as variáveis dos ângulos α e β são definidos nos apêndices da API Spec 11E, no anexo 5, em graus para a UB C-228-213-86 e A, C, R são dimensões da unidade de Bombeio, no anexo 3.

$$TF(\theta) = \frac{RA}{C}\frac{sin\alpha}{sin\beta}$$

Os resultados do fator de torque se encontram na tabela 2, na segunda coluna.

-Cálculo de F_y e F_x

O valor de F_y foi calculado pela equação (7), onde $F_y = F$:

$$T = \frac{RA}{C}\frac{sin\alpha}{sin\beta}F = TF(\theta)\cdot F_y \rightarrow F_y = \frac{T}{TF(\theta)}$$

O valor de F_x foi calculado por $F_x = F_y tan\varphi$

Os resultados de F_y e F_x se encontram na tabela 2.

Tabela 2 Valores calculados de Fator de Torque e Força para UB C-228-213-86

Forças aplicadas na haste			
Ângulo da manivela (graus)	Fator de Torque (m)	Força em Y (N)	Força em X (N)
0	-0,0610	-2595,7677	-1720,4694
15	0,3404	464,9136	244,1888
30	0,7214	219,3607	88,1100
45	1,0033	157,7175	45,3958
60	1,1430	138,4409	24,9870
75	1,1455	138,1340	10,6404
90	1,0566	149,7558	-3,7163
105	0,9220	171,6210	-21,8264
120	0,7722	204,9290	-47,5911
135	0,6198	255,3214	-87,4184
150	0,4623	342,2990	-157,6339
165	0,2896	546,4774	-322,5824
180	0,0965	1639,4322	-1207,7847
195	-0,1321	-1198,0466	707,1998
210	-0,3886	-407,1792	187,5122
225	-0,6502	-243,3532	83,3207
240	-0,8788	-180,0533	41,8141
255	-1,0439	-151,5777	19,2773
270	-1,1303	-139,9965	3,4741
285	-1,1379	-139,0590	-10,7117
300	-1,0744	-147,2776	-26,5819
315	-0,9347	-169,2892	-48,7265
330	-0,7188	-220,1358	-88,4213
345	-0,4242	-373,0445	-195,9360
360	-0,0610	-2595,7677	-1720,4694

As forças aplicadas na simulação foram repetidas em cinco ciclos e foi realizada uma análise transiente em aproximadamente 26 segundos.

4.3 Análise numérica do procedimento experimental

Para comparar os resultados foi realizada uma simulação numérica do procedimento experimental considerando os dados geométricos e físicos da corrente de bicicleta e as componentes das forças horizontal e vertical aplicada pelo servomotor.

A força resultante foi calculada a partir do torque do servomotor de 0,9414 N m, o braço do servomotor é de 17 mm, como torque é força vezes distância então a força encontrada foi de 55,3765 N.

$$T = F \cdot d \rightarrow F = 55{,}3765\ N$$

E decompondo a força em x e y, temos $F_x = Fcos\varphi$ e $F_y = Fsen\varphi$. Os resultados de F_x e F_y se encontram na tabela 3 em função ângulo entre o braço e o eixo x.

Tabela 3 – Valores calculados de Força pelo torque do servomotor

Forças aplicadas na corrente			
Ângulo do braço (graus)	Ângulo do braço (rad)	Força em X (N)	Força em Y (N)
33,5000	0,5853	30,5936	46,1583
27,6800	0,4836	25,7499	49,0255
21,8600	0,3819	20,6401	51,3862
16,0400	0,2803	15,3171	53,2160
10,2200	0,1786	9,8359	54,4960
4,4000	0,0769	4,2530	55,2129
-1,4200	-0,0248	-1,3738	55,3595
-7,2400	-0,1265	-6,9864	54,9340
-13,0600	-0,2282	-12,5268	53,9410
-18,8800	-0,3299	-17,9378	52,3907
-24,7000	-0,4316	-23,1635	50,2992
-30,5200	-0,5333	-28,1499	47,6879
-36,3400	-0,6349	-32,8454	44,5840
-30,5200	-0,5333	28,1502	-47,6884
-24,7000	-0,4316	23,1637	-50,2996

-18,8800	-0,3299	17,9380	-52,3912
-13,0600	-0,2282	12,5269	-53,9415
-7,2400	-0,1265	6,9865	-54,9345
-1,4200	-0,0248	1,3738	-55,3600
4,4000	0,0769	-4,2531	-55,2134
10,2200	0,1786	-9,8360	-54,4965
16,0400	0,2803	-15,3173	-53,2165
21,8600	0,3819	-20,6403	-51,3867
27,6800	0,4836	-25,7501	-49,0259
33,5000	0,5853	-30,5939	-46,1587

Na simulação a força foi aplicada em 3 ciclos em uma análise transiente totalizando 5,575 segundos. A simulação do experimento está no anexo VI deste trabalho.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

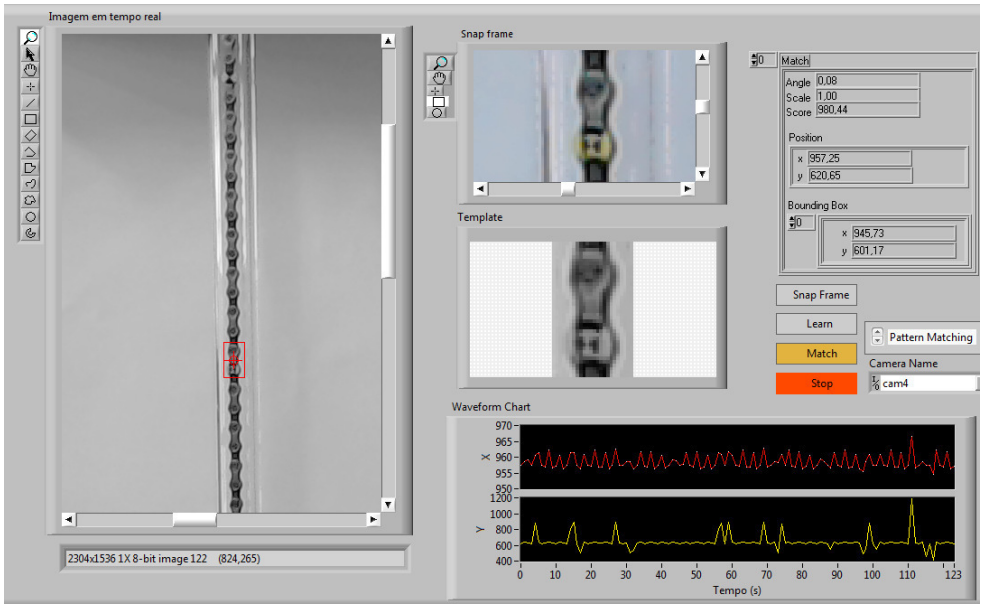
5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais e as análises realizadas com os dados obtidos pelo processamento de imagem, e os resultados obtidos na análise numérica.

5.2 Resultados do procedimento experimental

No anexo 2 está o diagrama de blocos do programa para adquirir as coordenadas dos marcadores selecionados em relação a coordenada x. Na figura 21 observa-se o resultado do programa para o marcador 1. No lado esquerdo da figura 21 está a imagem em tempo real, o elo selecionado possui no centro do quadrado vermelho as coordenadas apresentadas no gráfico do canto inferior direito da figura.

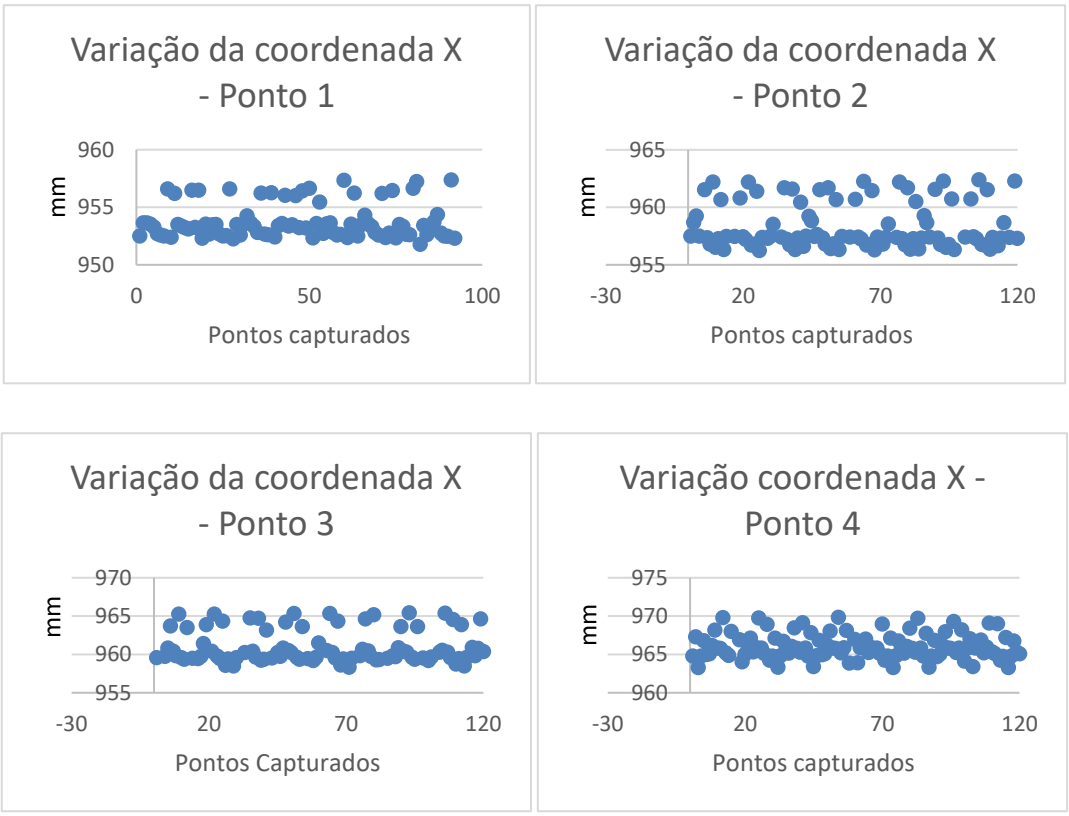
Figura 21 – Display do LABVIEW



Fonte: LABVIEW (2018)

Os dados dos gráficos foram exportados para uma tabela e excluídos os valores incoerentes. Seguem resultados de cada marcador na figura 22.

