



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO-DPET

CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO-CEP

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DA CARTA
DINAMOMÉTRICA DE FUNDO EM POÇOS VERTICAIS**

Camila da Nóbrega Pessoa

Orientadora: Prof. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Junho de 2015

CAMILA DA NÓBREGA PESSOA

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DA CARTA
DINAMOMÉTRICA DE FUNDO EM POÇOS VERTICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2015.

Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Orientadora – UFRN

Prof. Dr. Rutácio de Oliveira Costa
Membro Examinador – UFRN

Engenheiro Gabriel Bessa de Freitas Fuezi Oliva
Membro Examinador – Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de evoluir por meio de mais um desafio.

À minha família por conseguir se fazer presente em cada palavra desse trabalho e em cada etapa da minha jornada.

À minha mãe, por acompanhar tão de perto os meus dias, inclusive a minha vida acadêmica, sendo a minha principal parceira. À você tudo o que eu conquistar.

Ao meu pai, pelo exemplo de honestidade e pelo carinho sem tamanho. Sua doçura, mesmo nas dificuldades, ensina-me a não desistir.

Aos meus irmãos, pela sintonia e cumplicidade. Obrigada por fazerem o que podem para me ver feliz.

Aos meus amigos amados, mesmo os fisicamente distantes, pelas vibrações positivas.

Aos colegas do curso de Engenharia de Petróleo, especialmente Luiza Gevaerd, Natália Nóbrega, Danielle Spínola e Rodrigo Araujo, o meu muito obrigada pela torcida, companheirismo e incentivo.

Aos meus professores, desde o curso de Ciências e Tecnologia aos de Engenharia de Petróleo, que se propuseram a nos passar, além do conteúdo técnico, valores.

À minha orientadora, Carla Maitelli, pela oportunidade, confiança e paciência. Obrigada pelos ensinamentos ao longo desse trabalho.

Ao professor Rutácio Costa, primeiro responsável pelo meu interesse pela área de elevação e programação, pelas orientações.

Ao Engenheiro Fábio Lima, por toda solicitude e ensinamentos.

Ao Laboratório de Automação em Petróleo, em especial o grupo do AUTLEV, Ana Carla Andrade e Ícaro Bezerra, pela troca de conhecimentos e auxílio.

À Gabriel Bessa, Diogo Pocrifka e Lucas Gurgel, por tantas vezes terem parado suas atividades para me ensinarem algo que seria interessante a esse trabalho ou mesmo me incentivar. Vocês foram exemplos de profissionais generosos.

À Regina Azevedo, que sempre vibrou por cada uma das minhas vitórias, fazendo-me sentir parte de uma família de luz, e que continuará a emanar amor pela eternidade, um agradecimento especial e repleto de saudades.

RESUMO

Atualmente, na indústria petrolífera, a utilização de métodos de elevação artificial vem sendo decisiva para que um poço permaneça economicamente viável ou volte a produzir. Dentro da área da elevação artificial existem muitos métodos com aplicabilidades e limitações próprias, sendo um deles o bombeio mecânico, o qual predomina frente aos outros em número de poços. Diante dessa supremacia do método, faz-se necessário entender melhor o seu funcionamento. Para tanto, tem-se a carta dinamométrica, ferramenta imprescindível para analisar o desempenho de um sistema de bombeio mecânico e detectar possíveis anomalias. Existem dois tipos de cartas dinamométricas, a de superfície, de aquisição mais viável, e a carta dinamométrica de fundo, a qual retrata claramente o comportamento da bomba de fundo, sendo, portanto, a desejada para análise. Esse trabalho fez uso do método diagnóstico desenvolvido por Everitt e Jennings (1992), no qual a equação da onda amortecida é solucionada por diferenças finitas, permitindo obter uma carta dinamométrica de fundo a partir de uma carta de superfície, inclusive para poços com coluna de hastes combinadas. Implementou-se uma ferramenta computacional para gerar cartas de fundo e, a partir dela, determinar a vazão de líquido na superfície. Cartas para poços com hastes simples e combinadas foram geradas e esses resultados foram comparados com os obtidos por um programa comercial, provando-se a eficácia da ferramenta computacional. Por fim, desenvolveu-se o projeto de um protótipo de unidade de bombeio para fins educacionais, capaz de retratar o modo de funcionamento de uma unidade de bombeio real.

Palavras-chave: Elevação Artificial, Bombeio Mecânico, Carta Dinamométrica, Carta de Fundo.

ABSTRACT

Currently, in the petroleum industry, the use of artificial lifting methods has been decisive to allow a well to stay economically viable or to produce again. In the area of artificial lifting there are many methods with their own limitations and applicabilities, being one of them the sucker rod pumping system, which predominates in comparison with other methods in number of wells. Given this supremacy of the method, it is necessary to have a better understanding of its functioning. To this purpose, there is the dynamometer card, indispensable tool for analyzing the performance of a sucker-rod pumping system and detect possible anomalies. There are two kinds of dynamometer cards, the surface dynamometer card, more feasible to acquire, and the downhole dynamometer card, which clearly shows the behavior of the pump, being, therefore, the desired for analysis. In this work, the diagnostic method developed by Everitt and Jennings (1992) is used, in which the damped wave equation is solved by finite differences, allowing generating a downhole dynamometer card from a surface card, including wells with tapered sucker-rod string. A computational tool was implemented to generate downhole cards and from them determine the fluid flow on the surface. Cards for wells with tapered and straight sucker-rod strings were generated and these results were compared to the ones obtained by a commercial software, proving the effectiveness of the computational tool. Finally, the project of a prototype of a pumping unit was developed, for educational purposes, able to represent the way that a real pumping unit operates.

Keywords: Artificial Lifting, Sucker-Rod Pumping, Dynamometer Cards, Downhole cards.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 DIVISÃO DO TRABALHO.....	14
2. ASPECTOS TEÓRICOS.....	16
2.1 ELEVAÇÃO DE PETRÓLEO	16
2.1.1 Métodos de elevação artificial.....	17
2.2 BOMBEIO MECÂNICO.....	18
2.2.1 Componentes do sistema de bombeio mecânico.....	19
2.3 CARTA DINAMOMÉTRICA.....	25
2.3.1 Carta dinamométrica de fundo.....	28
2.3.2 Método de Everitt e Jennings.....	29
3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	37
3.1 METODOLOGIA PARA O PROTÓTIPO	37
3.2 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA CARTA DE FUNDO	39
3.2.1 Dados de entrada.....	41
3.2.2 Estrutura de decisão.....	44
3.2.3 Cálculo da vazão.....	47
3.2.4 Poços utilizados.....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 PROTÓTIPO.....	51
4.1.1 Tripé	52
4.1.2 Balancim.....	52
4.1.3 Viga Equalizadora.....	53
4.1.4 Cabeça da unidade de bombeio.....	53
4.1.5 Contrapesos.....	54

4.1.6 Biela	55
4.2 CARTA DE FUNDO	55
5. CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO.....	71

Lista de Figuras

Figura 2.1. Esquema da Unidade de bombeio: (a) cabresto seguido de haste polida, (b) revestimento, (c) coluna de produção, (d) coluna de haste, (e) pistão, (f) camisa e (g) balancim.....	20
Figura 2.2. Componentes de uma unidade de bombeio mecânico.	22
Figura 2.3. Esquema de um ciclo de bombeio.....	25
Figura 2.4. Idealização de uma carta dinamométrica de superfície.....	27
Figura 2.5. Esquema de uma carta real de superfície.	27
Figura 2.6. Principais padrões para carta de fundo.....	28
Figura 2.7. Esquema para mostrar a perda de informações ao longo da haste.....	34
Figura 2.8. Exemplo de função periódica : (i): início e (f) fim.	35
Figura 3.1. Fotografia da unidade de bombeio, NUPEG/UFRN.....	37
Figura 3.2. Interface da ferramenta computacional.....	40
Figura 3.3. Formulário para entrada de dados.	40
Figura 3.4. Fluxograma indicando o funcionamento geral da ferramenta computacional.....	41
Figura 3.5. Mensagem de erro diante de condição de instabilidade.....	44
Figura 3.6. Fluxograma para a estrutura de decisão.	46
Figura 3.7. Carta de fundo para exemplificar a obtenção do curso útil do pistão.	48
Figura 4.1. Esquema geral da unidade de bombeio.....	51
Figura 4.2. Tripé (superior) e mancal central (inferior).	52
Figura 4.3. Balancim em perfil I e mancal central.	53
Figura 4.4. Mancal equalizador (a) e viga equalizadora (b).....	53
Figura 4.5. Cabeça da UB.....	54
Figura 4.6. Contrapeso e manivela.	54
Figura 4.7. Biela	55
Figura 4.8. Cartas de superfície e de fundo para o poço 1.	56
Figura 4.9. Resumo dos dados para poço 1.	57
Figura 4.10. Cartas de superfície e de fundo para o poço 2.	58
Figura 4.11. Resumo dos dados para o poço 2.	59
Figura 4.12. Carta de superfície e de fundo para o poço 3.....	60
Figura 4.13. Resumo dos dados para o poço 3.	61
Figura 4.14. Carta de superfície e de fundo para o poço 4.....	62

Figura 4.15. Carta de superfície e de fundo para o poço 5.....63

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens do bombeio mecânico.....	19
Tabela 3.1. Orçamento para escolha do material da unidade de bombeio	38
Tabela 3.2. Peso linear para um dado diâmetro.....	43
Tabela 3.3. Dados de entrada para cada poço.....	49
Tabela 3.4. Dados para os dois poços com hastes combinadas de diferentes materiais.....	49

Lista de Símbolos e Abreviaturas

BCP	Bombeio por Cavidades Progressivas
BCS	Bombeio Centrífugo Submerso
BHJ	Bombeio Hidráulico a Jato
BM	Bombeio Mecânico
BSW	Percentual de água e sedimentos no fluido (<i>Basic Sediment and Water</i>)
CDS	Carta Dinamométrica de Superfície
CDF	Carta Dinamométrica de Fundo
EDP	Equação Diferencial Parcial
UB	Unidade de Bombeio
A	Área transversal da haste, pol^2
c	Coefficiente de amortecimento, s^{-1}
$d_{\text{água}}$	densidade da água, adimensional
d_{fluido}	densidade do fluido, adimensional
$d_{\text{óleo}}$	densidade do óleo, adimensional
d_p	diâmetro do pistão, pol
E	Módulo de Elasticidade, psi
E_v	Eficiência Volumétrica, adimensional
F_{PR}	Carga na haste polida, lbf
g_c	Fator de conversão de unidades, $32,2 \text{ lbm-pés/lbf-s}^2$
k	Fator de calibração para vazão, adimensional
L_r	Comprimento de uma seção da coluna de hastes, pés

N	Número de ciclos por minuto
$Núm_{CDS}$	Número de pontos da carta dinamométrica de superfície
$Núm_{nós}$	Número de nós por seção
Q_{carta}	Vazão calculada pela carta de fundo, m ³ /dia
$Q_{prevista}$	Vazão prevista, m ³ /dia
Q_{teste}	Vazão de teste, m ³ /dia
S_p	Curso bruto do pistão, pol
S_u	Curso útil, pol
t	Tempo, s
T	Período, s
u	deslocamento da haste, pés
v	Velocidade de propagação da força nas hastes, pés/s
W	Peso da coluna de hastes no ar, lbf
W_r	Peso linear de uma seção de hastes para um dado diâmetro, lbf/pés
W_{rf}	Peso da coluna de hastes no fluido, lbf
x	Distância axial ao longo da coluna de hastes, pés
ρ	Massa específica da haste, lbf/pés ³

Capítulo 1

Introdução

1. INTRODUÇÃO

Com o advento de novas tecnologias em toda a cadeia que engloba a produção do petróleo, desde a área de reservatórios, passando pela sua produção, tratamento e comercialização, a indústria petrolífera ganhou ainda mais força econômica, tornando-se um setor estratégico e com grande potencial de aprimoramento.

Uma área de estudo, em destaque na indústria petrolífera, corresponde à elevação artificial de petróleo. Segundo Weiszflog (2012), o termo artificial se refere à algo produzido pela habilidade humana para imitar a natureza. Logo, pode-se inferir que a técnica consiste em fornecer ao poço algo adicional, que ele apresenta em pouca, ou nenhuma, quantidade. Esse algo, no caso da elevação, substitui-se por energia.

A produção de petróleo é dependente de diferenciais de pressão entre os terminais dos trechos pelos quais o fluido percorre. Para garantir a produção é necessário que a pressão de fundo seja grande o suficiente para sobrepor a totalidade das perdas de pressão presentes ao longo do trecho que o fluido percorre até atingir a superfície. Caso essa exigência não seja cumprida, tem-se a “morte” do poço, que ainda pode acontecer em função do aumento das perdas de pressão, por razões como restrições, tamanhos reduzidos de coluna ou queda na produção de gás. Frente ao quadro de “morte” do poço, a elevação artificial se enquadra para propiciar que esse volte a produzir. Mas, aplica-se também a elevação para aumentar a produtividade de um poço que ainda não chegou ao “fim” (TAKÁCS, 2003).

Existem diversos métodos de elevação artificial, cada um com suas limitações e aplicabilidades, de tal forma que a escolha de um método requer um estudo prévio de parâmetros do reservatório como sua profundidade, razão gás-líquido, vazão e viscosidade dos fluidos. Além disso, é preciso saber a que condições os equipamentos — específicos para cada métodos — estariam submetidos, como temperatura e produção de sólidos.

Esses métodos podem ser classificados em métodos de bombeamento e pneumáticos. Entre os de bombeamento há aqueles acionados por hastes, no qual o bombeio mecânico se enquadra, e os que operam a bomba de fundo sem intermédio de uma coluna de hastes, exigindo, portanto, outros métodos de acionamento, como o elétrico ou hidráulico. Já os pneumáticos atuam por meio da injeção de gás comprimido.

O bombeio mecânico prevalece em número de poços frente a outros métodos. Essa supremacia, contudo, não data de hoje. Everitt e Jennings (1992) afirmaram que 85% a 90% dos poços nos Estados Unidos eram bombeados por hastes. Atualmente, à nível mundial,

cerca de 71% dos poços que usam algum método de elevação artificial são equipados com o bombeio mecânico. No Brasil o método também é dominante, sendo usado em 73,5% dos poços produtores de petróleo (PETROBRAS, 2014 *apud* LIMA, 2014).

Dada a importância do método na área de elevação, optou-se por enfatizá-lo nesse trabalho. Primeiramente desejou-se projetar um protótipo articulado de uma unidade de bombeio, capaz de retratar as suas partes e funcionamento. Como futuramente esse protótipo será automatizado, gerando, por exemplo, cartas dinamométricas, optou-se também pelo desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de gerar, por métodos numéricos, a carta dinamométrica de fundo, que retrata as condições da bomba de fundo, a partir de uma carta dinamométrica de superfície, obtida mais facilmente por sensores. O modelo adotado para gerar a carta dinamométrica de fundo baseia-se no trabalho de Everitt e Jennings (1992), sendo aplicado apenas a poços verticais.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um projeto de protótipo de unidade de bombeio e criação de uma ferramenta computacional capaz de gerar cartas dinamométricas de fundo a partir de uma carta dinamométrica de superfície, utilizando o método numérico proposto por Everitt e Jennings (1992).

1.2 DIVISÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo a temática do trabalho é exposta, bem como os seus objetivos. No capítulo dois, tem-se o embasamento teórico diretamente relacionado ao trabalho, facilitando a compreensão dos capítulos que o sucedem. No capítulo três a metodologia para o desenvolvimento do protótipo da unidade de bombeio e da ferramenta computacional é exposta. No quarto capítulo os resultados são mostrados, e, por fim, o quinto capítulo aborda as conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo os fundamentos teóricos diretamente relacionados com esse trabalho são discutidos de forma sequencial, auxiliando o seu entendimento.

2.1 ELEVACÃO DE PETRÓLEO

Para compreender a elevação artificial, enfatizada nesse trabalho, é necessário partir, primeiramente, do que seria a elevação natural.

A elevação em petróleo consiste no fluxo do fluido no poço em direção à superfície. Quando esse processo faz uso apenas da energia natural do poço, esse chama-se surgente e a elevação é dita natural. Essa “surgência” ocorre, para a maioria dos poços, nos primeiros estágios da sua vida e requer que ele apresente uma pressão de fluxo no fundo do poço superior às perdas de pressão ao longo do trajeto do fluido à superfície. Quando esse requisito não é cumprido, o poço “morre”, ou seja, deixa de fluir naturalmente e requer a intervenção externa através da aplicação de uma energia extra.

A morte do poço pode decorrer de duas situações distintas. Na primeira, com a produção dos fluidos do reservatório, ocorre uma redução gradual da pressão do reservatório que não mais consegue sobrepor as perdas de pressão do poço. No outro caso, problemas mecânicos, como restrições ou mudanças na composição do fluido (como a queda na produção de gás), provocam um aumento na resistência ao fluxo, ou seja, há um incremento nas perdas de pressão, que, ao superar a pressão de fundo, faz com que o poço deixe de ser surgente.

Diante da morte do poço, ou apenas visando um aumento na vazão de produção, surge a necessidade de uma energia extra, provida por meio da aplicação dos métodos de elevação artificial e seus equipamentos característicos. Esses métodos, mais amplamente discutidos a seguir, têm o objetivo comum de fornecer energia para que o fluido consiga chegar à superfície. Porém, apresentam limitações particulares, sendo então aplicados em condições específicas (TAKÁCS, 2003).

2.1.1 Métodos de elevação artificial

Os métodos de elevação artificial podem ser separados de acordo com diferentes classificações. Uma delas os divide em três mecanismos. O primeiro engloba o uso de uma bomba no fundo do poço para aumentar a pressão no fundo, tornando-a superior às perdas de pressão. No segundo, considera-se o uso de gás comprimido, injetando-o abaixo do fluido presente no poço, de forma que a energia de expansão do gás desloque golfadas de líquido à superfície. Por fim, no terceiro mecanismo o objetivo não é aumentar a pressão de fundo e sim reduzir as perdas de pressão por meio da injeção contínua de gás na coluna de produção, sob altas pressões, gaseificando o fluido e assim permitindo que a pressão de fundo seja capaz de elevar os fluidos. Todavia, outra classificação é adotada mais frequentemente em detrimento da mencionada anteriormente. Nessa, os métodos de elevação são separados em dois grupos: sistemas de bombeio e pneumáticos (TAKÁCS, 2003).

2.1.1.1 Métodos pneumáticos

Nesse grande grupo estão compreendidos os métodos que injetam gás comprimido na coluna em algum ponto no fundo do poço. Os três principais métodos são: *plunger lift*, *gas lift* intermitente e *gas lift* contínuo.

No *gas lift* contínuo, o gás é injetado continuamente e de forma controlada, com vazão constante, na coluna de fluido, deixando-o aerado e assim reduzindo a componente hidrostática da perda de carga entre o fundo e a cabeça do poço. Isso permite que a pressão original de fundo do poço seja suficiente para vencer as perdas e elevar a mistura gás-líquido.

Já no *gas lift* intermitente, diferentemente do anterior, as injeções são intervaladas, como o nome sugere. Os intervalos entre as injeções dependem do tempo que um nível suficiente de líquido se acumula na coluna. Quando esse nível é atingido, um grande volume de gás é injetado abaixo dessa coluna, empurrando a coluna de líquido até a superfície em forma de golfadas.

Finalmente, assemelhando-se ao *gas lift* intermitente, tem-se o *plunger lift*. Nesse método um pistão especial se desloca no interior da coluna, separando a golfada de líquido do gás injetado abaixo. Dessa forma, o pistão impede o retorno do líquido ao fundo do poço, também conhecido como *fallback*.

2.1.1.2 Métodos de bombeamento

O outro grande grupo dos métodos de elevação artificial engloba os que funcionam através do bombeamento. A principal classificação entre os métodos considera a forma de acionamento dessas bombas e se o bombeio se dá por intermédio de hastes.

Na classificação de bombeio por hastes, uma coluna de hastes é conectada entre a bomba de fundo e o sistema de acionamento localizado na superfície. De acordo com a bomba empregada a haste irá oscilar ou rotacionar. O método dominante para essa classificação é o Bombeio Mecânico (BM), que posteriormente é mais aprofundado por se tratar do principal método abordado neste trabalho.

Outro método importante nessa categoria é o Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP), que atua por meio de uma bomba de cavidades progressivas, formada por um rotor em formato de hélice simples externa que gira dentro de um estator na forma de hélice dupla interna, transferindo assim energia ao fluido (VIDAL, 2005).

No bombeio sem hastes, a bomba de fundo é acionada através de sistemas elétricos ou hidráulicos. Fazendo uso da eletricidade, tem-se o Bombeio Centrífugo Submerso (BCS), no qual um cabo elétrico partindo da superfície fornece energia a um motor de subsuperfície que aciona uma bomba centrífuga de vários estágios, sendo esse método empregado para altas vazões de líquido. Já o Bombeio Hidráulico a Jato (BHJ) faz uso da injeção de um fluido hidráulico, que se mistura com o fluido produzido e ao passar por um difusor converte a energia de uma corrente de jato de alta velocidade em trabalho para elevar os fluidos.

2.2 BOMBEIO MECÂNICO

O método de bombeio mecânico é antigo, tendo surgido pouco após o nascimento da indústria petrolífera. Apesar dos materiais e das fontes energéticas terem evoluído, o mecanismo de funcionamento persiste. A elevação acontece devido à unidade de bombeio que transforma o movimento rotativo de um motor em alternativo e o transmite à bomba de fundo, instalada no fundo do poço por intermédio de uma coluna de hastes (BARRETO FILHO, 1993).

Brown (1982) realizou um estudo sobre elevação artificial, abordando os requisitos para a escolha de um método em detrimento de outro, citando vantagens e desvantagens de cada. Para o bombeio mecânico, alguns desses aspectos são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens do bombeio mecânico.

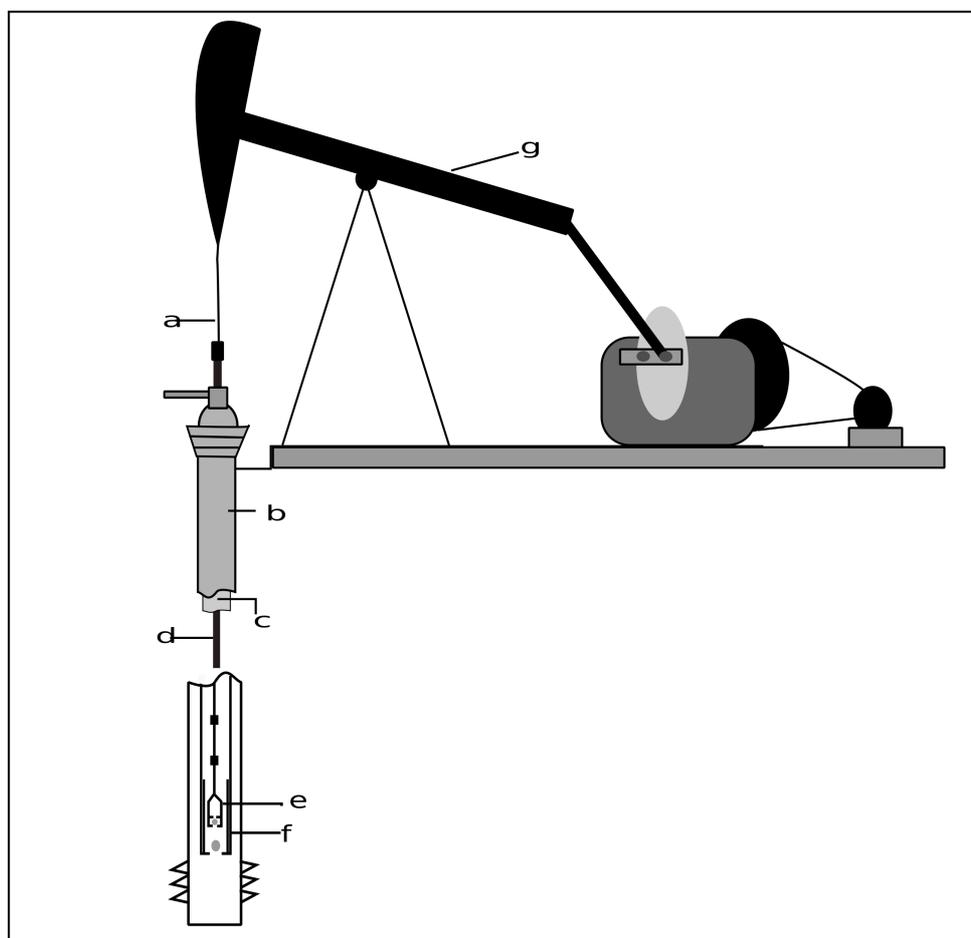
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Projeto relativamente simples; • Unidades facilmente intercambiáveis para outros poços com custo mínimo; • Eficiente, simples e de fácil operação para os funcionários de campo; • Aplicado até o fim da vida de um poço ou ainda até abandono, se operado sob condições adequadas; • Pode ter sua capacidade de bombeamento alterada diante de mudanças no índice de produtividade do poço; • Aplicável para poços com múltiplas completações; • Pode bombear um poço de baixa pressão; • Tratamentos de combate à corrosão ou incrustação com fácil aplicação; • Analisável; • Disponível em diferentes tamanhos; • Hastes de menor diâmetro disponíveis; • Bomba de fundo capaz de bombear fluido em ambos os cursos ascendente e descendente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poços direcionais apresentam problemas de fricção; • Produção de sólidos pode acarretar problemas; • Poços com gás apresentam baixa eficiência volumétrica; • Limitado quanto à profundidade, principalmente em função da capacidade das hastes; • Unidade de bombeio grande, exigindo grande área superficial e causando poluição visual; • Não voltado para operações <i>offshore</i>; • Suscetível à problemas com parafinas; • H₂S limita a profundidade em que uma bomba de grande volume pode ser instalada; • Limitação no projeto da bomba de fundo para revestimentos de pequeno diâmetro.

2.2.1 Componentes do sistema de bombeio mecânico

O método funciona por meio de seus elementos específicos, divididos entre componentes de superfície e de subsuperfície. Os componentes de superfície são o motor, o

reductor, a unidade de bombeio, a haste polida e a cabeça do poço. Já a parte de subsuperfície é constituída pela coluna de hastes, bomba de fundo e a camisa. Essas partes estão mostradas na Figura 2.1.

Figura 2.1. Esquema da Unidade de bombeio: (a) cabresto seguido de haste polida, (b) revestimento, (c) coluna de produção, (d) coluna de haste, (e) pistão, (f) camisa e (g) balancim.