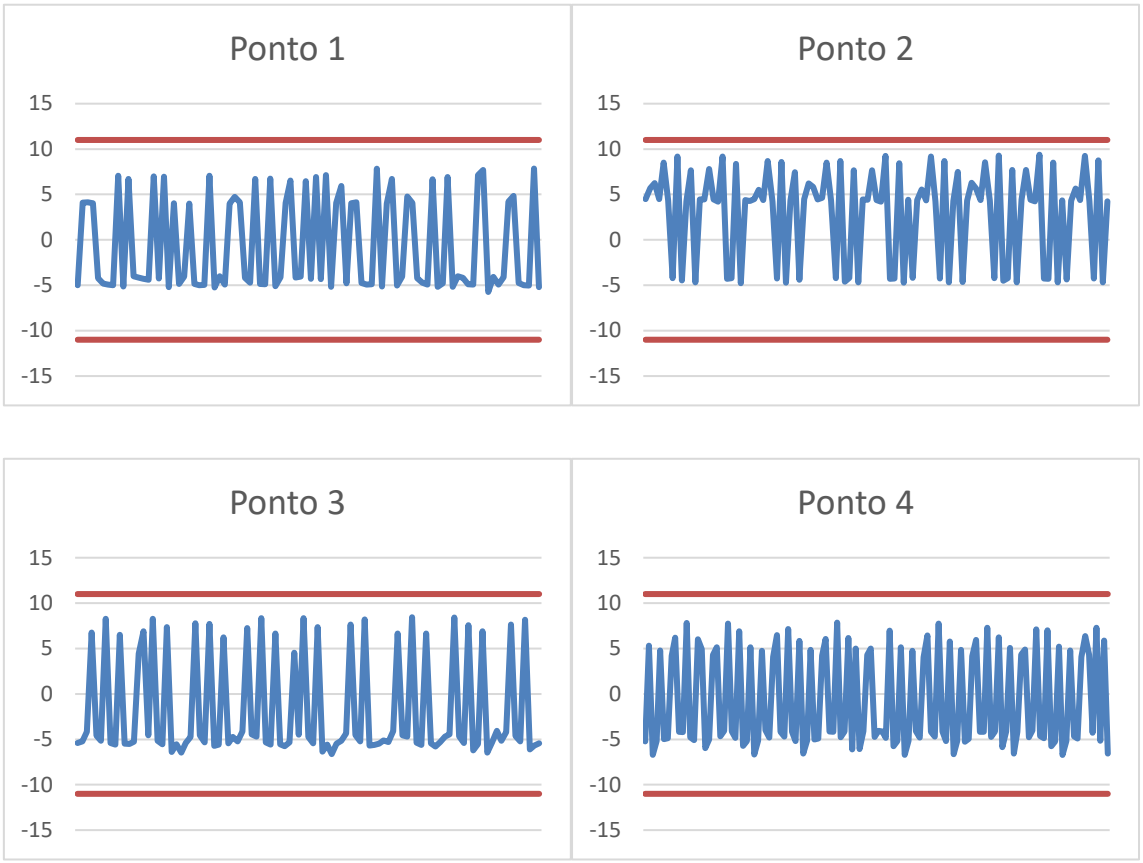
Figura 22 – Valores da coordenada X de cada ponto



Fonte: Autor (2018)

Observa-se nos gráficos que os deslocamentos transversais seguem um movimentado alternado em função do movimento repetitivo do servomotor. Os pontos variaram até 6,22 milímetros, adicionando a largura de cada elo calcula-se que o ponto 2 teve a variação máxima de 9,38mm. Como o raio da tubulação de produção é 11 mm, o ponto 2 foi o mais próximo da parede da tubulação durante o movimento. Na figura 23 apresentam-se os resultados da variação da coordenada x dos elos escolhidos em comparação com o diâmetro da tubulação.

Figura 23 – Deslocamentos em milímetros dos quatros elos escolhidos.



Fonte: Autor (2018)

Com o centro do elo como origem o ponto 1 teve uma variação de -5,7 mm a 7,8mm, o ponto 2 variou de -4,8 a 9,4mm, o ponto 3 de -6,6 mm a 8,5mm e o ponto 4 entre -6,69 mm e 7,82mm.

Apresenta-se na figura 23 a distância da superfície de cada elo em relação a parede interna da tubulação de acrílico, que possui um raio de 11 mm representada pelas linhas vermelhas do gráfico. Observa-se que o ponto 2 é o mais próximo da tubulação de acrílico, porém nenhum dos pontos encostaram na tubulação.

A seleção dos pontos foi realizada pela distribuição proporcional ao longo do comprimento da corrente de bicicleta e também considerando a amplitude de captura da imagem na *webcam* não foram selecionados pontos nas extremidades, para analisar qual a região na coluna de hastes está mais suscetível a encostar na tubulação de produção em poços verticais.

Mostra-se com os resultados que poços verticais que estejam operando normalmente sem a influência de fatores externos, como atrito, presença de areia, ou desalinhamento da unidade de bombeio, a coluna de hastes não encosta na tubulação de produção. E a falha por haste partida não deve ser originada pelos choques entre essas duas superfícies. Mas caso o poço apresente alguns desses outros fatores externos, a falha pode acontecer, pois mostra-se nos resultados que em uma operação normal a coluna hastes fica muito próxima da parede interna da tubulação, e qualquer outro fator pode contribuir e aumentar o deslocamento transversal.

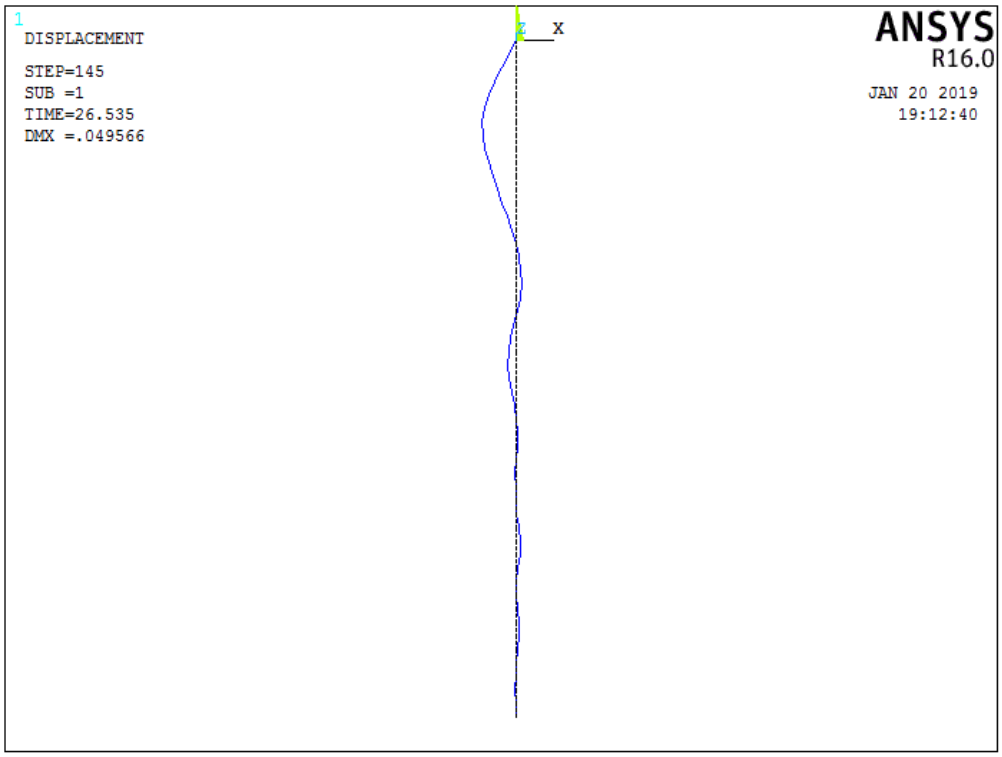
A analogia de um sistema artificial de elevação por bombeio mecânico com o experimento utilizando pêndulos múltiplos é importante para analisar o comportamento das hastes no interior da tubulação, pode ser usado como base em futuros trabalhos, mas devem-se acrescentar os fatores externos para analisar a sua influência.