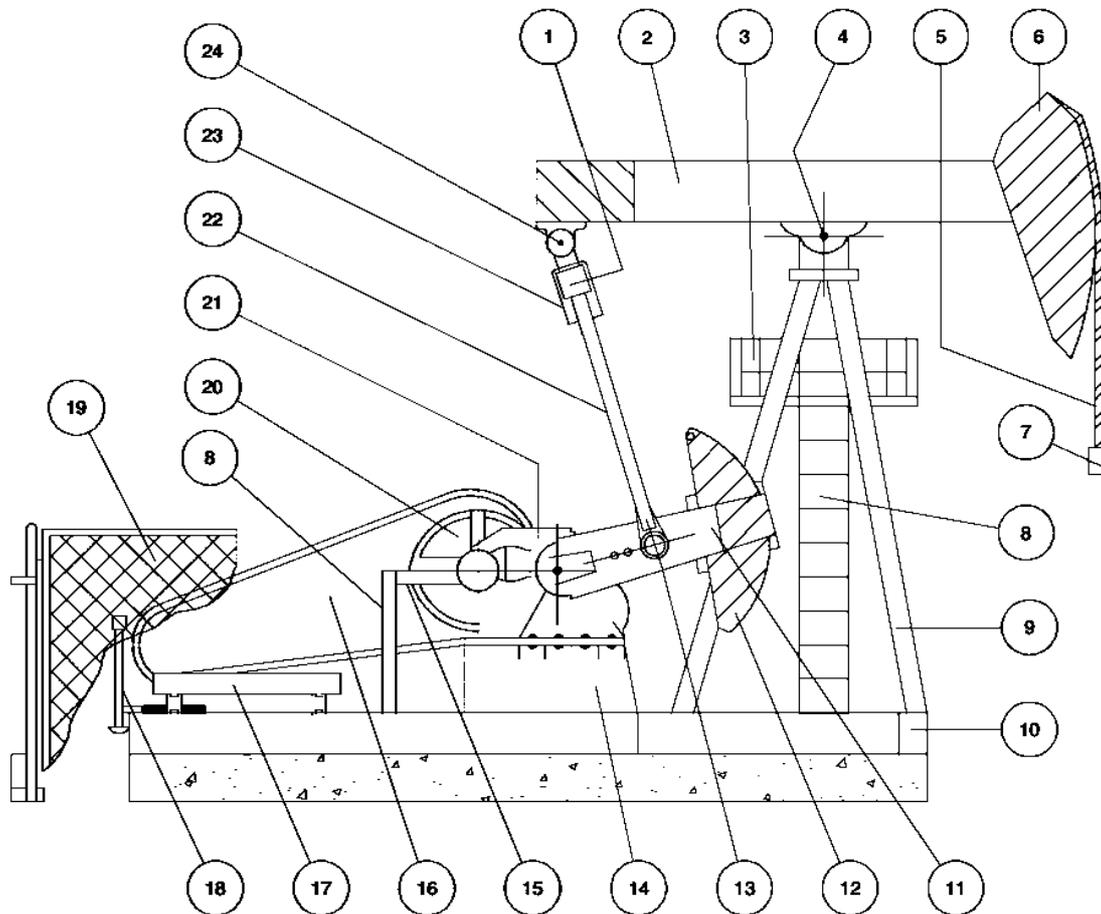


Fonte: Autor.

Descrevendo primeiramente as partes de superfície e suas funcionalidades, tem-se que a força motriz do sistema de bombeio mecânico advém de um motor elétrico ou a gás. Pelo fato de sua velocidade de rotação ser muito alta, surge a importância do reductor, o qual reduz essa velocidade, adequando-a uma velocidade de bombeio desejada. O movimento rotativo do reductor é então transmitido à Unidade de Bombeio (UB), que como já anteriormente aludida, transforma-o em movimento alternativo, o qual é exigido pela bomba de fundo.

A unidade de bombeio, considerada o símbolo do bombeio mecânico, é composta por algumas partes, sendo o balancim a principal delas, operando segundo o princípio de uma alavanca mecânica. Os demais componentes estão presentes na Figura 2.2.

Figura 2.2. Componentes de uma unidade de bombeio mecânico.



1	VIGA EQUALIZADORA	13	MANCAL MANIVELA OU PROPULSOR
2	VIGA PRINCIPAL	14	BASE DO REDUTOR
3	PLATAFORMA DE ACESSO AO MANCAL CENTRAL	15	PLATAFORMA DE ACESSO AO REDUTOR
4	MANCAL CENTRAL	16	PROTETOR DE CORREIAS
5	CABRESTO	17	BASE DO ACIONADOR
6	CABEÇA DA UB	18	ALAVANCA DE FREIO
7	MESA DO CABRESTO	19	GRADE DE PROTEÇÃO
8	ESCALA	20	POLIA DO REDUTOR
9	TRIPÉ	21	REDUTOR
10	BASE METÁLICA ("SKID")	22	BIELA OU BRAÇO
11	MANIVELA	23	MANCAL LATERAL VIGA EQUALIZADORA
12	CONTRAPESO	24	MANCAL EQUALIZADOR

Fonte : COSTA, 2008.

Entre a unidade de bombeio e a coluna de hastes está a haste polida, a qual, além de ser o elo entre os dois componentes, garante uma superfície de vedação na cabeça do poço, mantendo os fluidos dentro do poço. Essa vedação é proporcionada pela caixa de engaxetamento que sela na haste polida e é parte da cabeça do poço. A cabeça ainda contém um acoplamento que direciona os fluidos elevados à linha de produção.

Continuando a sequência da transmissão do movimento, tem-se a coluna de hastes, a qual já faz parte dos componentes de subsuperfície. A coluna de hastes, que se movimenta no interior da coluna de produção, é constituída de hastes com 25 pés de comprimento, conectadas umas às outras por meio de luvas. A coluna é a parte vital do sistema de bombeio, uma vez que sua operação eficaz é determinante para o funcionamento de todo o sistema, sendo indispensável a sua padronização, definida pela norma API SPEC 11B. A coluna de hastes pode ser do tipo simples ou combinada. Na simples, a coluna é composta apenas por uma seção, logo com hastes de mesmo diâmetro, enquanto a coluna combinada é formada por hastes de seções distintas, ou seja, com diâmetros variantes, podendo até as seções serem de materiais diferentes (COSTA, 2008).

Diretamente conectado à coluna de hastes está o pistão, a parte móvel da bomba de fundo. Em sua parte inferior encontra-se a válvula de passeio, que recebe esse nome por ficar se movimentando com o pistão durante o bombeamento. Já a parte fixa da bomba de fundo é chamada de camisa, a qual também apresenta em sua extremidade inferior uma válvula, chamada válvula de pé. Essa funciona como uma válvula de sucção para a bomba de fundo, enquanto a de passeio é uma válvula de descarga.

Dada a importância de alguns componentes para o sistema de bombeio mecânico, um maior detalhamento desses foi feito na sequência.

2.2.1.1 Bomba de fundo

A bomba de fundo, já mencionada, é formada pelo pistão, camisa-cilíndrica e suas respectivas válvulas de passeio e de pé. Essa bomba funciona segundo o princípio de deslocamento positivo e as válvulas, ao passo que abrem e fecham, conforme o pistão realiza seu movimento alternativo, permitem que os fluidos sejam elevados.

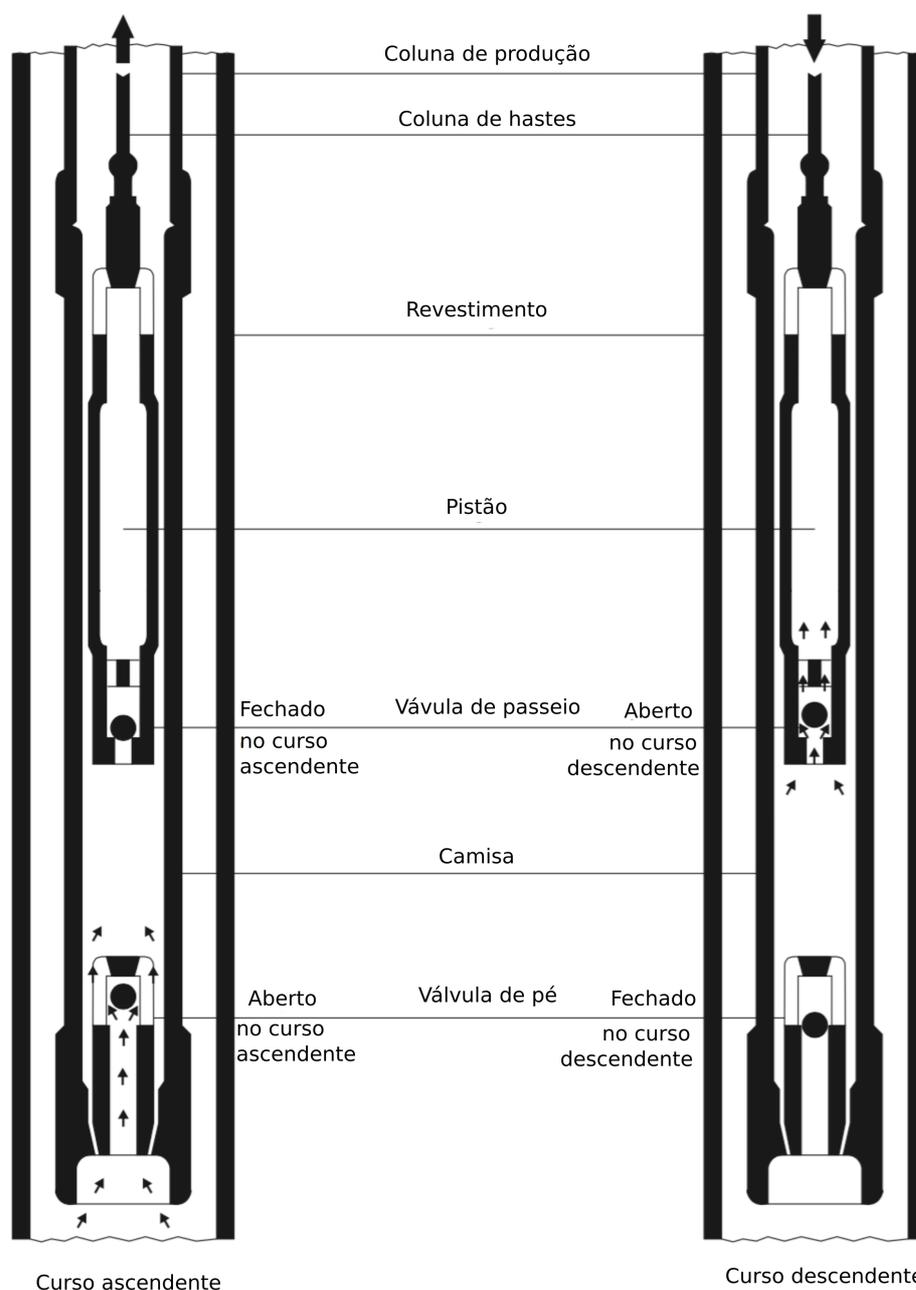
A bomba de fundo pode ser do tipo insertável ou tubular. Na primeira a camisa é instalada no interior da coluna de produção, sendo solidária à coluna de hastes. Já para bombas tubulares, a camisa é solidária à coluna de produção, sendo conectada à sua

extremidade inferior. Diferentemente da camisa que é fixa, o pistão se movimenta graças à coluna de hastes, realizando, portanto, um movimento alternativo. O movimento ascendente e descende do pistão quando completos forma um ciclo de bombeio (COSTA, 2008).

Para entender como o fluido é deslocado até a superfície, faz-se necessário entender o que ocorre durante os dois cursos que juntos formam um ciclo, assim como mostra a Figura 2.3. No início do curso ascendente, o pistão está na sua posição mais baixa e a válvula de passeio se encontra fechada devido à pressão hidrostática acima da válvula, na coluna de produção. Esse líquido que está sobre a válvula, na coluna, é então elevado à superfície, ao passo que o pistão ascende. Ao mesmo tempo, a pressão cai entre as válvulas de passeio e de pé, permitindo que a válvula de pé abra. Dessa forma, o líquido escoar da formação até a camisa, por meio da válvula de pé que está aberta, acumulando-se abaixo do pistão até que o curso ascendente chegue ao fim. Nesse curso, a coluna de hastes sofre uma elongação, uma vez que ela, juntamente com o pistão, suporta todo o peso da coluna de líquido que está sendo levada à superfície.

Após o final desse curso ascendente, a haste alongada tende a voltar para o equilíbrio. Portanto, move-se para baixo, dando início ao curso descendente, como ainda pode ser observado na Figura 2.3. No início desse curso, a válvula de passeio abre e a de pé fecha (considerando a incompressibilidade do fluido). O pistão desce com sua válvula de passeio aberta, indo ao encontro do líquido de formação que foi acumulado na coluna. Com a abertura da válvula de passeio, o peso do líquido é transferido do pistão para a válvula de pé, gerando a elongação da coluna de produção. Ao final desse curso, a coluna de hastes inverte a direção do seu movimento, dando início a outro curso ascendente, e, portanto, a outro ciclo. Desta forma, a coluna volta ao seu estado de equilíbrio ao transferir o peso novamente para o pistão (TAKÁCS, 2003).

Figura 2.3. Esquema de um ciclo de bombeio.



Fonte: Adaptado de API (2000)

2.3 CARTA DINAMOMÉTRICA

A carta dinamométrica é uma ferramenta essencial para analisar as condições de um poço, além de ser a principal forma de avaliar um sistema de bombeio mecânico, uma vez que permite identificar se há alguma anomalia no sistema. A carta trata-se de um gráfico contínuo de carga por posição (ARAUJO JÚNIOR, 2014).