Realiza-se também uma simulação numérica, incluindo-se dados reais para um poço com cem hastes, porém na simulação as forças na unidade de bombeio foram calculadas e aplicadas como no experimento, para comparar os deslocamentos dos pontos utilizando hastes de bombeio, o resultado da análise está detalhado no próximo subcapitulo.

5.3 Resultados da análise numérica

Mostra-se na figura 25 a deformação de uma análise transiente na coluna de hastes após 7 ciclos de esforços repetitivos da unidade bombeio considerando a força alternada aplicada pela unidade de bombeio na coluna de hastes em um tempo de 26,5 segundos. Pela figura 25 observa-se em azul a coluna de hastes deformada, e que a região com maior deslocamento fica mais próxima da superfície do poço.

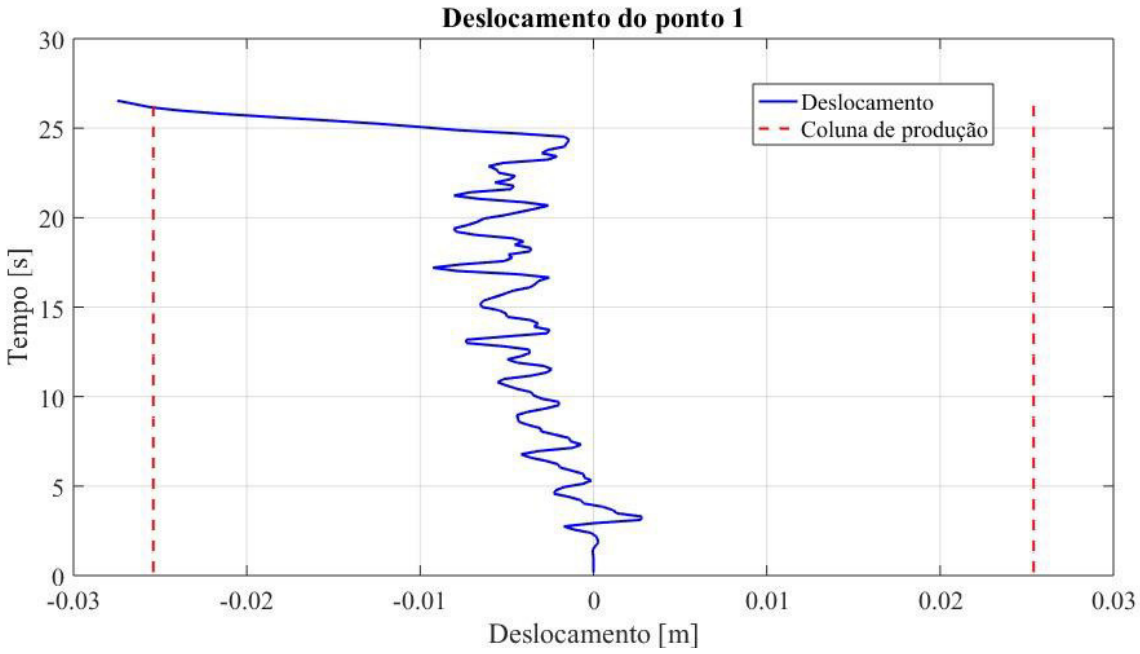
Figura 24 – Resultado na análise transiente



Fonte: ANSYS (2018)

Em seguida apresentam-se os resultados de deslocamento em função do tempo para quatro pontos, como no experimental. Foram selecionadas 4 hastes distribuídas ao longo da profundidade do poço, o ponto 1 situado na 23ª haste, o ponto 2 na 46ª, o ponto 3 na 60ª e o ponto 4 na 83ª, baseando-se também no experimental e na profundidade do poço para analisar o comportamento em cada região. Na figura 26 observa-se que o ponto 1 possui um deslocamento máximo de aproximadamente 28 mm. O diâmetro da tubulação é de 73,025 mm, e entre a haste e a parede da tubulação tem 25,4 mm. O ponto 1 pela simulação apresentou um deslocamento máximo de 28 mm, ultrapassando o limite de 25,4 mm representado pela linha tracejada vermelha.

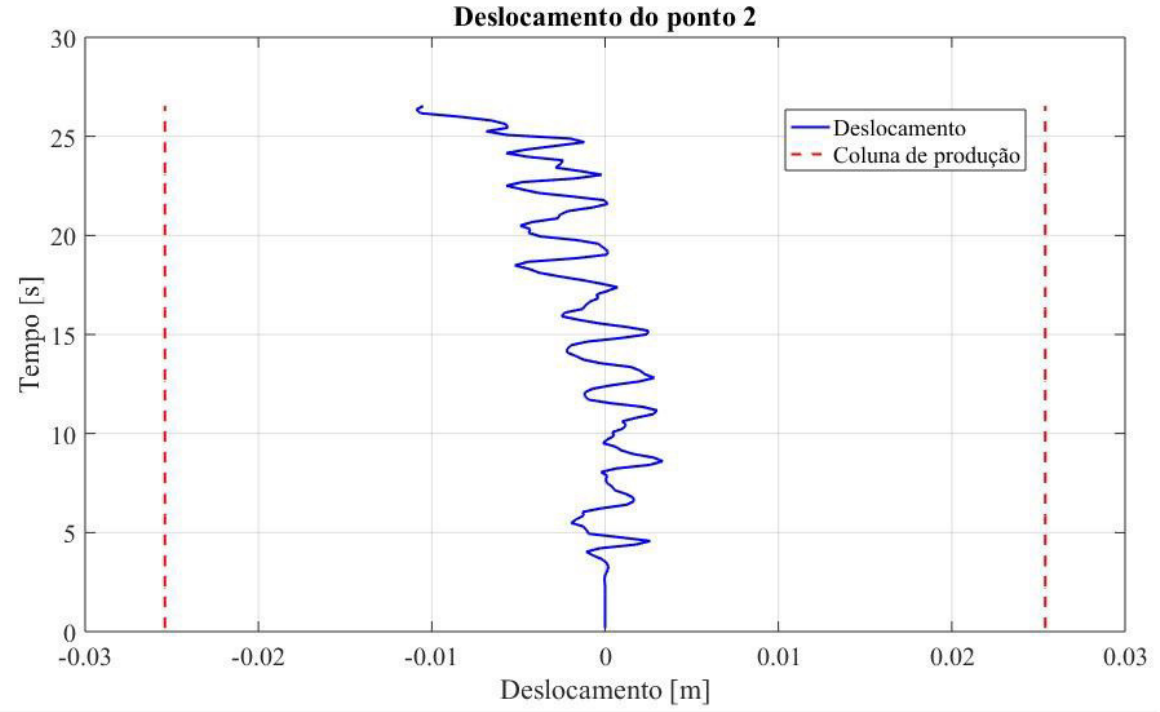
Figura 25 – Deslocamento em X do ponto 1



Fonte: ANSYS (2018)

Na figura 27 apresenta-se o deslocamento transversal do ponto 2 é de 11 mm e não encosta na parede interna da coluna de produção.

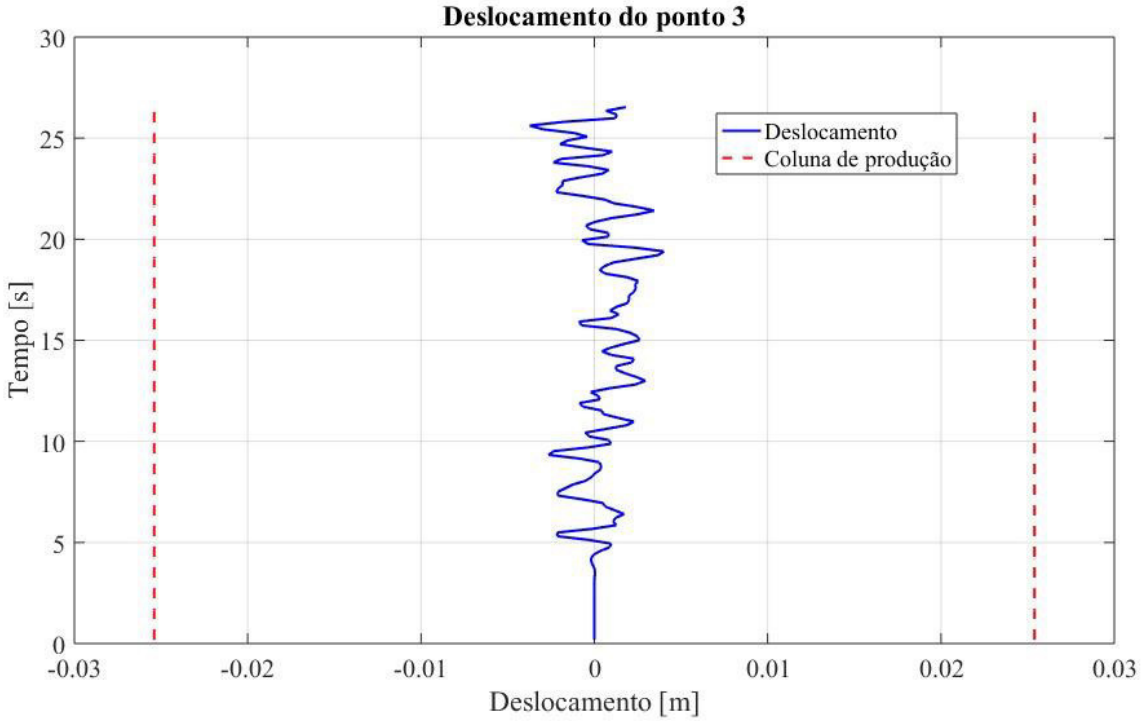
Figura 26 – Deslocamento em X do ponto 2



Fonte: ANSYS (2018)

Na figura 28 mostra-se o gráfico do ponto 3 no nó 60, que apresenta um deslocamento máximo de 4 mm, o ponto 3 apresentou uma variação menor e ficou distante do limite de 25,4 mm da coluna de produção.