Existem Cartas Dinamométricas de Superfície (CDS) e de Fundo (CDF). A de superfície é medida na haste polida, através de um dinamômetro, mostrando a carga atuante nessa haste em função da sua posição durante um ciclo de bombeio. O formato dessa carta deveria representar a condição da bomba de fundo, contudo, conforme a informação é transferida por meio da coluna de hastes, há um efeito de ruído adicional que distorce a informação, sendo assim a carta de superfície formada pela condição da bomba de fundo mais esse ruído. Com o aumento da profundidade o ruído também aumenta e conseqüentemente há uma maior dificuldade na interpretação da carta de superfície (BARRETO FILHO *et al.*, 1996).

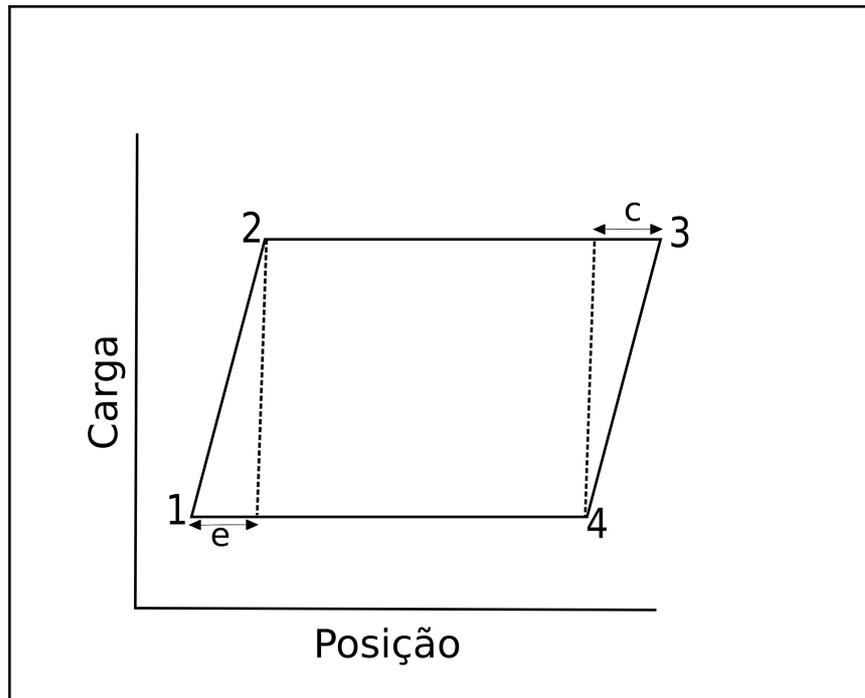
Uma carta de superfície pode assumir diferentes formas, já que essa sofre influência de muitos parâmetros e dos diversos tipos de anomalia existentes para um sistema de BM. Dessa forma, interpretar uma carta de superfície seria considerado uma arte (TAKÁCS, 2003 *apud* ARAUJO JÚNIOR, 2014).

Uma idealização da carta dinamométrica de superfície pode ser vista na Figura 2.4. A descrição da carta é facilitada por meio dos índices (1, 2, 3 e 4) indicados nessa figura. As letras “c” e “e” indicam a compressão e alongação da coluna de hastes, respectivamente. Os índices representam:

- 1: A válvula de passeio se fecha no início do curso ascendente.
- 1-2: As hastes estão sendo alongadas já que a carga da coluna de fluido é transferida para a coluna de hastes (e-elongamento).
- 2: Transferência está completa e a haste está totalmente alongada. Nesse ponto o pistão se move para cima e a válvula de pé abre.
- 2-3: Curso ascendente, com carga constante.
- 3: Fim do curso ascendente. O pistão começa o curso descendente e a válvula de pé fecha.
- 3-4: Hastes voltam para a posição de equilíbrio e a carga da coluna de fluido é transferida para a coluna de produção, que agora sofre a alongação.
- 4: Quando a transferência da carga da haste para a válvula de pé está completa o pistão começa a se mover para baixo e a válvula de passeio abre.
- 4-1: curso descendente, com carga constante.

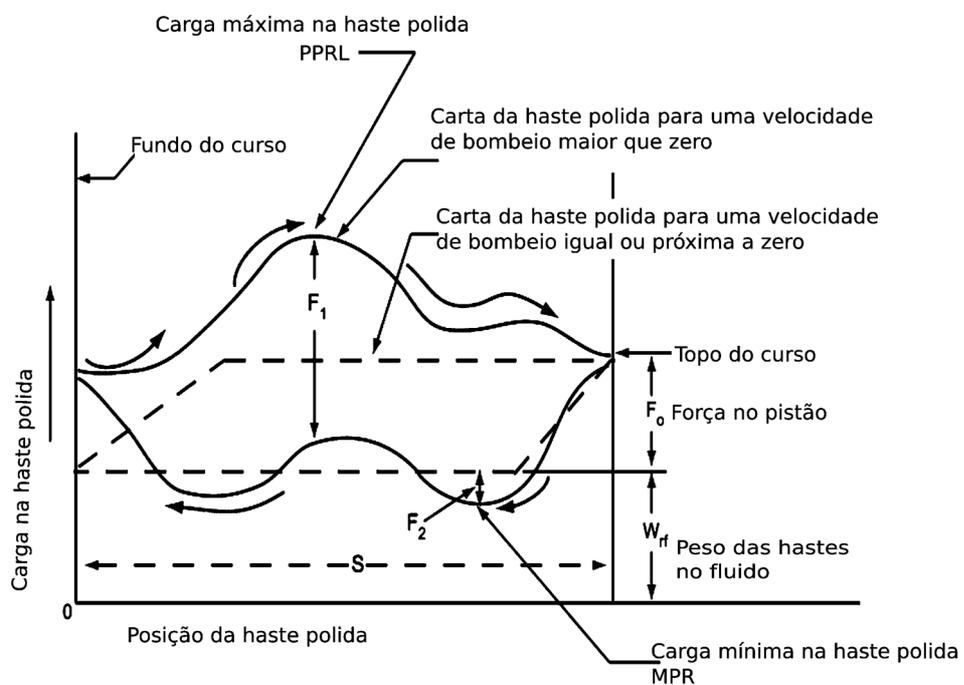
Já na Figura 2.5 é possível ver o esquema carta de superfície real, na qual se observa que não mais há um formato retangular e sim distorcido, resultante do ruído.

Figura 2.4. Idealização de uma carta dinamométrica de superfície.



Fonte: Adaptado de GOMES (2009)

Figura 2.5. Esquema de uma carta real de superfície.



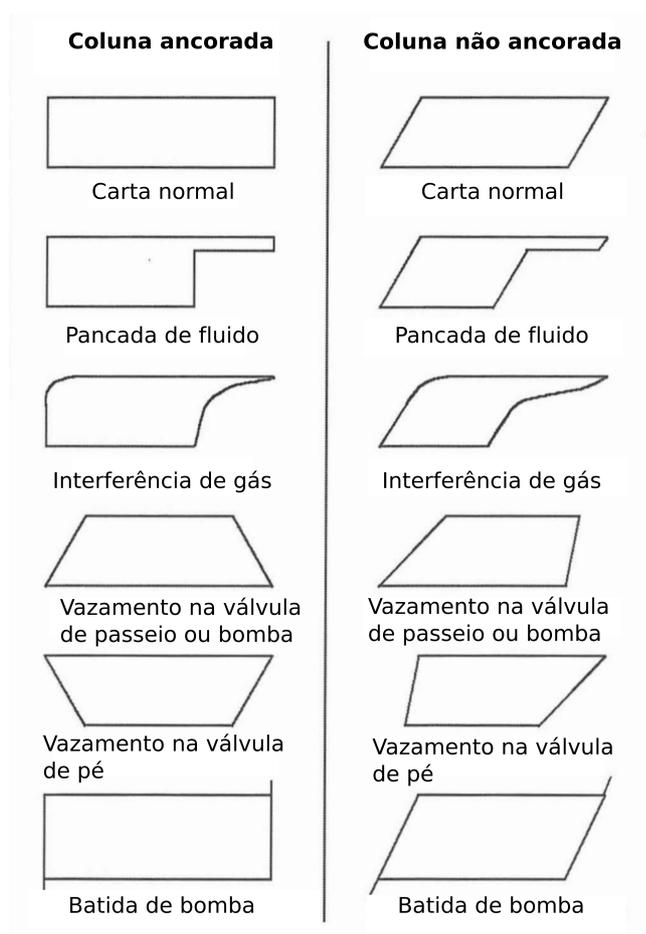
Fonte: Adaptado de API (2008)

2.3.1 Carta dinamométrica de fundo

As cartas dinamométricas de fundo são aquelas tomadas imediatamente acima da bomba. A sua medição direta não é economicamente viável, sendo assim pouco desejável. Em substituição, uma filtragem matemática permite que uma carta de fundo seja gerada a partir de uma de superfície. Como supracitado, dificilmente uma carta de superfície indica as mudanças de carga na bomba sem que informações sejam perdidas, reiterando a importância de obtê-la. (ARAUJO JÚNIOR, 2014)

Se as cartas de superfície podem assumir diferentes formas, assim também a CDF, já que indica com maior acurácia o funcionamento da bomba e por conseguinte suas falhas. A Figura 2.6 mostra alguns dos principais padrões de formatos para a carta de fundo, tanto para coluna de produção ancorada como a não ancorada.

Figura 2.6. Principais padrões para carta de fundo



Fonte: Adaptado de (TAKÁCS, 2003)

A maioria desses métodos matemáticos baseiam-se na equação da onda para modelar a dinâmica da coluna de hastes, calculando-se a força e o deslocamento ao longo da coluna de hastes.

A equação da onda unidimensional é preferencialmente solucionada pela forma analítica ou numérica. A primeira faz uso de séries de Fourier truncadas para resolver a equação da onda, tendo sido usada por Gibbs (1967) e Barreto Filho (1993). Já a abordagem numérica emprega o método das diferenças finitas. Knapp (1969) foi o primeiro a gerar cartas dinamométricas de fundo por meio do método numérico das diferenças finitas, mas a carta só passaria a ser gerada para hastes combinadas com Everitt e Jennings (1992), que utilizou a teoria de Knapp para tanto.

2.3.2 Método de Everitt e Jennings

Nesse trabalho optou-se por trabalhar com o método proposto por Everitt e Jennings (1992) e, portanto, um maior enfoque acerca da sua metodologia é exigido.

A modelagem para a coluna de hastes é feita por meio da equação da onda amortecida, mostrada na Equação (1), uma vez que o problema envolve a propagação de ondas em um meio contínuo. Nessa equação, v representa a velocidade de propagação da força em um meio, que no caso é a coluna de hastes. Essa velocidade depende da inércia (caracterizada pela massa específica) e elasticidade da haste (representada pelo coeficiente de elasticidade) Equação (2).

$$v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{144Eg_c}{\rho}} \quad (2)$$

A Equação (1) modelaria apenas uma coluna de hastes de mesmo diâmetro. Para considerar que a coluna de hastes pode ser combinada, multiplica-se esse equação por $(\rho A/144g_c)$, sendo A a área transversal da seção. Logo, tem-se a Equação (3), usada para desenvolver o método das diferenças finitas.

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho A}{144g_c} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (3)$$

2.3.2.1 Equação diferencial parcial

Uma equação diferencial parcial (EDP) indica a relação entre uma função de duas ou mais variáveis independentes e as derivadas parciais dessa função com respeito às variáveis independentes. A ordem de uma EDP é determinada pela derivada de maior ordem presente na equação (HOFFMAN, 2001).

Uma EDP de segunda ordem quase-linear (linear na derivada de maior ordem) pode ser classificada em elíptica, parabólica ou hiperbólica. Uma equação genérica desse tipo é mostrada na Equação (4) para explicar como essa classificação é feita. Os termos A , B , C , D , E , F e G são coeficientes, f é uma função qualquer e x e y são duas variáveis independentes. (HOFFMAN, 2001)

$$Af_{xx} + Bf_{xy} + Cf_{yy} + Df_x + Ef_y + Ff = G \quad (4)$$

Se $B^2 - 4AC$ for:

- Negativo: Elíptica;
- Zero: Parabólica;
- Positivo: Hiperbólica.

Baseando-se no supradito, afirma-se que a equação da onda amortecida, Equação (3), é uma EDP de segunda ordem hiperbólica. Dito isso, essa exigiria duas condições iniciais e duas condições de contorno. Como Everitt e Jennings (1992) assumem que a carta dinamométrica é coletada quando o sistema de BM está estabilizado, tratando-se de um sinal periódico, elimina-se a necessidade das condições iniciais. Já as duas condições de contorno são provenientes da carta de superfície.

2.3.2.2 Resolução da equação de deslocamento pelo método das diferenças finitas

Em posse da equação diferencial parcial é preciso resolvê-la, e o método das diferenças finitas surge como uma alternativa válida, pois transforma uma EDP em uma equação algébrica de fácil implementação computacional.

O método substitui derivadas por aproximações geradas a partir de séries de Taylor. Dada uma função $f(x)$, a sua série de Taylor pode ser observada na Equação (5). Uma aproximação dessa função é obtida através do truncamento do termo remanescente R^{n+1} ,

mostrado na Equação (6), na qual o termo ξ está compreendido entre x_o e x (HOFFMAN, 2001).

$$f(x) = f(x_o) + f'(x_o)(x - x_o) + \frac{1}{2}f''(x_o)(x - x_o)^2 + \dots + \frac{1}{n!}f^{(n)}(x_o)(x - x_o)^n + R^{n+1} \quad (5)$$

$$R^{n+1} = \frac{1}{(n+1)!}f^{(n+1)}(\xi)(x - x_o)^{n+1} \quad (6)$$

Uma série de Taylor pode ser aproximada pela forma ascendente, descendente e central, sendo essa última uma combinação das duas anteriores. Na forma ascendente, a função $f(x)$ é expandida no sentido ascendente dos valores de x e a descendente segue o oposto. Considera-se também que, para soluções dependentes do tempo, existem dois métodos para encontrar aproximações dessas soluções por diferenças finitas: o método explícito e o implícito.

No método explícito, para um ponto x , no tempo $n+1$, a solução depende apenas da solução nos pontos vizinhos para um tempo n . Já no método implícito, a solução dependeria das soluções nos pontos vizinhos para ambos os tempos n e $n+1$.

Voltando à Equação (3), a derivada parcial de primeira ordem do deslocamento em função do tempo é substituída por uma aproximação na forma ascendente e a de segunda ordem através da forma central, respectivamente mostradas nas Equações (7) e (8).

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{i,j} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right|_{i,j} = \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta t^2} \quad (8)$$

Já para a equação parcial de segunda ordem do deslocamento em função da distância x , a substituição não acontece de forma direta como nas equações precedentes. A forma final é apresentada na Equação (9), mas o passo a passo pode ser analisado no Anexo A. Essa forma final é obtida por meio de rearranjos que permitem considerar uma haste combinada, logo, com variações nos diâmetros e materiais da coluna de hastes. Além disso, permite que cada seção da haste combinada apresente um diferente Δx .

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{i,j} = \frac{1}{(\Delta x)^+} \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} - \frac{1}{(\Delta x)^-} \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (9)$$

Nas equações mostradas, os índices i e j representam, respectivamente, distância axial e tempo. Adotou-se o referencial para baixo considerado por Everitt e Jennings (1992). Além disso, o sobrescrito “+” indica o elemento abaixo do de interesse e o “-” indica o elemento acima.

Após a aproximação individual das derivadas parciais de uma EDP pelas suas aproximações obtidas por meio de diferenças finitas, substituem-se essas aproximações na equação diferencial parcial trabalhada e essa passa a ser uma equação por diferenças finitas, com operações algébricas. Por fim, soluciona-se essa nova equação (HOFFMAN, 2001).

Seguindo esse procedimento descrito, as aproximações correspondentes às Equações (7), (8) e (9) foram substituídas na equação diferencial parcial, Equação (3), resultando na equação algébrica por diferenças finitas, Equação (10). Essa equação é usada para transmitir as posições de superfície ao fundo do poço por meio do cálculo do deslocamento para cada nó da coluna de hastes até que o último nó, imediatamente acima da bomba de fundo, seja alcançado. A sequência dessa substituição também é mostrada no Anexo A, e o termo α , presente na Equação (10) está definido na Equação (11) (EVERITT; JENNINGS, 1992).

$$u_{i+1,j} = \frac{\alpha(1 + c\Delta t)u_{i,j+1} - [\alpha(2 + c\Delta t) - (EA/\Delta x)^+ - (EA/\Delta x)^-]u_{i,j} + \alpha u_{i,j-1} - (EA/\Delta x)^- u_{i-1,j}}{(EA/\Delta x)^+} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\overline{\Delta x}}{\Delta t^2} \left[\frac{(\rho A / 144 g_c)^+ + (\rho A / 144 g_c)^-}{2} \right] \quad (11)$$

Com base na Equação (10), observa-se que é preciso conhecer o deslocamento u para dois pontos antecedentes no espaço: $u_{i,j}$ e $u_{i-1,j}$, relativos ao nó que está sendo calculado $u_{i+1,j}$. Portanto, para dar início à obtenção da solução, os deslocamentos $u_{0,j}$ e $u_{1,j}$ (para todos os tempos) precisam ser conhecidos e os são, já que $u_{0,j}$ é a própria posição da carta de superfície e $u_{1,j}$ é encontrado por meio da Lei de Hooke, Equação (12). Substitui-se a força F pela carga dinâmica na haste polida (F_{PR} = carga proveniente da carta de superfície menos o

peso das hastes no fluido) e $\partial u/\partial x$ pela sua diferença finita na forma ascendente, obtendo assim, a Equação (13). Rearranjando-a, pode-se calcular $u_{1,j}$, Equação (14).

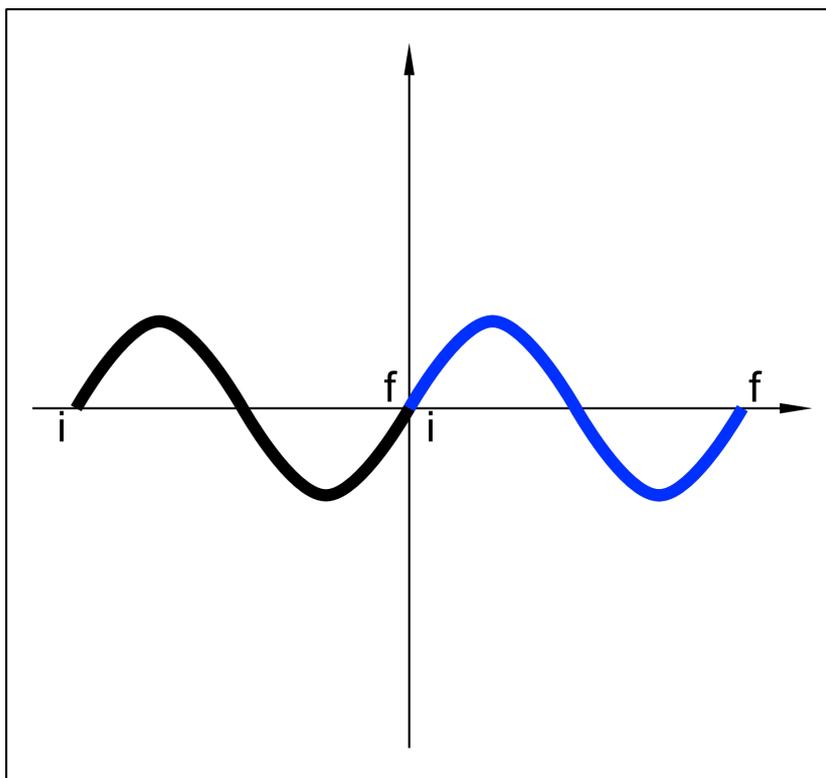
$$F = EA \frac{\partial u}{\partial x} \quad (12)$$

$$F_{PR,j} = EA \frac{u_{1,j} - u_{0,j}}{\Delta x} \quad (13)$$

$$u_{1,j} = \frac{F_{PR,j} \Delta x}{EA} + u_{0,j} \quad (14)$$

Voltando para a Equação (10), nota-se que além das duas condições já encontradas, $u_{i+1,j}$ também depende de $u_{i,j+1}$ e $u_{i,j-1}$. Em uma escala temporal de 0 a n , quando $j=0$ não existe $u_{i,j-1}$ e no outro extremo, quando $j=n$, também não existe $u_{i,j+1}$. Dessa forma, a partir do nó 2 (já que o nó zero é um advém da carta de superfície), nos dois extremos do tempo o deslocamento não poderia ser calculado. Esse “erro” seria então propagado até o final da coluna de haste, aumentando a cada nó a quantidade de pontos não calculados, resultando na perda de informação. Essa situação pode ser observada na Figura 2.7. Pela figura, observa-se que ao chegar na bomba (referente ao nó m), a solução não apresenta acurácia, já que um número de pontos (o dobro do número de nós menos dois) não foi calculado. Anteriormente mencionado, Everitt e Jennings (1992) assumem que a carta é coletada quando o sistema está em equilíbrio, com o ciclo apresentando uma periodicidade. Assim, quando $j=n$ deslocamento $u_{i,j+1}$ seria o mesmo deslocamento no tempo inicial, e para o tempo inicial, o deslocamento $u_{i,j-1}$ seria correspondente ao calculado para o tempo n .

Figura 2.8. Exemplo de função periódica : (i): início e (f) fim.



Fonte: Autor.

Capítulo 3

Metodologia e Desenvolvimento

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Esse capítulo é dividido em duas partes distintas. Primeiramente é apresentada a metodologia empregada para o projeto do protótipo da unidade de bombeio mecânico e na segunda parte a metodologia para a geração automatizada das cartas de fundo, com base na teoria previamente detalhada.

3.1 METODOLOGIA PARA O PROTÓTIPO

O passo inicial para conceber como seria a unidade de bombeio desejada (nomeada de UB CA3R) foi por meio de um desenho. Como a UB CA3R não se restringe ao papel e precisa ser manufaturada, buscou-se uma forma de desenhar as peças com as medidas e formas adequadas para que ela permitisse o movimento e que fosse de fácil entendimento. A dificuldade inicial foi encontrar as medidas de cada parte da unidade de bombeio, já que nos manuais de algumas empresas nem todas eram fornecidas. Para sanar esse problema, decidiu-se usar a UB localizada na UFRN, pertencente ao NUPEG (Núcleo de Ensino e Pesquisa em Petróleo e Gás), uma vez que foi concedida a permissão para a realização das medidas. Essa UB pode ser observada na Figura 3.1.

Figura 3.1. Fotografia da unidade de bombeio, NUPEG/UFRN



Uma vez decidida que essa unidade de bombeio seria a referência, mediu-se cada uma das peças. Em posse dessas medidas, era necessário adequá-las para os objetivos do projeto. Para tanto, pensou-se em uma escala de redução que fosse usada para todas as medidas registradas, tornando-as proporcionais. Decidiu-se que a unidade de bombeio teria uma altura de 50 cm, de forma que fosse pequena o suficiente para ser transportada, já que a UB estaria sobre uma mesa com rodas, mas não tão pequena que algumas partes tivessem de ser suprimidas ou apresentassem uma difícil visualização. Com base em duas medidas conhecidas: a altura desejada para a CA3R e a altura da UB real, a escala de redução foi calculada por meio da Equação (16). Assim, as medidas reais foram multiplicadas pela escala de redução para obter uma estimativa das medidas do protótipo. Diz-se estimativa pois algumas peças tiveram posteriormente algumas mudanças, mas sem grandes variações perante as medidas calculadas.

$$Escala_{redução} = \frac{Altura_{desejada}}{Altura_{real}} = \frac{50cm}{242cm} = \frac{1}{4,84} \quad (16)$$

Finalizada a escala e já em posse das medidas aproximadas do protótipo, optou-se pelo *software SketchUp*, por ser uma ferramenta simples e ainda disponibilizada gratuitamente, para desenhar as peças que serão expostas no próximo capítulo.

Com esses desenhos foi possível investigar qual material seria escolhido para construir a UB, se madeira, ferro galvanizado ou aço inox. O orçamento, Tabela 3.1, foi feito em quatro empresas, duas madeireiras e duas metalúrgicas. Apesar da madeira ser o material mais barato, optou-se pelo ferro galvanizado, em função da sua maior vida útil. A escolha do ferro galvanizado implicou em modificações nos desenhos das peças, já que formas arredondadas precisaram ser evitadas para facilitar a execução por parte da empresa que cortaria as chapas de ferro, diminuindo também o custo.

Tabela 3.1. Orçamento para escolha do material da unidade de bombeio

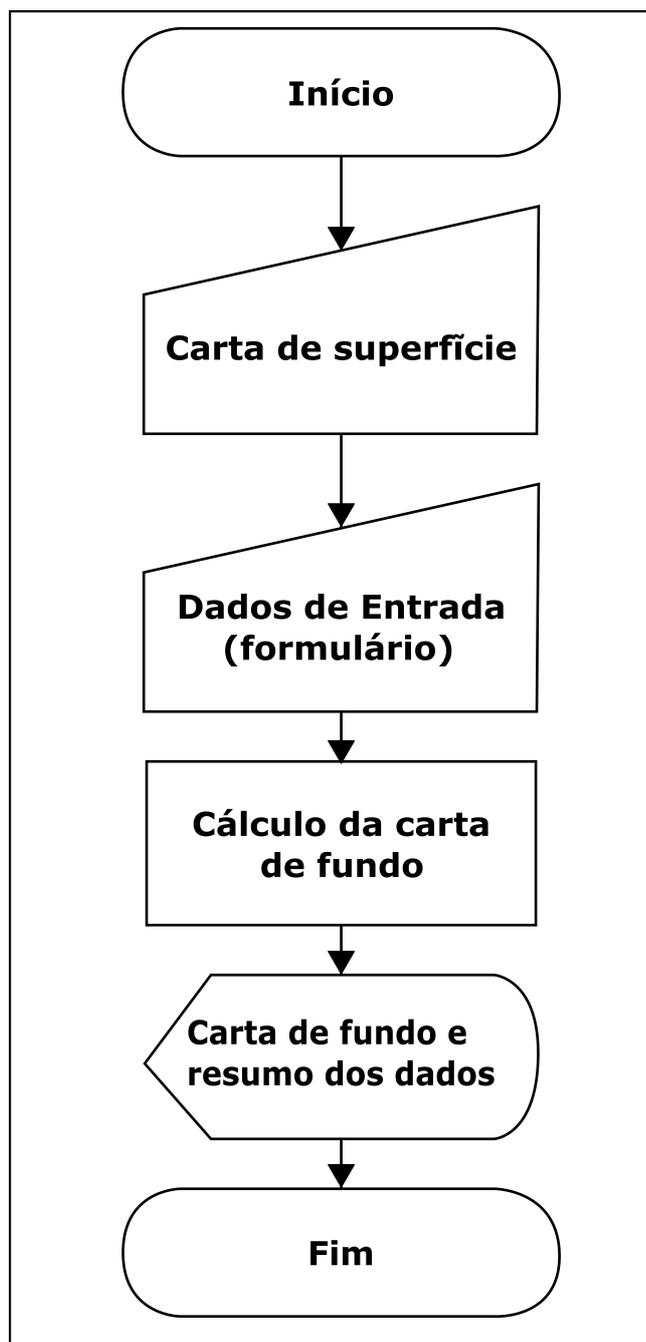
Empresas	Dimensões	Material	Preço
Metalúrgica 1	2 x 1 x 2mm	Ferro Galvanizado	R\$ 148,00
	2 x 1,25 x 4mm	Aço inox	R\$1.580,00
Metalúrgica 2	2 x 1 x 2mm	Ferro Galvanizado	R\$173,00
Madeira 1	2,20 x 1,60 x 15mm	Compensado	R\$ 98,00
Madeira 2	2,20 x 1,60 x 15mm	Compensado	R\$ 88,00

3.2 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA CARTA DE FUNDO

Por meio da metodologia de Everitt e Jennings (1992), explanada no capítulo 2.3.2, decidiu-se como o cálculo seria implementado computacionalmente para obter a carta de fundo por meio de uma carta de superfície. Pela maior familiaridade com o programa *Excel*, da Microsoft, e por esse dispor de um ambiente de desenvolvimento, *Visual Basic for Applications* (VBA), no qual é possível escrever códigos de programação por meio linguagem *Basic*, optou-se por esse programa. Além disso o *Excel* permite a criação de interfaces de forma simples, tornando o programa mais acessível ao usuário.