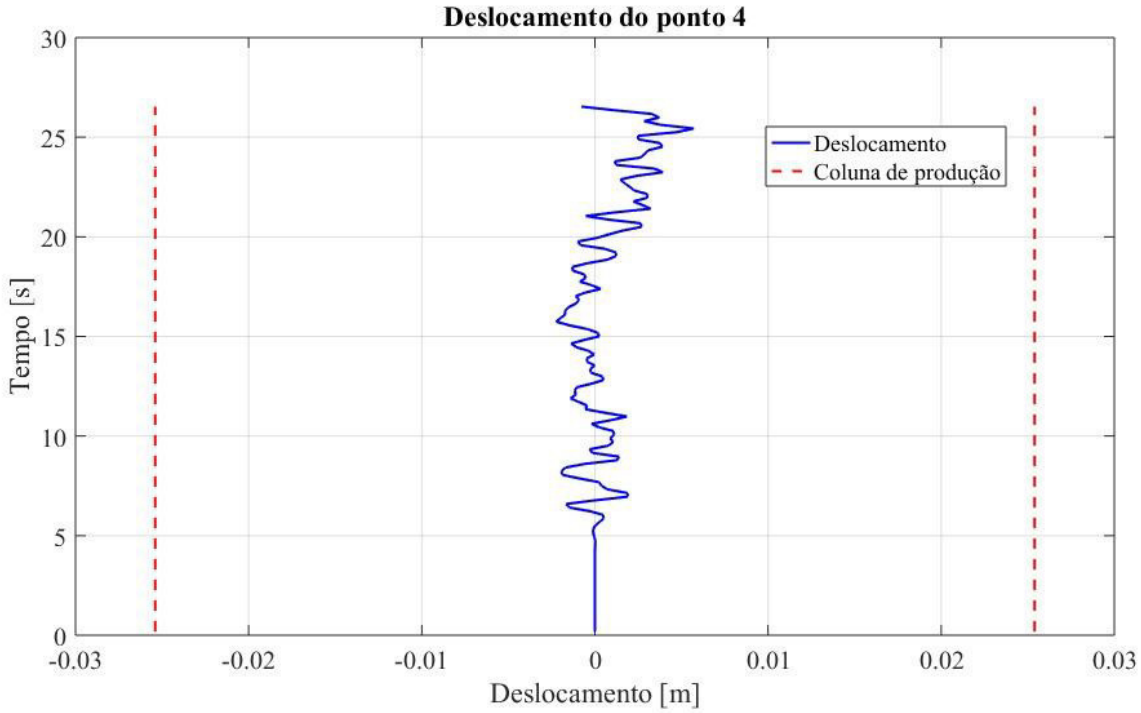
Figura 27 – Deslocamento em X do ponto 3



Fonte: ANSYS (2018)

Apresenta-se na figura 29 como nos gráficos anteriores o deslocamento do ponto 4 é de 5,7 mm, e como os pontos 2 e 3 também ficou distante da parede da coluna de produção.

Figura 28 – Deslocamento em X do ponto 4



Fonte: Autor (2018)

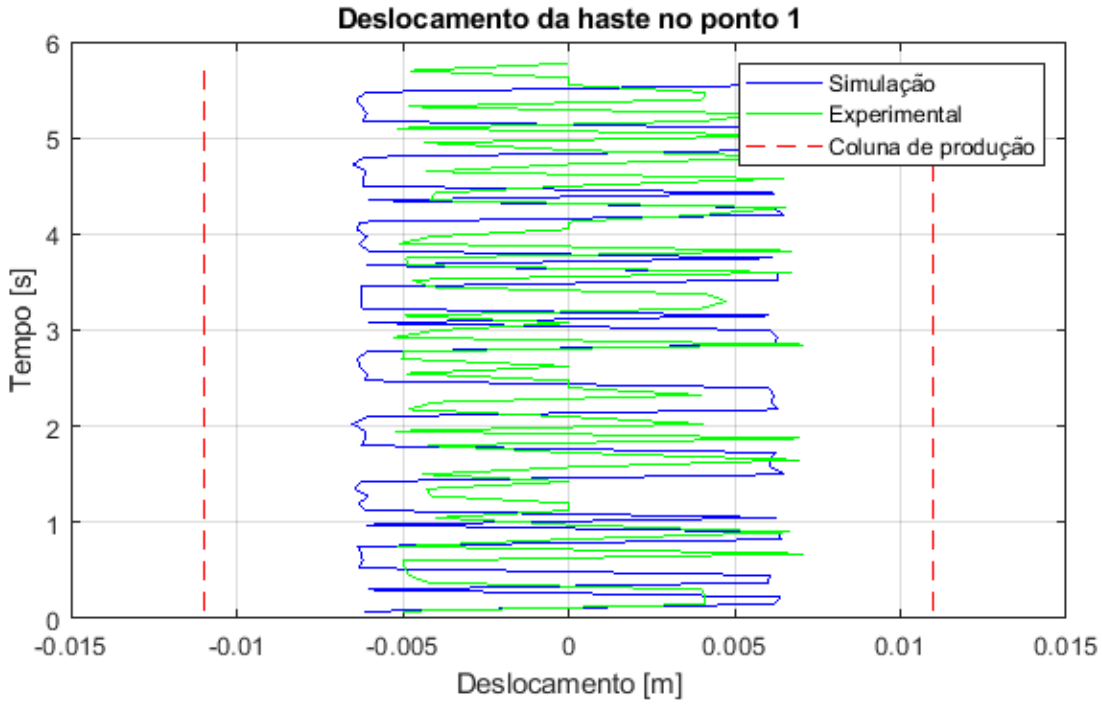
O experimento e a simulação numérica de um poço com 100 hastes são diferentes, são semelhantes na aplicação da força e dinâmica do movimento, mas a amplitude da força entre os dois não são proporcionais. O experimento contribuiu para observar a aplicação da carga e estudá-la na simulação.

5.3.1 Resultados da análise numérica do experimento

A simulação numérica do procedimento foi uma análise transiente após 3 ciclos de esforços repetitivos pela força alternada aplicada através servomotor em um tempo de 5,575 segundos.

Na análise numérica do experimento obtêm-se os deslocamentos dos elos da corrente, os pontos selecionados foram os mesmo do procedimento e na figura 29 encontram-se os deslocamentos do ponto 1 em função do tempo em comparação aos deslocamentos do mesmo ponto no experimento.

Figura 29 – Deslocamento em X do ponto 1 na simulação e no experimental

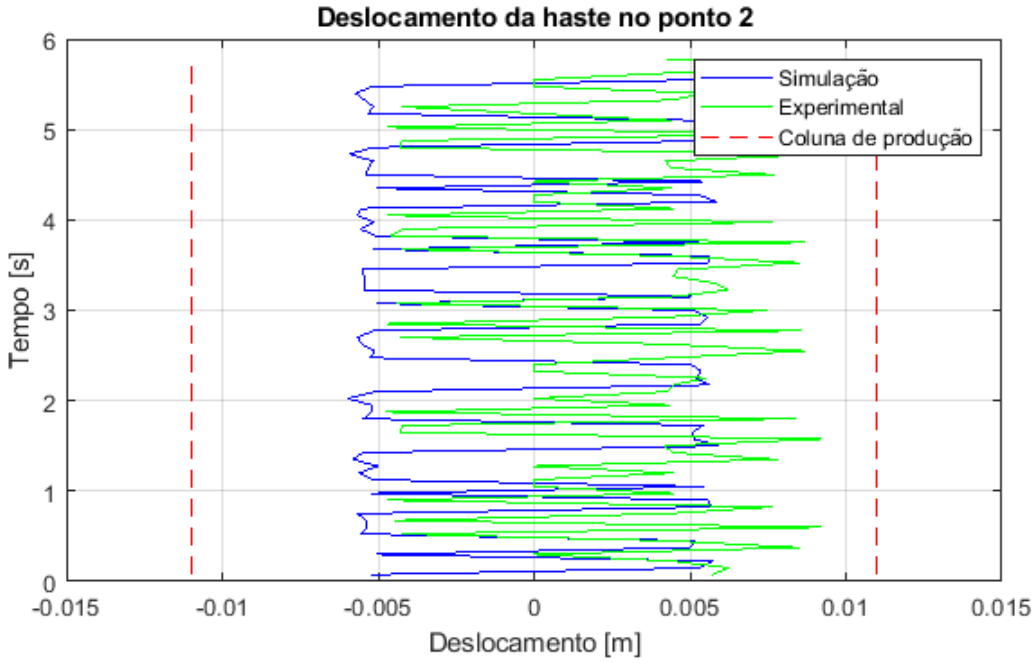


Fonte: Autor (2019)

Pela figura 29 analisamos que no experimental os elos da corrente deslocaram uns milímetros a mais para direita, que pode ocorrer devido à descentralização da corrente e/ou a força de atrito contrária ao movimento entre a extremidade da corrente e a parede interna da tubulação de acrílico que não apresentava uma superfície uniforme. A força de atrito na extremidade da corrente entre o cilindro de isopor e a parede interna da tubulação e a descentralização da corrente não foram inseridas na simulação e devido a isso a curva azul se apresenta mais uniforme.