Criou-se então uma interface (Figura 3.2) na qual o usuário insere sua carta de superfície para obter a de fundo correspondente. Nessa interface existem quatro botões. O primeiro deles é o *Abrir Formulário*, e como o nome já indica, ao ser pressionado dá acesso a um formulário (Figura 3.3), no qual são pedidos apenas os dados necessário para se gerar a CDF. O único dado “extra” seria o diâmetro do pistão, necessário para o cálculo do deslocamento volumétrico, ou seja, o volume diariamente deslocado pelo pistão. Quando todos os dados do formulário são cadastrados então o usuário pressiona o botão *Gerar carta de fundo*, pelo qual o método de Everitt e Jennings (1992) é diretamente aplicado. Quando na interface aparecer a carta de fundo gerada então pode-se pressionar o terceiro botão *Resumo dos dados*, o qual exibe não só uma lista com os principais dados inseridos pelo usuário, mas também os resultados provenientes da carta de fundo gerada, como o curso útil e a vazão de líquido. O quarto e último botão *Apagar carta de superfície*, indica pelo próprio nome sua função, devendo então ser pressionado sempre antes da inserção de uma nova carta de superfície. Um fluxograma geral de como a ferramenta computacional atua é mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4. Fluxograma indicando o funcionamento geral da ferramenta computacional



3.2.1 Dados de entrada

Nesse tópico mostra-se como os dados entrados por meio do formulário são interpretados para serem utilizados nas Equações (10) e (15).

Através da Figura 3.3 pode-se observar os dados solicitados ao usuário, sendo eles:

- CPM (Ciclos por minuto);

- Grau API do óleo;
- Número de seções da coluna de hastes;
- BSW (quantidade de água no fluido);
- Diâmetro do pistão;
- Características das hastes de cada seção (material, diâmetro, quantidade de hastes e comprimento);
- Número de nós por seção (quantas subdivisões são feitas em cada seção para cálculo da carta de fundo).

No momento que a carta de superfície é inserida, contabiliza-se o número de pontos que compõem essa carta ($Núm_{CDS}$), já que essa quantidade é usada para encontrar o passo de tempo (Δt) entre cada tempo j . Contudo, para obter o Δt além do número de pontos é necessário calcular o período (T), ou seja, quantos segundos são necessários para completar um ciclo. Para tanto, usa-se o CPM (N), Equação (17). A partir dessa equação, parte-se para a Equação (18).

$$T = \frac{60}{N} \quad (17)$$

$$\Delta t = \frac{T}{(Núm_{CDS} - 1)} \quad (18)$$

Com o Grau API do óleo, pode-se calcular a densidade do óleo, Equação (19), que juntamente com a densidade da água, ponderada pelas suas respectivas frações (BSW), compõem a densidade do fluido, Equação (20).

$$d_{\text{óleo}} = \frac{141,5}{\text{API} + 131,5} \quad (19)$$

$$d_{\text{fluido}} = d_{\text{óleo}} \left(1 - \frac{BSW}{100} \right) + d_{\text{água}} \left(\frac{BSW}{100} \right) \quad (20)$$

Já com as características de cada seção, a começar pelo material da haste, pode-se obter a massa específica da haste (ρ) e o módulo de elasticidade longitudinal (E), uma vez que foram cadastrados esses dados para hastes de aço e fibra de vidro. Com os diâmetros das hastes de cada seção é possível calcular o peso da coluna de hastes no ar (W), Equação (21).

Nessa equação o índice i indica a seção em análise, Wr_i é o peso linear correspondente à seção e Lr_i é o comprimento dessa seção. Wr_i pode ser encontrado por meio da Tabela 3.2. Já o comprimento da seção seria o produto entre o número de hastes dessa seção e o comprimento de cada haste.

$$W = \sum_{i=1}^{\text{Núm. Seções}} (Wr_i Lr_i) \quad (21)$$

Tabela 3.2. Peso linear para um dado diâmetro

Diâmetro (pol ²)	Peso linear (lbf/pés)
1/2	0,72
5/8	1,13
3/4	1,63
7/8	2,22
1	2,90
1 1/2	3,67

Adaptado de API (2008)

Após o cálculo do peso da coluna de hastes no ar, é possível também calcular o peso da coluna no fluido através da Equação (22), importante para obter a carga dinâmica na haste polida, como já mencionado no capítulo dois.

$$Wr_f = W(1 - 0,128d_{\text{fluido}}) \quad (22)$$

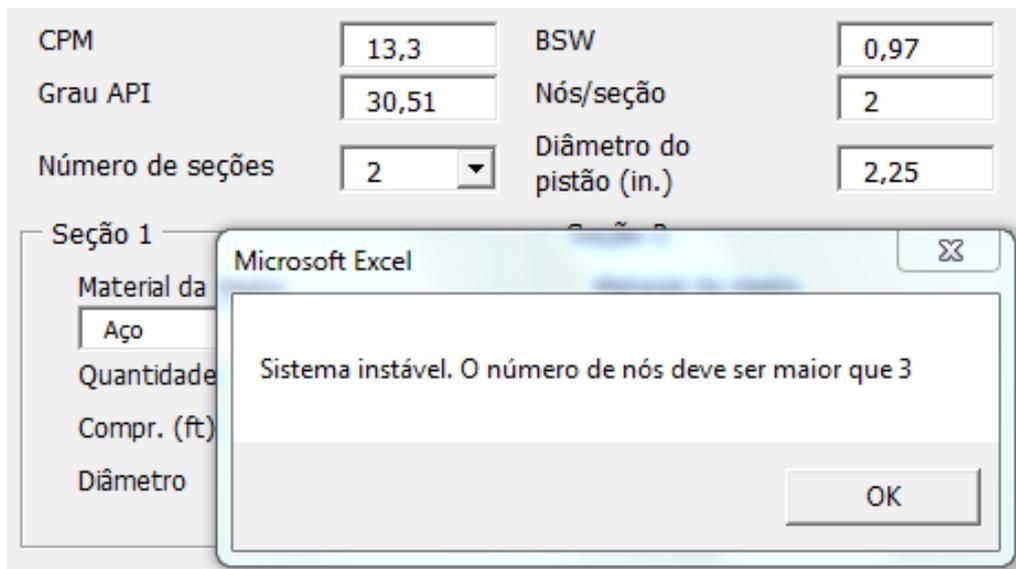
Para calcular a carta de fundo ainda é preciso determinar o coeficiente de amortecimento e o Δx . O primeiro foi adotado como $0,05 \text{ s}^{-1}$, conforme sugerido por Costa (1995). Já o Δx é o intervalo entre cada nó empregado para encontrar a posição imediatamente acima da bomba, sendo portanto um elemento de discretização. No formulário pede-se o número de nós desejados por seção, calculando-se assim o Δx pela Equação (23).

$$\Delta x = \frac{Lr}{\text{Núm}_{\text{nós}}} \quad (23)$$

O cálculo do Δx é usado também para analisar se o critério de estabilidade está sendo atendido, sendo ele dado pela Equação (24), de acordo com Everitt e Jennings (1992). Se o número de nós não conseguir satisfazer esse critério, o formulário indicará uma mensagem de erro, sugerindo ao usuário um número de nós a partir do qual a estabilidade estaria garantida, que pode ser observada através da Figura 3.5.

$$\Delta x/v\Delta t \leq 1 \quad (24)$$

Figura 3.5. Mensagem de erro diante de condição de instabilidade.



3.2.2 Estrutura de decisão

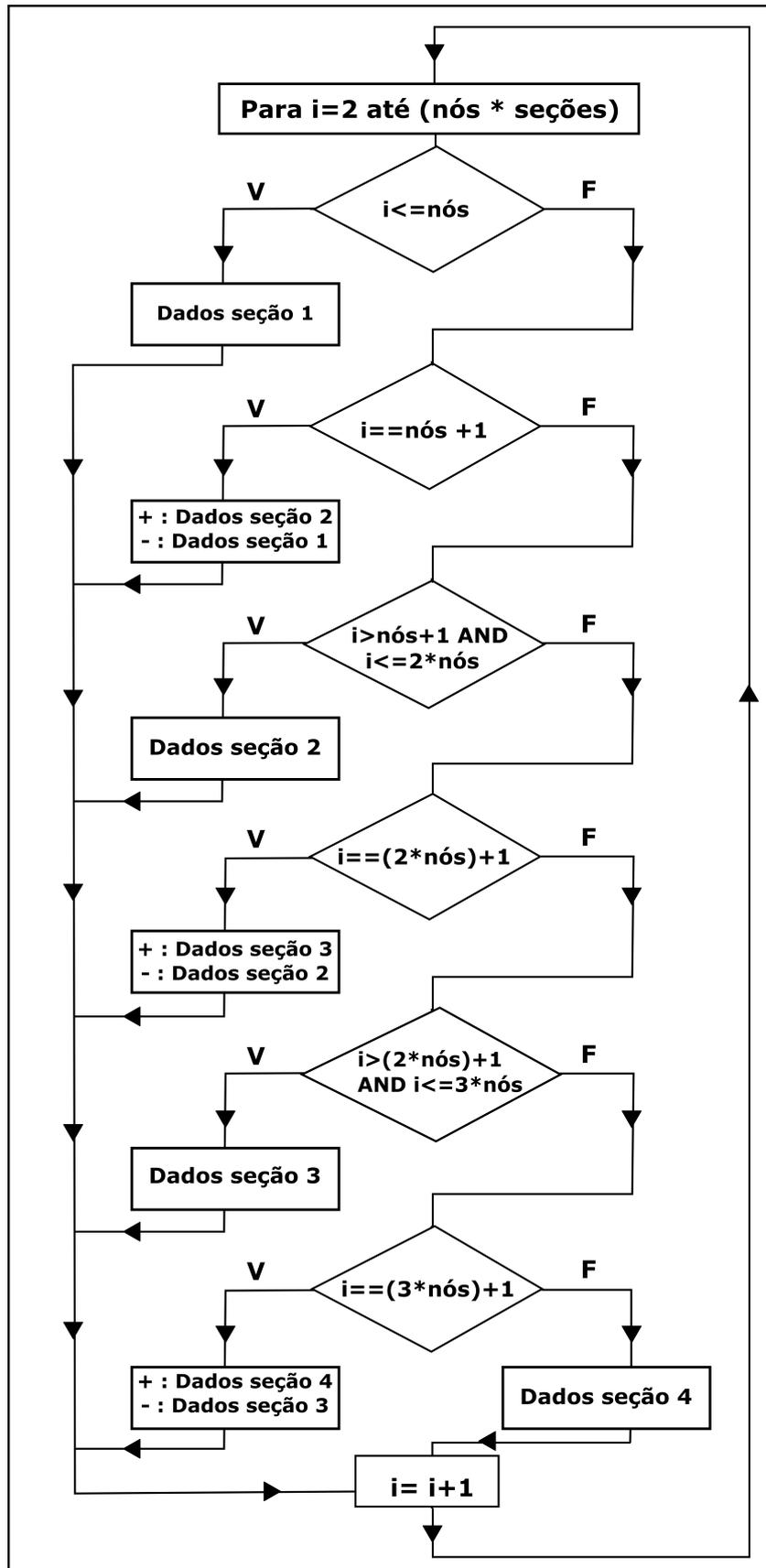
Já em posse de todos os dados exigidos para gerar a carta dinamométrica de fundo, faz-se necessário criar estruturas de decisão para automatizar o processo de cálculo da posição, já que na Equação (10) há uma análise nodal, indicada pelos sobrescritos “+” e “-”,

sendo portanto as variáveis dependentes do nó em que se está. A estrutura de decisão é a seguinte: sempre que ocorrer a transição para uma nova seção, esse primeiro nó correspondente à nova seção terá seus dados relacionados a seção anterior para o sobrescrito “-” e à nova seção para sobrescrito “+”. Os outros nós tem para ambos os sobrescritos os dados relacionados à seção em que eles se encontram.

Para facilitar a compreensão da estrutura de decisão nodal, usa-se o fluxograma mostrado na Figura 3.6. Logo no primeiro bloco nota-se que o fluxograma apresenta uma estrutura de repetição com variável de controle, no caso i . Essa variável começa em 2 pois quando $i=0$ trata-se da posição na própria carta de superfície e quando $i=1$ a posição é obtida pela Lei de *Hooke*. Dessa forma, apenas a partir de $i=2$ é que a Equação (10) é aplicada, sendo a análise repetida até que i seja igual ao produto entre número de nós por seção e a quantidade de seções que compõem a coluna de hastes. Para cada tomada de decisão existem duas possibilidades: que a condição seja verdadeira (“V”) ou falsa (“F”). Considerando que a coluna de hastes pode ser formada por até quatro seções, o fluxograma indica que no máximo os dados são correspondentes à quarta seção.

Para exemplificar, se o usuário estabelecer que a coluna de hastes é composta por 4 seções e ele escolher 10 nós/seção, sabe-se que até o nó de número 10 os dados de área, diâmetro, massa específica, módulo de elasticidade longitudinal e Δx são correspondentes à seção 1. No nó de número 11, tem-se pela primeira vez a mudança de seção, sendo esse nó crítico, já que para o sobrescrito “+” os dados correspondem aos da seção 2 e para o sobrescrito “-” os dados são relacionados à seção 1. Do nó 12 ao 20 ainda se estaria na seção 2, logo, os dados para os dois sobrescritos são da seção 2. No nó 21, tem-se novamente uma transição para uma nova seção, agora a seção 3, logo, para “+” os dados são da seção 3 e “-” da seção 2. Do nó 22 ao 30 todos os dados são da seção 3. O nó 31 seria o último crítico, seguindo a mesma lógica dos nós 11 e 21, sendo para “+” os dados da seção 4 e “-” os da 3. Por fim, do nó 32 ao 40 todos os dados são da última seção.

Figura 3.6. Fluxograma para a estrutura de decisão.



3.2.3 Cálculo da vazão

Pode-se inferir da carta dinamométrica de fundo gerada o curso bruto do pistão e o curso útil, sendo esse último o responsável pelo deslocamento volumétrico.

Para determinar o curso útil foi preciso primeiro encontrar as cargas máximas e mínimas da carta de fundo, bem como o curso máximo e mínimo. A diferença entre esse dois cursos corresponde ao curso bruto do pistão, o qual é usado para obter o deslocamento volumétrico, mostrado na Equação (25). Já a diferença entre as duas cargas seria a “altura” da carta. Estabeleceu-se uma porcentagem fixa de 30% dessa altura, para traçar uma reta cortando a carta de fundo, conforme mostrado na Figura 3.7. Percebe-se que a reta corta a carta em dois pontos. Para encontrar estas duas posições, fez-se duas interpolações, sendo a diferença entre elas é o curso útil.

$$PD = 0,01853dp^2S_pN \quad (25)$$

A eficiência volumétrica, que é a razão entre a vazão bruta de líquido na superfície e o deslocamento volumétrico idealmente seria igual a 1. Assim, a vazão de líquido na superfície seria igual ao deslocamento volumétrico. Contudo, no fim do curso ascendente a bomba de fundo geralmente não apresenta apenas a fase líquida, afetando assim a eficiência volumétrica, de acordo com Costa (2008). Por simplificação, usou-se a Equação (26) para obter a eficiência volumétrica, considerando que essa é aproximadamente a razão entre o curso útil e o curso bruto do pistão. Assim, a vazão de líquido na superfície corresponde ao produto entre o deslocamento volumétrico e a eficiência volumétrica.

$$E_v \cong \frac{S_u}{S_p} \quad (26)$$

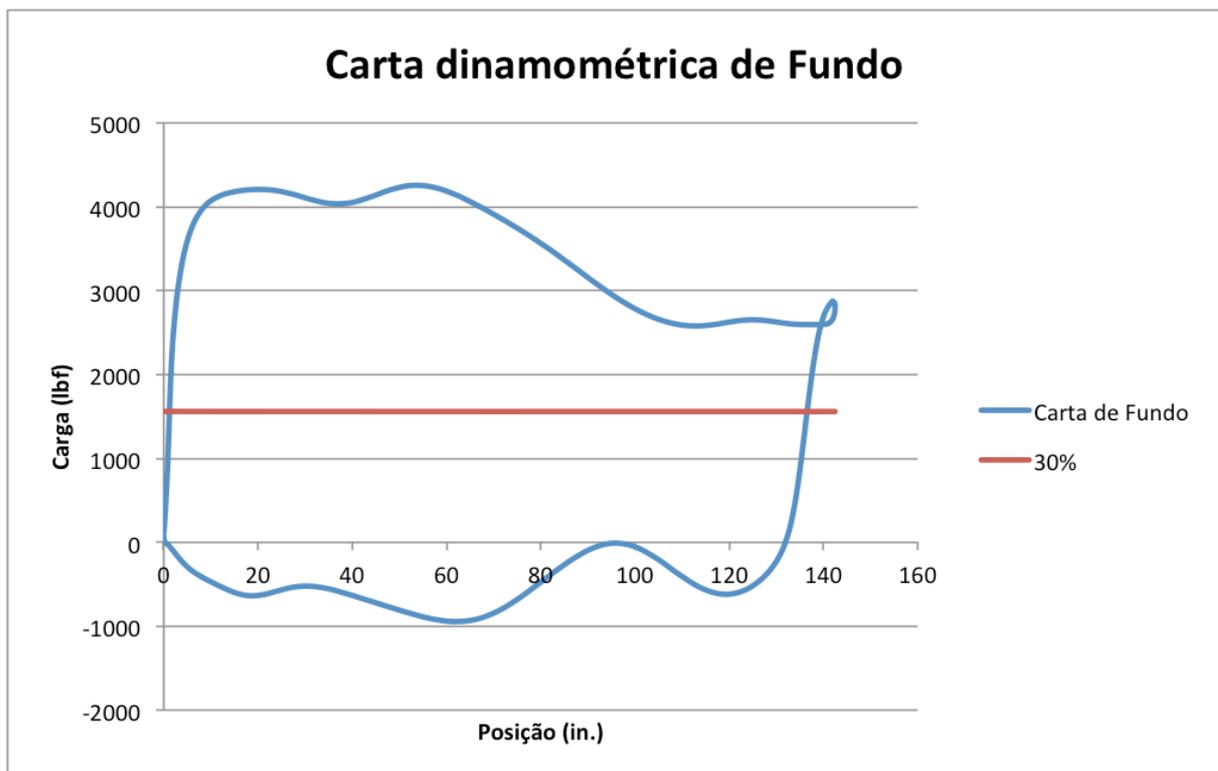
Apesar de não ter sido incorporado à ferramenta desenvolvida, pensou-se em um fator de calibração da vazão, k , reduzindo os efeitos da simplificação da eficiência volumétrica. Esse fator seria calculado para cada novo teste de vazão, sendo a razão entre essa vazão de teste (Q_{teste}) e a vazão calculada através da carta (Q_{carta}), conforme mostra a Equação (28). Porém, nos dias seguintes, em que nenhum teste foi feito, a vazão prevista, Equação (29), seria obtida pelo produto entre a vazão da carta de fundo (Q_{carta}) e esse fator previamente conhecido.

$$Q_{carta} = 0,01853d_p^2 S_u N \quad (27)$$

$$k = \frac{Q_{teste}}{Q_{carta}} \quad (28)$$

$$Q_{prevista} = k \cdot Q_{carta} \quad (29)$$

Figura 3.7. Carta de fundo para exemplificar a obtenção do curso útil do pistão.



3.2.4 Poços utilizados

Para testar se a ferramenta computacional desenvolvida estava gerando corretamente cartas dinâmico-métricas de fundo, utilizou-se três poços, um com uma coluna de hastes simples, e dois com colunas de hastes combinadas. Para obter as cartas de fundo, usou-se também suas respectivas cartas de superfície. Os dados dos três podem ser vistos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Dados de entrada para cada poço.

Dados de entrada	Poço 1	Poço 2		Poço 3		
Número de seções	1	2		3		
Quantidade de cada haste	91	1	83	1	85	5
Diâmetro de cada haste (pol)	0,875	0,875	0,75	0,875	0,75	1,5
CPM	10,1	13,3		11,8		
Grau API	32,02	30,51		33,44		
BSW%	97,9	97		98		
Diâmetro do pistão (pol)	2,25	2,25		2,25		

Os três poços mostrados anteriormente são compostos apenas por hastes de aço. Para provar que o programa também é capaz de gerar cartas de fundo para poços com hastes combinadas de diferentes materiais, usou-se os poços 4 e 5, mostrados na Tabela 3.4. A primeira seção da coluna de hastes, para ambos os poços, tem hastes de fibra de vidro. Outra consideração importante é que esses poços são direcionais.

Tabela 3.4. Dados para os dois poços com hastes combinadas de diferentes materiais.

Dados de entrada	Poço 4			Poço 5		
Número de seções	3			3		
Quantidade de cada haste	28	50	4	32	42	3
Material/ seção	Fibra	Aço	Aço	Fibra	Aço	Aço
Diâmetro de cada haste (pol)	0,875	0,875	1,5	0,875	0,875	1,5
CPM	11,6			10,8		
Grau API	20			20		
BSW%	96,5			98,2		
Diâmetro do pistão (pol)	2,25			2,25		

Capítulo 4

Resultados e Discussões

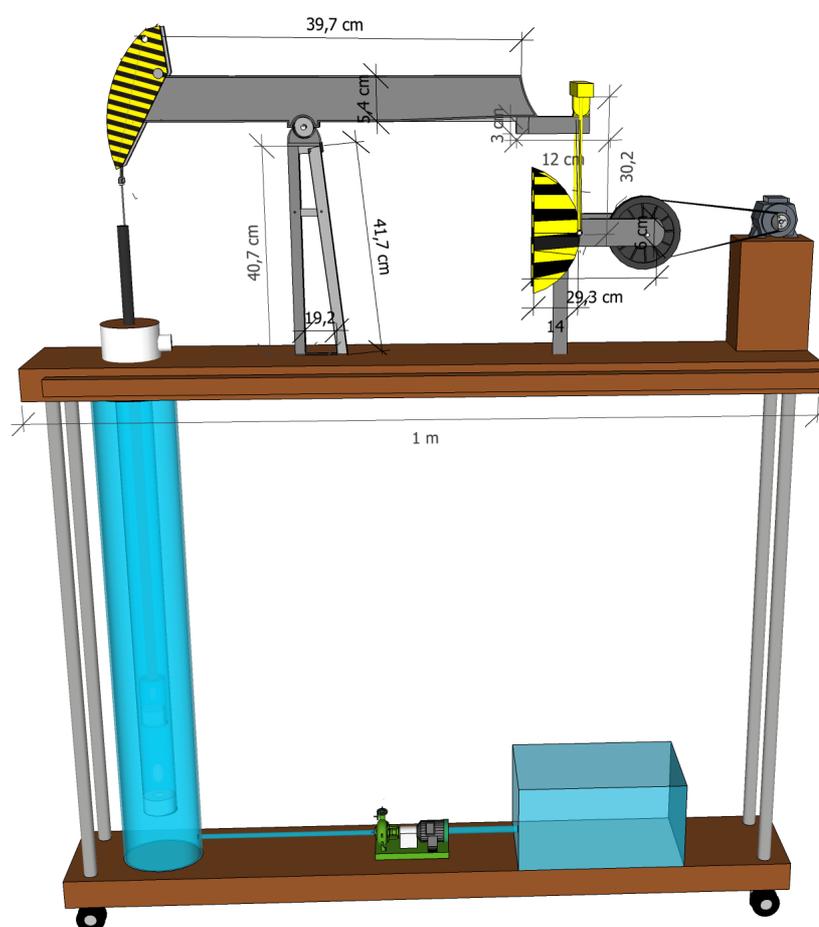
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Da mesma forma como o capítulo anterior é dividido entre o protótipo e a geração das cartas de fundo, esse também o é. São expostos nesse quarto capítulo as peças desenhadas por meio do *SketchUp* e as cartas de fundo geradas através da ferramenta computacional.

4.1 PROTÓTIPO

O esquema geral da unidade de bombeio, juntamente com os seus componentes de subsuperfície e parte elétrica podem ser vistos na Figura 4.1. O detalhamento das peças da unidade de bombeio foi feito individualmente e essas podem ser observadas da Figura 4.2 a 4.8.

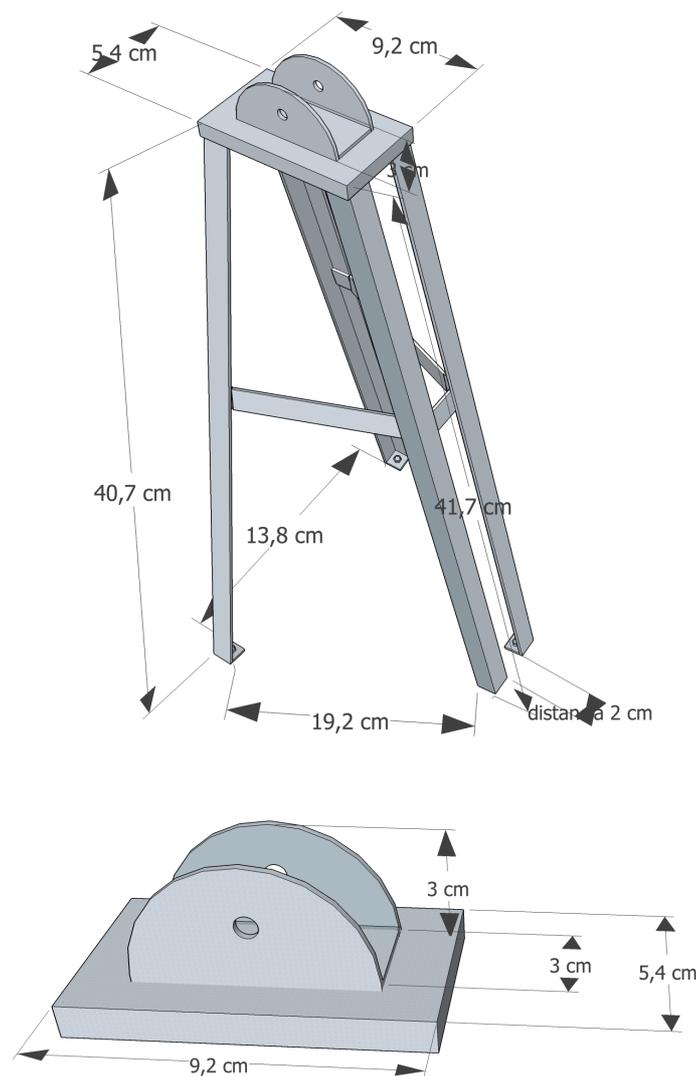
Figura 4.1. Esquema geral da unidade de bombeio.