Pela figura 30 que apresenta os deslocamentos do ponto 2 no experimental e na simulação, percebemos que nenhum ponto encosta na parede da tubulação, porém no experimental os pontos são mais deslocados para mais para a direita.

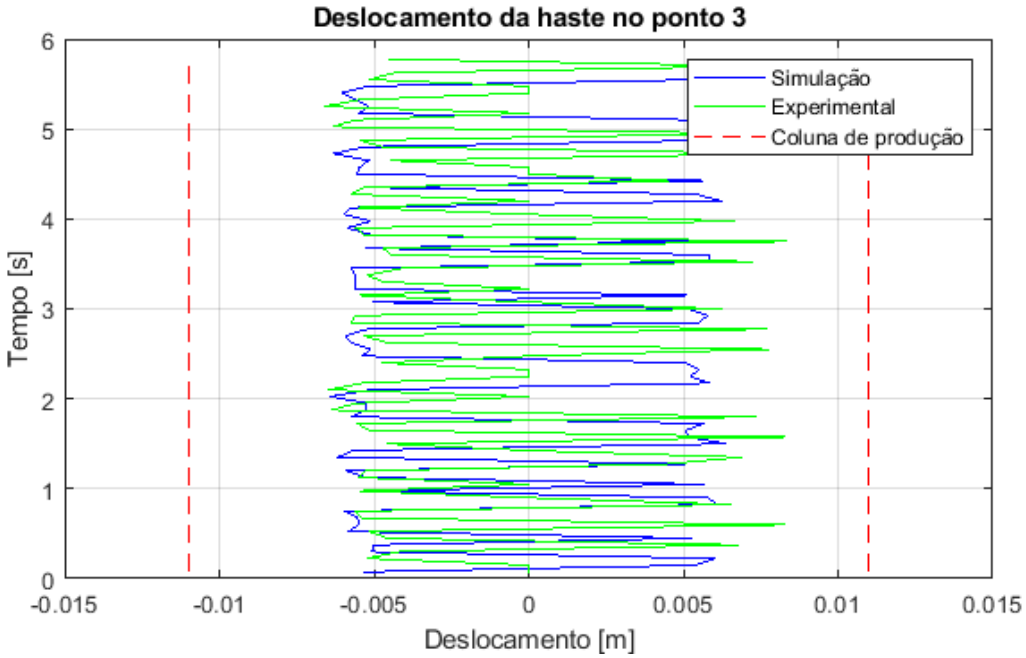
Figura 30 – Deslocamento em X do ponto 2 na simulação e no experimental



Fonte: Autor (2019)

Na figura 31 apresentam-se as curvas de deslocamento em função do tempo do ponto 3, e como nos pontos anteriores os deslocamentos são maiores para a direita e a curva da simulação é mais uniforme, pois não considera a força de atrito e descentralização da corrente.

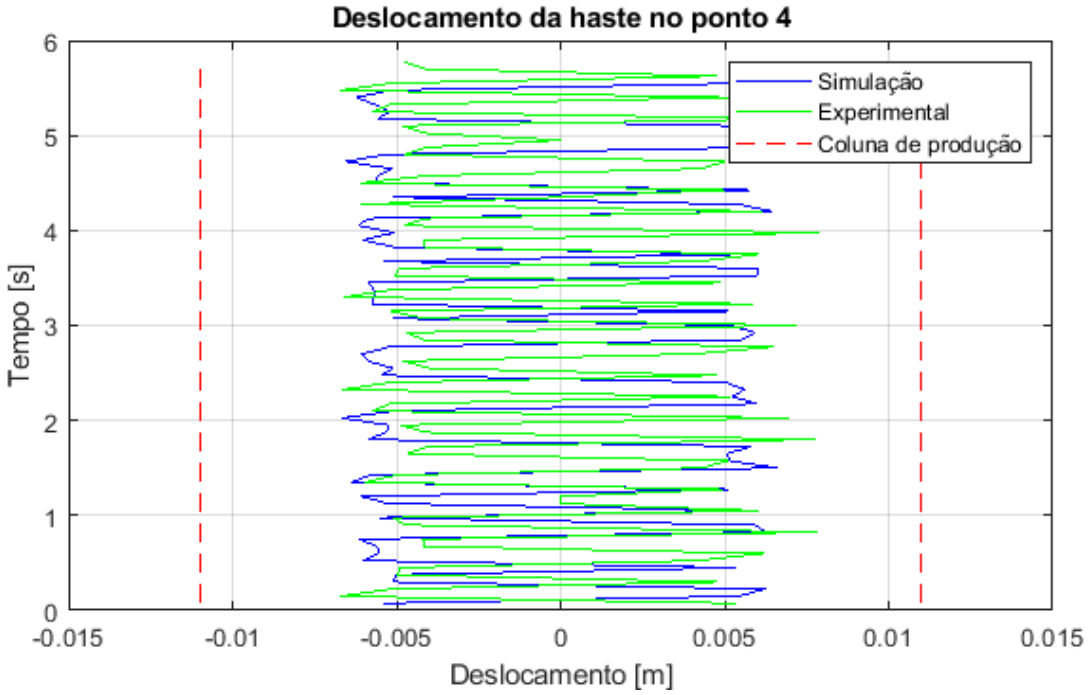
Figura 31 – Deslocamento em X do ponto 3 na simulação e no experimental



Fonte: Autor (2019)

No ponto quatro na figura 32 os deslocamentos foram mais distribuídos em comparação com os outros pontos, e também não apresentou contato com a tubulação de acrílico.

Figura 32 – Deslocamento em X do ponto 4 na simulação e no experimental



Fonte: Autor (2019)

A comparação entre o experimental e a simulação numérica do experimento contribui para analisar o comportamento dinâmico da coluna de haste no bombeio mecânico através da simulação numérica de um poço, porém é preciso considerar na simulação fatores externos como descentralização da haste, presença de areia e outros.

CAPÍTULO VI

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O procedimento experimental foi baseado em um poço vertical com 100 hastes, o movimento alternado foi calculado baseado em dados de uma unidade de bombeio. Nos resultados do procedimento experimental foi possível observar que para um funcionamento adequado as hastes nos pontos analisados não realizam contato com a tubulação. Nos resultados da simulação numérica ocorre o contato.

No experimental o ponto 2 foi o mais próximo da haste e está localizado no 16º elo, indicando que possivelmente a região próxima ao ponto é a mais susceptível a um contato entre a tubulação e a haste. Na simulação numérica o ponto 1 localizado na 23ª haste teve um deslocamento maior, indicando o contato entre as duas superfícies. O ponto 2 localizado na 46ª haste também ficou próximo da haste, mas não encostou na tubulação. Comparado o experimental e o numérico podemos concluir que a região mais acima, próxima de 1/3 da profundidade possui uma probabilidade maior de ter um contato entre as superfícies, gerando um ponto de concentração de tensão que progredirá para uma falha.

Para o procedimento foram excluídos alguns valores incoerentes, pois o programa rastreia o objeto pela intensidade luminosa, como não foi possível montar a bancada em um fundo totalmente branco, o programa captava alguns pontos errados que foram excluídos da análise.

Como os elos são todos iguais foi necessário incluir marcadores para o programa diferenciar cada elo e quatro pontos foram escolhidos. Também não foi possível rastrear os pontos simultaneamente, então cada ponto foi analisado separadamente.

É importante salientar que em poços direcionais o contato é mais susceptível de acontecer, porém esses tipos de poços possuem centralizadores para evitar essa ocorrência e esses elementos não foram analisados no experimento.

A comparação da simulação numérica do experimento mostra que é possível realizar a simulação da dinâmica de um poço, porém é preciso acrescentar a influência de alguns fatores externos;

Outros fatores também podem contribuir para o contato entre haste e tubulação: flambagem da haste, o atrito entre a bomba e a tubulação de produção, descentralização da haste: Se a haste não estiver centralizada na tubulação de produção durante o movimento, o contato pode ocorrer. Esses fatores também não foram inseridos no experimento.

Para os poços com pancada de fluido uma proposta é criar um mecanismo de amortecimento no momento do choque entre a bomba e a superfície do fluido para reduzir o impacto e diminuir a tensão na haste, e consequentemente as batidas entre a coluna de haste e de produção.

As sugestões para continuidade desse trabalho são:

Capturar todos os elos da corrente de bicicleta simultaneamente; para isso é necessária uma adaptação no programa para o software diferenciar cada objeto;

Realizar a simulação numérica da haste de bombeio e obter o deslocamento de todos os pontos para comparar com o experimental;

Incluir os fatores que influenciam no contato, como descentralização da haste e flambagem, forças externas de fricção, para a simulação se aproximar o máximo possível da situação real.

Incluir uma análise de fratura em amostras de hastes partidas, para analisar a origem da falha e se o contato com a superfície pode causar a falha.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010, API SPEC 11B: *Specification for Sucker Rods, Polished Rods and Liners, Couplings, Sinker Bars, Polished Rod Clamps, Stuffing Boxes, and Pumping* Tees 27 ed. Washington, Estados Unidos: API Publishing Services.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013, API SPEC 11E: *Specification for Pumping Units* Tees 27 ed. Washington, Estados Unidos: API Publishing Services.

COSTA, R., 2008, O. Curso de Bombeio Mecânico. Petrobras.

DUAN, D.L., GENG, S.L., JIANG, S. Li. 2013. *Failure mechanism of sucker rod coupling. Engineering Failure Analysis 36 (2014)* p 166-172.

FILAS, J*, 2014, Pipe dream become reality. ANSYS Advantage Excellence in Engineering Simulation*. p 6 - 9.

FITRIANTI, A. HAYONO. 2018. *Analysis of damage Rod String Components In Rod Pump In The Field Ss. Journal of Earth Energy Engineering. JIEEE Vol. 7. No1.*

LUBINSKI A, BLENKARN KA, 1967, *Buckling of tubing in pumping wells, its effects and means for controlling it*. PetTrans AIME, p 73–88.

LUFKIN OILFIELD PRODUCTS GROUP, 2011, *Pumping Unit*.

NASCIMENTO, J. M. A., 2005. Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico. Dissertação apresentada para obtenção do título em Mestre em Engenharia Elétrica. UFRN. Natal.

NICKENS, H.; LEA J. F.; COX J. C.; BHAGAVATULA, R.; GARG D.;2005.*Downhole Beam Pump Operation: Slippage and Buckling Forces Transmitted to the Rod String. Journal of Canadian Petroleum Technology.* p 56 - 61.

RODRIGUES, M. C. 2007. Análise da Integridade Estrutural em Hastes de Bombeio Por Cavidades Progressivas. Tese apresentada para obtenção do título de doutor em engenharia mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica. UFPB. João Pessoa.

RODRIGUES, M. C. CAVALCANTI, J. H. F. 2008. Análise Harmônica de Pêndulos Simples para Estudo da Dinâmica de uma Coluna de Hastes de Bombeio BCP. Artigo. XXII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Belo Horizonte.

SANTOS, A. 2008. O. Estudo da Resistência a Corrosão em Aço e Revestimentos Visando Aplicação em Hastes de Bombeio de Petróleo. Dissertação de Mestrado da Universidade Tiradentes. Aracaju.

TAKÁCS, Gabor.2003.*Sucker-Rod Pumping Manual*. Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos: *Pennwell Corporation*.

TENARIS® *Sucker Rod General catalogs.* 2018 Disponível :www.tenaris.com/suckerrods acesso em 08 de Janeiro de 2019.

THOMAS, José E. *et al*. 2004. Fundamentos da Engenharia de Petróleo. 2ª Ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência.

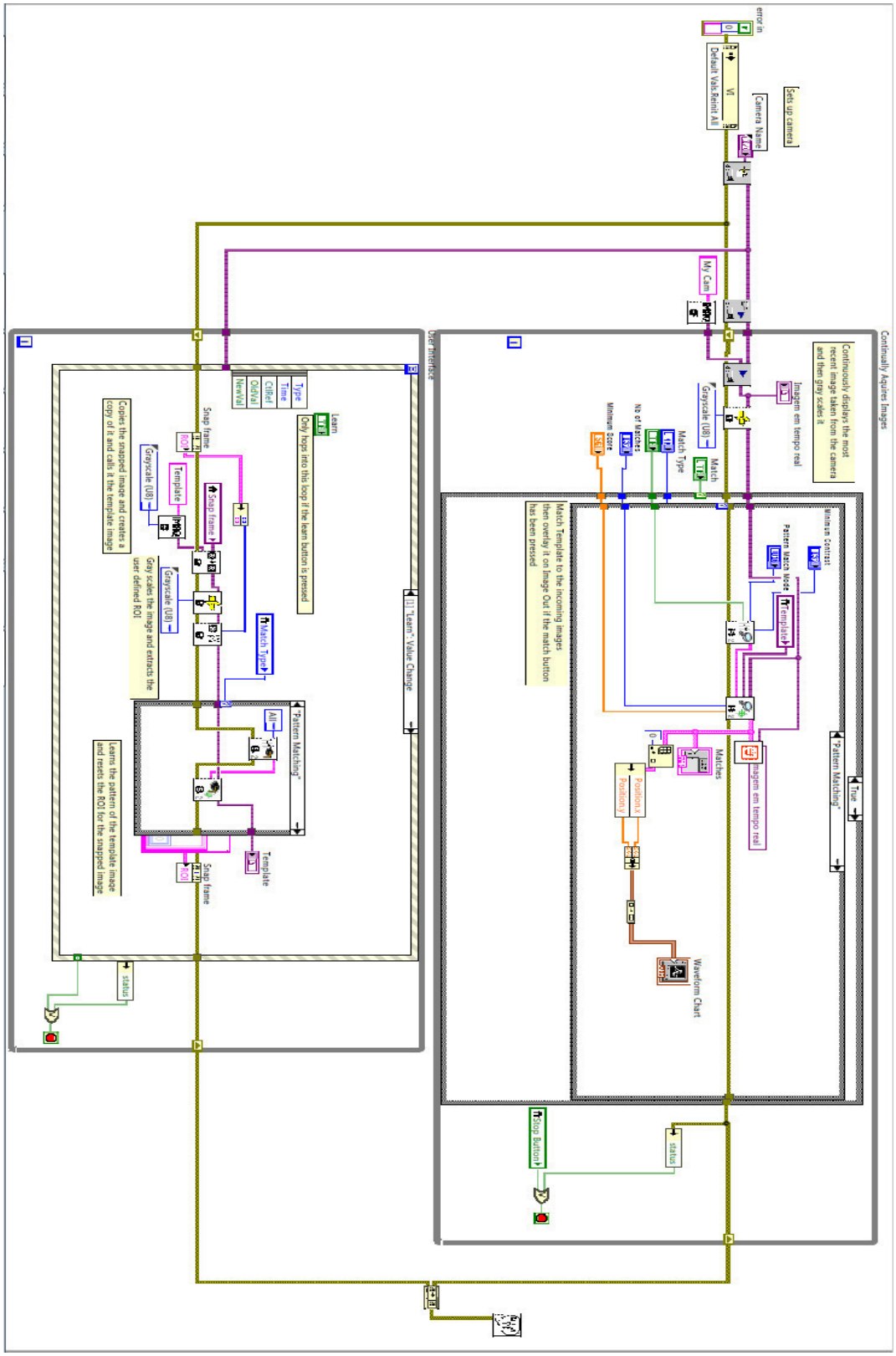
XING, M, 2016, *Response analysis of longitudinal vibration of sucker rod string considering rod buckling*. *Advances in Engineering Software*.p 49 - 50.

XIURONG, S. SHIMIN, D. MAOSEN, L. JUNJIE Z. 2018 *The simulation model of sucker rod string transverse vibration under the space buckling deformation excitation and rod-tubing eccentric wear in vertical wells. JVE International LTD. Journal Of Vibroengineering*. P 283-299.

ZHOU, R., FENG M. JIANG M, DONG K. *Research on fatigue damage of sucker rod based on damage mechanics. Research article. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research.* p 1394 - 1400

ANEXOS

ANEXO I



ANEXO II

```
/TITLE,Adelaide
/PREP7
/units,si ! Unidades SI
ET,1,BEAM188 ! 3-D 2-NODE BEAM
KEYO,1,3,2 ! Função quadrática
KEYO,1,2,1 ! Rígida
SECTYPE,1,BEAM,CSOLID ! secao transversal circular
SECDATA,0.11 !raio
ET,2,MPC184
KEYO,2,1,1 !RIGID LINK
KEYO,2,2,1 !LANGRAGE
MP,EX,1,200E9 ! Módulo de elasticidade
MP,NUXY,1,0.3 ! coeficiente de poisson
MP,DENS,1,7850      !Densidade do material

N,1   !nós da haste
*REPEAT,50,2,0,-7.62,0
N,2,0,-7.62,0   !nós das juntas
*REPEAT,50,2,0,-7.62,0


TYPE,1  ! Definindo tipo do elemento 1 beam188
SECNUM,1
MAT,1
EN,1,1,3  !Criando elemento entre os nós
*REPEAT,49,1,2,2
EN,50,99,100

TYPE,2  ! Definindo tipo do elemento 2 das juntas
SECN,2
EN,51,2,3  !Criando elemento entre os nós acoplamentos das hastes
*REPEAT,49,1,2,2 !repetindo as juntas
D,ALL,UZ,0,,,,,ROTX,ROTY
D,1,ALL ! fixado do topo
D,100,ALL !fixado na bomba

to_skip=0       ! enter number of lines to skip--NONE in this example
/INQUIRE,numlines,LINES,tempofx,txt
/INQUIRE,numlines2,LINES,tempofy,txt
to_read=numlines-to_skip


*DIM,ApForce,TABLE,to_read                ! criandotabela das forcas
*TREAD,ApForce,tempofx,txt,,to_skip

*DIM,ApForce2,TABLE,to_read                ! criandotabela das forcas
*TREAD,ApForce2,tempofy,txt,,to_skip
```

```
/SOLU      !Analisetransiente
ANTYPE,TRANS
AUTOTS,OFF
time=0.183
dt=0.183
*DO,kk,1,145,1
        TIME,time
        F,2,FX,ApForce(kk,1)
        F,2,FY,ApForce2(kk,1)
        time=time+dt
        SOLVE
*ENDDO
FINISH

/post26   !Deslocamentos nos pontos 1 2 3 e 4
nsol,2,23,u,x,disp_no1
store,merge

/post26
nsol,3,46,u,x,disp_no2
store,merge

/post26
nsol,4,60,u,x,disp_no3
store,merge

/post26
nsol,5,83,u,x,disp_no4
store,merge
```

Tabela de Forças x tempo (tempofx.txt e tempofy.txt)

tempo	fx	fy
0,183	-1720,469	-2595,768
0,366	244,189	464,914
0,549	88,110	219,361
0,732	45,396	157,718
0,915	24,987	138,441
1,098	10,640	138,134
1,281	-3,716	149,756
1,464	-21,826	171,621
1,647	-47,591	204,929
1,830	-87,418	255,321
2,013	-157,634	342,299
2,196	-322,582	546,477
2,379	-1207,785	1639,432
2,562	707,200	-1198,047
2,745	187,512	-407,179
2,928	83,321	-243,353
3,111	41,814	-180,053
3,294	19,277	-151,578
3,477	3,474	-139,996
3,660	-10,712	-139,059
3,843	-26,582	-147,278
4,026	-48,726	-169,289
4,209	-88,421	-220,136
4,392	-195,936	-373,044
4,575	-1720,469	-2595,768
4,758	244,189	464,914
4,941	88,110	219,361

5,124	45,396	157,718
5,307	24,987	138,441
5,49	10,640	138,134
5,673	-3,716	149,756
5,856	-21,826	171,621
6,039	-47,591	204,929
6,222	-87,418	255,321
6,405	-157,634	342,299
6,588	-322,582	546,477
6,771	-1207,785	1639,432
6,954	707,200	-1198,047
7,137	187,512	-407,179
7,32	83,321	-243,353
7,503	41,814	-180,053
7,686	19,277	-151,578
7,869	3,474	-139,996
8,052	-10,712	-139,059
8,235	-26,582	-147,278
8,418	-48,726	-169,289
8,601	-88,421	-220,136
8,784	-195,936	-373,044
8,967	-1720,469	-2595,768
9,15	244,189	464,914
9,333	88,110	219,361
9,516	45,396	157,718
9,699	24,987	138,441
9,882	10,640	138,134
10,065	-3,716	149,756
10,248	-21,826	171,621
10,431	-47,591	204,929
10,614	-87,418	255,321
10,797	-157,634	342,299
10,98	-322,582	546,477
11,163	-1207,785	1639,432
11,346	707,200	-1198,047
11,529	187,512	-407,179
11,712	83,321	-243,353
11,895	41,814	-180,053
12,078	19,277	-151,578
12,261	3,474	-139,996
12,444	-10,712	-139,059
12,627	-26,582	-147,278
12,81	-48,726	-169,289
12,993	-88,421	-220,136

13,176	-195,936	-373,044
13,359	-1720,469	-2595,768
13,542	244,189	464,914
13,725	88,110	219,361
13,908	45,396	157,718
14,091	24,987	138,441
14,274	10,640	138,134
14,457	-3,716	149,756
14,64	-21,826	171,621
14,823	-47,591	204,929
15,006	-87,418	255,321
15,189	-157,634	342,299
15,372	-322,582	546,477
15,555	-1207,785	1639,432
15,738	707,200	-1198,047
15,921	187,512	-407,179
16,104	83,321	-243,353
16,287	41,814	-180,053
16,47	19,277	-151,578
16,653	3,474	-139,996
16,836	-10,712	-139,059
17,019	-26,582	-147,278
17,202	-48,726	-169,289
17,385	-88,421	-220,136
17,568	-195,936	-373,044
17,751	-1720,469	-2595,768
17,934	244,189	464,914
18,117	88,110	219,361
18,3	45,396	157,718
18,483	24,987	138,441
18,666	10,640	138,134
18,849	-3,716	149,756
19,032	-21,826	171,621
19,215	-47,591	204,929
19,398	-87,418	255,321
19,581	-157,634	342,299
19,764	-322,582	546,477
19,947	-1207,785	1639,432
20,13	707,200	-1198,047
20,313	187,512	-407,179
20,496	83,321	-243,353
20,679	41,814	-180,053
20,862	19,277	-151,578
21,045	3,474	-139,996

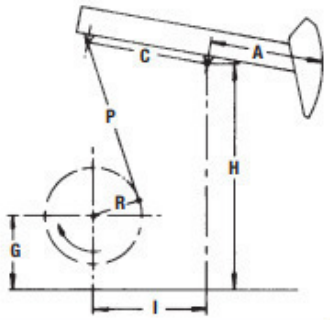
21,228	-10,712	-139,059
21,411	-26,582	-147,278
21,594	-48,726	-169,289
21,777	-88,421	-220,136
21,96	-195,936	-373,044
22,143	-1720,469	-2595,768
22,326	244,189	464,914
22,509	88,110	219,361
22,692	45,396	157,718
22,875	24,987	138,441
23,058	10,640	138,134
23,241	-3,716	149,756
23,424	-21,826	171,621
23,607	-47,591	204,929
23,79	-87,418	255,321

23,973	-157,634	342,299
24,156	-322,582	546,477
24,339	-1207,785	1639,432
24,522	707,200	-1198,047
24,705	187,512	-407,179
24,888	83,321	-243,353
25,071	41,814	-180,053
25,254	19,277	-151,578
25,437	3,474	-139,996
25,62	-10,712	-139,059
25,803	-26,582	-147,278
25,986	-48,726	-169,289
26,169	-88,421	-220,136
26,352	-195,936	-373,044
26,535	-1720,469	-2595,768

ANEXO III

Catálogo geral Lufkin®

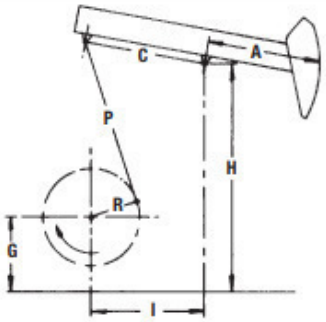
The first "enclosed, geared" pumping unit was built by Lufkin for Humble Oil in 1923. Since then, over 250,000 Lufkin units have been manufactured.



API Geometry Dimensions (inches)

Unit Size	A	C	I	P	H	G	R1, R2, R3, R4	S.U.*	T.F. @ 90°/Stroke Length
C-1824D-305-240	228	120.03	120	226.75	340.00	111.00	60, 53, 46, 39	-2740	111.78/240
C-1280D-305-240	228	120.03	120	226.80	340.00	111.00	60, 53, 46, 39	-2855	111.78/240
C-912D-305-240	228	120.03	120	226.75	340.00	111.00	60, 53, 46, 39	-2740	111.78/240
C-1824D-365-216	235	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-2030	101.31/216
C-1280D-427-192	210	120.03	120	172.50	286.50	111.00	53, 46, 39, 32	-995	90.43/192
C-1824D-365-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1985	90.51/192
C-1280D-365-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1800	90.51/192
C-912D-365-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1800	90.51/192
C-912D-305-192	210	120.03	120	172.50	286.00	111.00	53, 46, 39, 32	-1800	90.51/192
C-912D-365-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-912D-305-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-640D-365-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-640D-305-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-456D-305-168	210	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-1500	80.29/168
C-912D-427-144	180	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-650	68.82/144
C-912D-365-144	180	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-650	68.82/144
C-640D-365-144	180	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	-650	68.82/144
C-640D-305-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-520	68.45/144
C-456D-305-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-520	68.45/144
C-640D-256-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	-400	68.45/144
C-456D-256-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	- 400	68.45/144
C-320D-256-144	180	120.08	120	144.50	260.00	111.00	47, 41, 35	- 400	68.45/144
C-640D-365-120	152	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	570	58.12/120
C-456D-365-120	152	120.03	120	148.50	262.00	111.00	47, 41, 35	570	58.12/120
C-640D-305-120	155	111.09	111	133.50	234.00	96.00	42, 36, 30	-120	57.02/120
C-456D-305-120	155	111.09	111	133.50	234.00	96.00	42, 36, 30	-120	57.02/120
C-456D-256-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	55	57.05/120
C-320D-256-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	55	57.05/120
C-456D-213-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	0	57.05/120
C-320D-213-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	0	57.05/120
C-228D-213-120	155	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	0	57.05/120
C-456D-256-100	129	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	550	47.48/100
C-320D-256-100	129	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	550	47.48/100
C-320D-305-100	129	111.07	111	132.00	232.00	96.00	42, 36, 30	550	47.48/100
C-228D-213-100	129	96.08	96	113.00	196.13	79.13	37, 32, 27	0	48.21/100
C-228D-173-100	129	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	0	48.36/100
C-160D-173-100	129	96.05	96	114.00	195.88	78.88	37, 32, 27	0	48.36/100
C-320D-246-86	111	111.04	111	133.00	232.00	96.00	42, 36, 30	800	40.96/86
C-228D-246-86	111	111.04	111	133.00	232.00	96.00	42, 36, 30	800	40.96/86
C-320D-213-86	111	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	450	41.61/86
C-228D-213-86	111	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	450	41.61/86
C-160D-173-86	111	96.05	96	114.00	195.88	78.88	37, 32, 27	450	41.61/86
C-114D-119-86	111	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	115	40.98/86

*Structural Unbalance in pounds.



API Geometry Dimensions (inches)

Unit Size	A	C	I	P	H	G	R1, R2, R3, R4	S.U.*	T.F. @ 90°/Stroke Length
C-320D-246-74	96	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	800	35.99/74
C-228D-200-74	96	96.05	96	114.00	196.13	79.13	37, 32, 27	800	35.99/74
C-160D-200-74	96	96.05	96	114.00	195.88	78.88	37, 32, 27	800	35.99/74
C-228D-173-74	96	84.05	84	96.00	168.25	69.25	32, 27, 22	450	35.49/74
C-160D-173-74	96	84.05	84	96.00	168.25	69.25	32, 27, 22	450	35.49/74
C-160D-143-74	96	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	300	35.45/74
C-114D-143-74	96	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	300	35.45/74
C-160D-173-64	84	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	550	31.02/64
C-114D-173-64	84	84.05	84	93.75	166.00	69.25	32, 27, 22	550	31.02/64
C-160D-143-64	84	72.06	72	84.00	144.25	57.25	27, 22, 17	360	30.59/64
C-114D-143-64	84	72.06	72	84.00	144.25	57.25	27, 22, 17	360	30.59/64
C-80D-119-64	84	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	0	30.85/64
C-114D-173-54	72	72.06	72	84.00	144.25	57.25	27, 22, 17	500	26.22/54
C-114D-133-54	72	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	330	26.45/54
C-80D-133-54	72	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	330	26.45/54
C-80D-119-54	72	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	300	26.45/54
C-57D-76-54	72	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	0	26.22/54
C-80D-133-48	64	64.00	64	74.50	126.13	51.13	24, 20, 16	440	23.51/48
C-80D-109-48	64	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	320	23.30/48
C-57D-109-48	64	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	320	23.30/48
C-57D-95-48	64	56.05	56	65.63	115.13	47.13	21, 16, 11	320	23.30/48
C-57D-89-42	56	48.17	48	57.50	106.63	45.13	18, 14, 10	150	20.21/42
C-57D-76-42	56	48.17	48	57.50	106.63	45.13	18, 14, 10	150	20.21/42

*Structural Unbalance in pounds.

ANEXO IV

Tabela dos Dados de Redução da caixa de engrenagem por modelo de UB

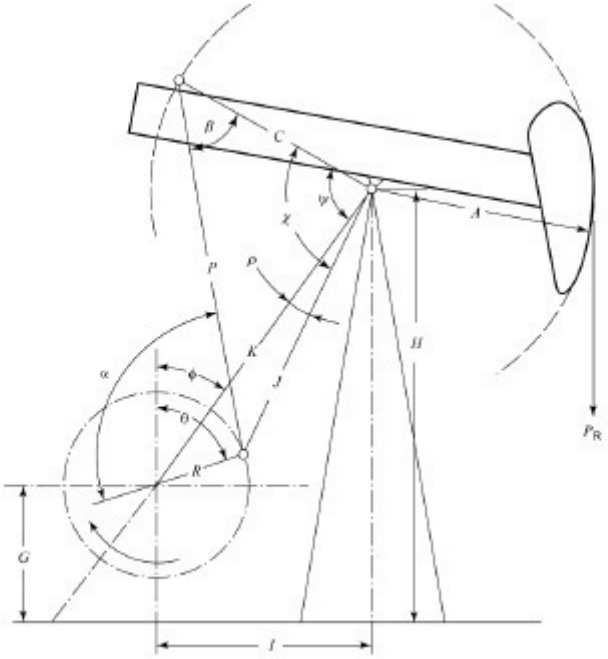
Table 3.22 Typical Technical Data of Pumping Unit Gearboxes

Gearbox Size-	Gear Ratio-	Shaft Diameter		Oil	Sheave Size	
		Mark II, in	Other, in	Capacity, gal	Max. in	Min. in
2560D	34.53 to 1		11.7500	235	68.0	55
1824D	28.33 to 1	10.5000	9.0000	165	68.0	55
1280D	28.05 to 1	10.5000	8.5000	120	68.0	35
912D	28.72 to 1	9.0000	7.0000	107	55.2	33
640D	28.60 to 1	9.0000	7.0000	70	55.6	22
456D	29.04 to 1	9.0000	7.0000	55	50.0	22
320D	30.12 to 1	8.5000	6.4375	50	47.0	24
228D	28.45 to 1	7.0000	6.0000	34	41.0	24
160D	28.67 to 1	7.0000	5.4375	22	38.0	20
114D	29.40 to 1	6.4375	4.4375	17	33.6	20
80D	29.15 to 1		4.4375	17	30.0	20
57D	29.32 to 1		4.0000	13	27.6	20
40D	29.20 to 1		4.0000	7	24.0	20
25D	28.90 to 1		3.0000	5	18.4	
16D	35.70 to 1		2.5000	5	15.3	

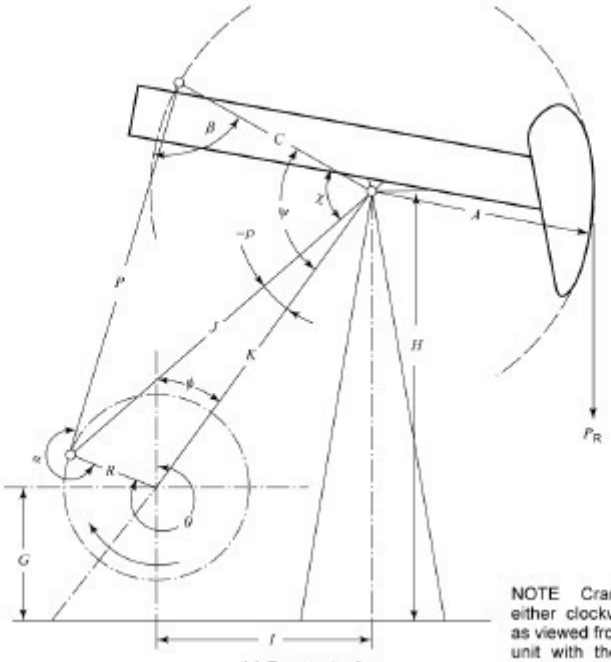
Fonte: Tacaks, p 229.

ANEXO V

Ângulos α, β nos curso ascendente e descendente (API Spec 11E)



a) Upstroke



b) Downstroke

NOTE Crank rotation is defined as either clockwise or counterclockwise as viewed from the side of the pumping unit with the wellhead to the right.

ANEXO VI

```
/PREP7
/units,si ! Unidades SI
ET,1,BEAM188 ! 3-D 2-NODE BEAM
KEYO,1,3,2 ! Função quadrática
KEYO,1,2,1 ! Rígida
SECTYPE,1,BEAM,CSOLID ! secao transversal circular
SECDATA,0.004 ! raio
ET,2,MPC184
KEYO,2,1,0 !RIGID LINK
KEYO,2,2,1 !LANGRAGE
MP,EX,1,200E9 ! Módulo de elasticidade
MP,NUXY,1,0.3 ! coeficiente de poisson
MP,DENS,1,7850      ,!Densidade do material

N,1   !nós da haste
*REPEAT,100,2,0,-0.0133,0
N,2,0,-0.0133,0   !nós das juntas
*REPEAT,100,2,0,-0.0133,0


TYPE,1  ! Definindo tipo do elemento 1 beam188
SECNUM,1
MAT,1
EN,1,1,3  !Criando elemento entre os nós
*REPEAT,99,1,2,2
EN,100,199,200

TYPE,2  ! Definindo tipo do elemento 2 das juntas
SECN,2
EN,101,2,3  !Criando elemento entre os nós acoplamentos das hastes
*REPEAT,99,1,2,2 !repetindo as juntas
!D,ALL,UZ,0,,,,,ROTX,ROTY
!D,1,ALL ! fixado do topo
D,1,UX,0,,,,UY,UZ,ROTX,ROTY
!D,100,ALL !fixado na bomba
D,200,UX,0,,,,UZ,ROTX,ROTY !fixado na bomba

to_skip=0       ! enter number of lines to skip--NONE in this example
/INQUIRE,numlines,LINES,tempofxEXP,txt
/INQUIRE,numlines2,LINES,tempofyEXP,txt
to_read=numlines-to_skip


*DIM,ApForce,TABLE,to_read                ! criando tabela das forcas
*TREAD,ApForce,tempofxEXP,txt,,to_skip

*DIM,ApForce2,TABLE,to_read                ! criando tabela das forcas
```

```
*TREAD,ApForce2,tempofyEXP,txt,,to_skip

/SOLU      !Analise transiente
ANTYPE,TRANS
AUTOTS,OFF
time=0.075
dt=0.075
*DO,kk,1,73,1
        TIME,time
        F,2,FX,ApForce(kk,1)
        F,2,FY,ApForce2(kk,1)
        time=time+dt
        SOLVE
*ENDDO
FINISH

/post26   !Deslocamentos nos pontos 1 2 3 e 4
nsol,2,15,u,x,disp_no1
store,merge

/post26
nsol,3,29,u,x,disp_no2
store,merge

/post26
nsol,4,46,u,x,disp_no3
store,merge

/post26
nsol,5,61,u,x,disp_no4
store,merge
```