4.1.1 Tripé

Para o tripé optou-se por pernas em formato de cantoneira, já que apresentam uma boa sustentação e custam menos que pernas sólidas. Na parte superior, esse componente é acoplado ao balancim, por meio do mancal central, permitindo que o balancim se movimente nos cursos ascendente e descendente. (Figura 4.2)

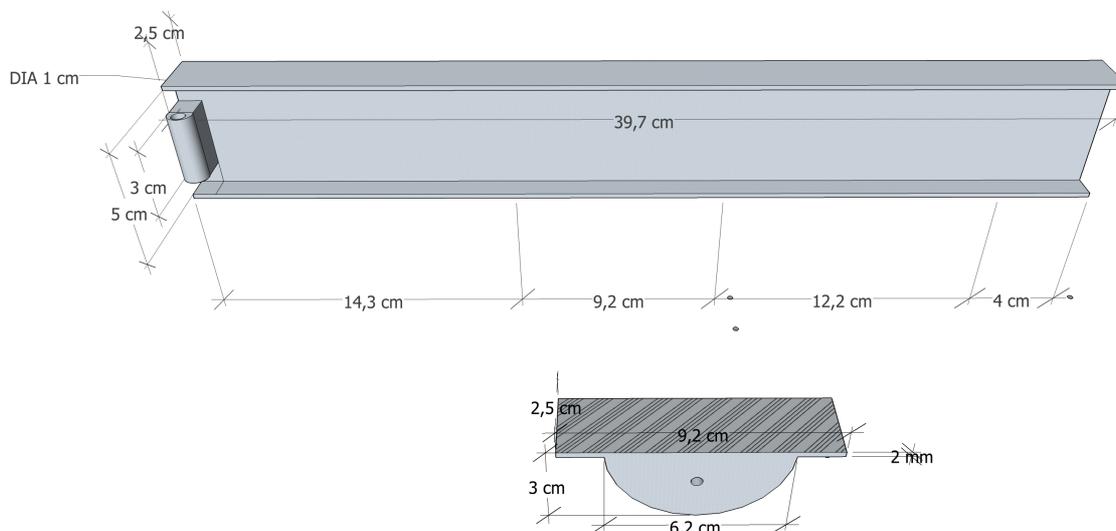
Figura 4.2. Tripé (superior) e mancal central (inferior).



4.1.2 Balancim

O formato do balancim (Figura 4.3) é uma peça em I, que foi escolhida em função da disponibilidade de já comprar a peça pré-moldada, reduzindo custos de soldagem e corte.

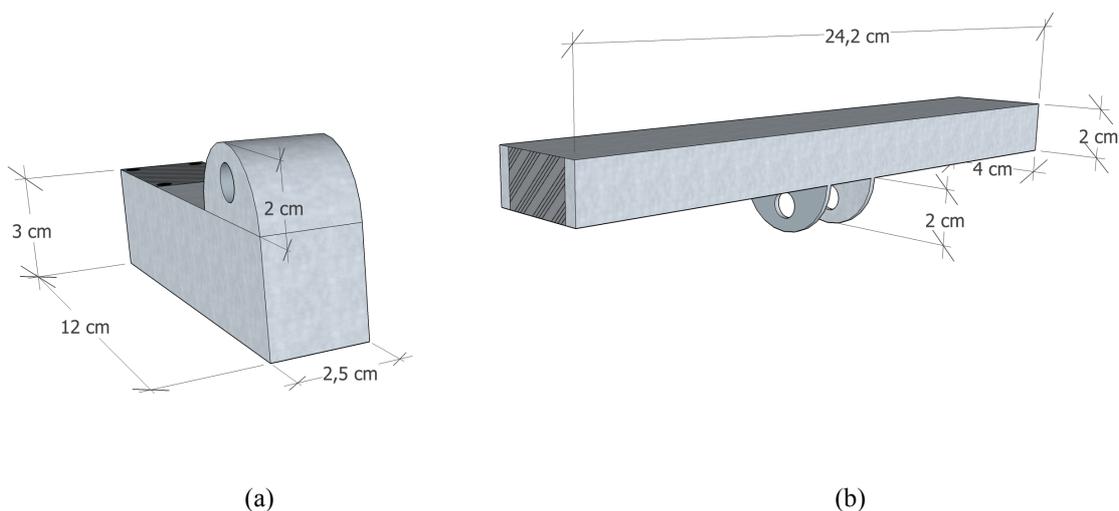
Figura 4.3. Balancim em perfil I e mancal central.



4.1.3 Viga Equalizadora

A viga equalizadora (Figura 4.4) é acoplada ao final do balancim. A peça da esquerda é o mancal equalizador, que juntamente com a viga permite a articulação do balancim.

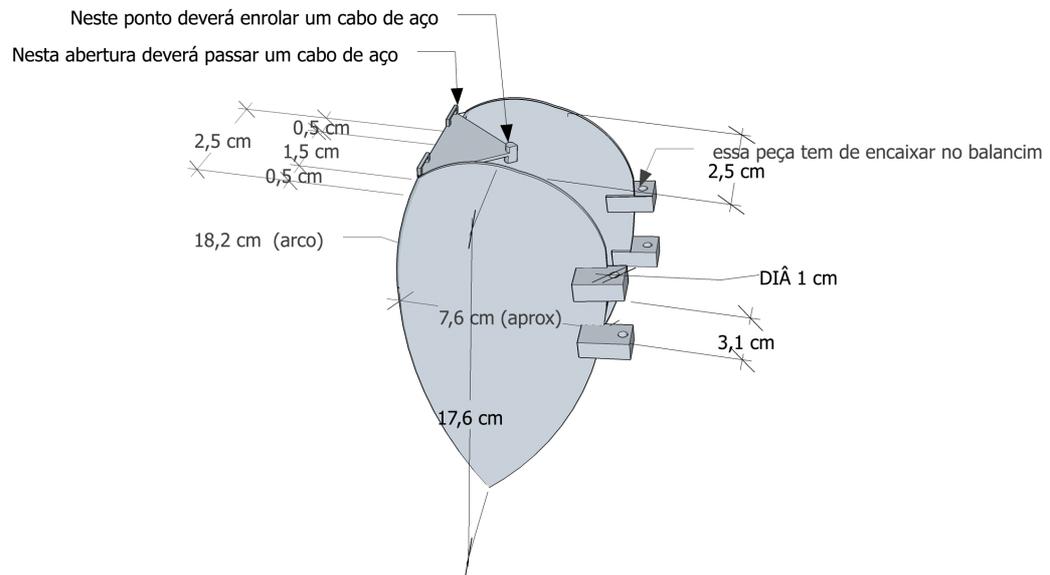
Figura 4.4. Mancal equalizador (a) e viga equalizadora (b)



4.1.4 Cabeça da unidade de bombeio

A cabeça (Figura 4.5) é feita com duas chapas paralelas, sendo portanto oca. No topo há uma peça em forma triangular com uma pequena haste. O cabresto é preso nessa haste e desce até o ponto onde encontra a sua mesa.

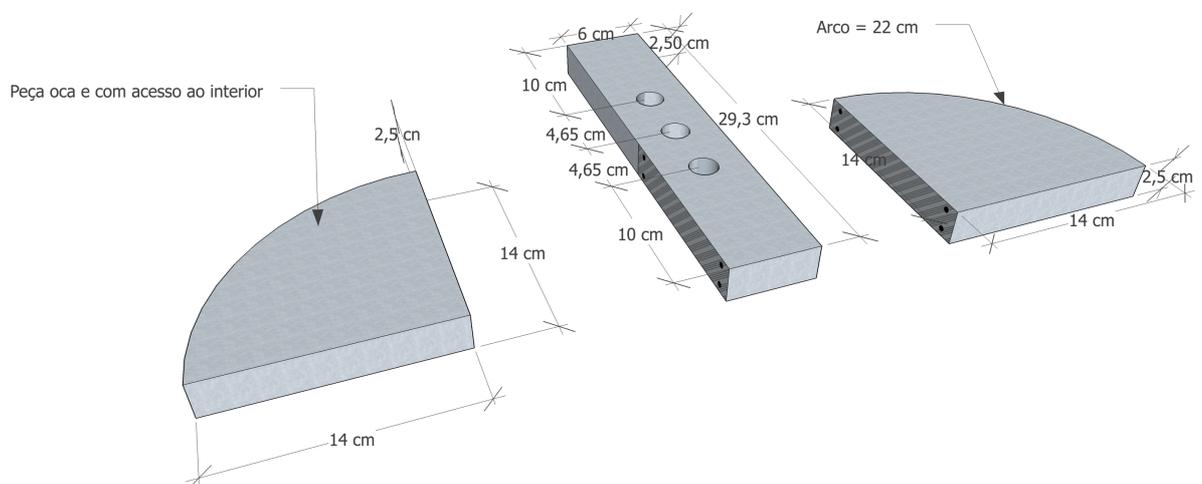
Figura 4.5. Cabeça da UB



4.1.5 Contrapesos

Dois contrapesos (Figura 4.6) são usados. Eles serão feitos em ferro galvanizado, oco e com acesso ao seu interior para regulagem da massa, por meio de uma janela parafusada. Dessa forma é possível ajustar o seu peso com adição de algum material, como areia. Visa-se também adotar um trilho entre o contrapeso e a manivela, para modificar sua posição caso necessário para o balanceamento da UB.

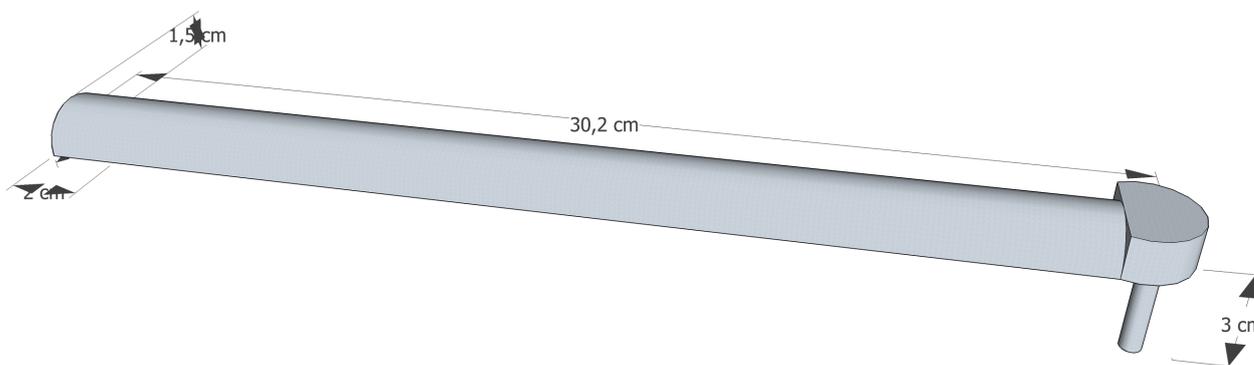
Figura 4.6. Contrapeso e manivela.



4.1.6 Biela

A biela (Figura 4.7) será acoplada à manivela, podendo ser realocada, caso necessário, entre duas posições.

Figura 4.7. Biela



Esses desenhos foram importantes para dar início à concepção de como seria o protótipo da unidade de bombeio, escolher o material que seria empregado em sua construção e procurar uma empresa que pudesse fabricá-la. Contudo, em função do tempo, a UB ainda precisa ser construída, dando liberdade para que modificações sejam feitas ao projeto, tornando-o ainda mais viável e completo.

4.2 CARTA DE FUNDO

Conforme mostrado no capítulo anterior, partindo dos dados de cada poço e suas respectivas cartas de superfície, foi possível gerar as cartas de fundo. Posteriormente, comparou-as com as cartas de fundo geradas através de um programa comercial.

Para o poço 1, Figura 4.8, percebe-se que a carta de fundo desenvolvida e a comercial apresentam semelhança. Dessa carta de fundo calculou-se o curso útil do pistão e sua vazão, conforme mostrado na Figura 4.9 (janela aberta por meio do botão *Resumo dos Dados*). A vazão resultante foi de aproximadamente 69, 53 m³/dia, enquanto que a vazão calculada pelo programa comercial foi de 69,87 m³/dia, com um erro relativo de aproximadamente 0,5%. A Equação (30) foi usada para calcular esse erro.

$$Erro_{relativo} = \frac{|Valor_{comercial} - Valor_{desenvolvido}|}{Valor_{comercial}} \quad (30)$$

Figura 4.8. Cartas de superfície e de fundo para o poço 1.

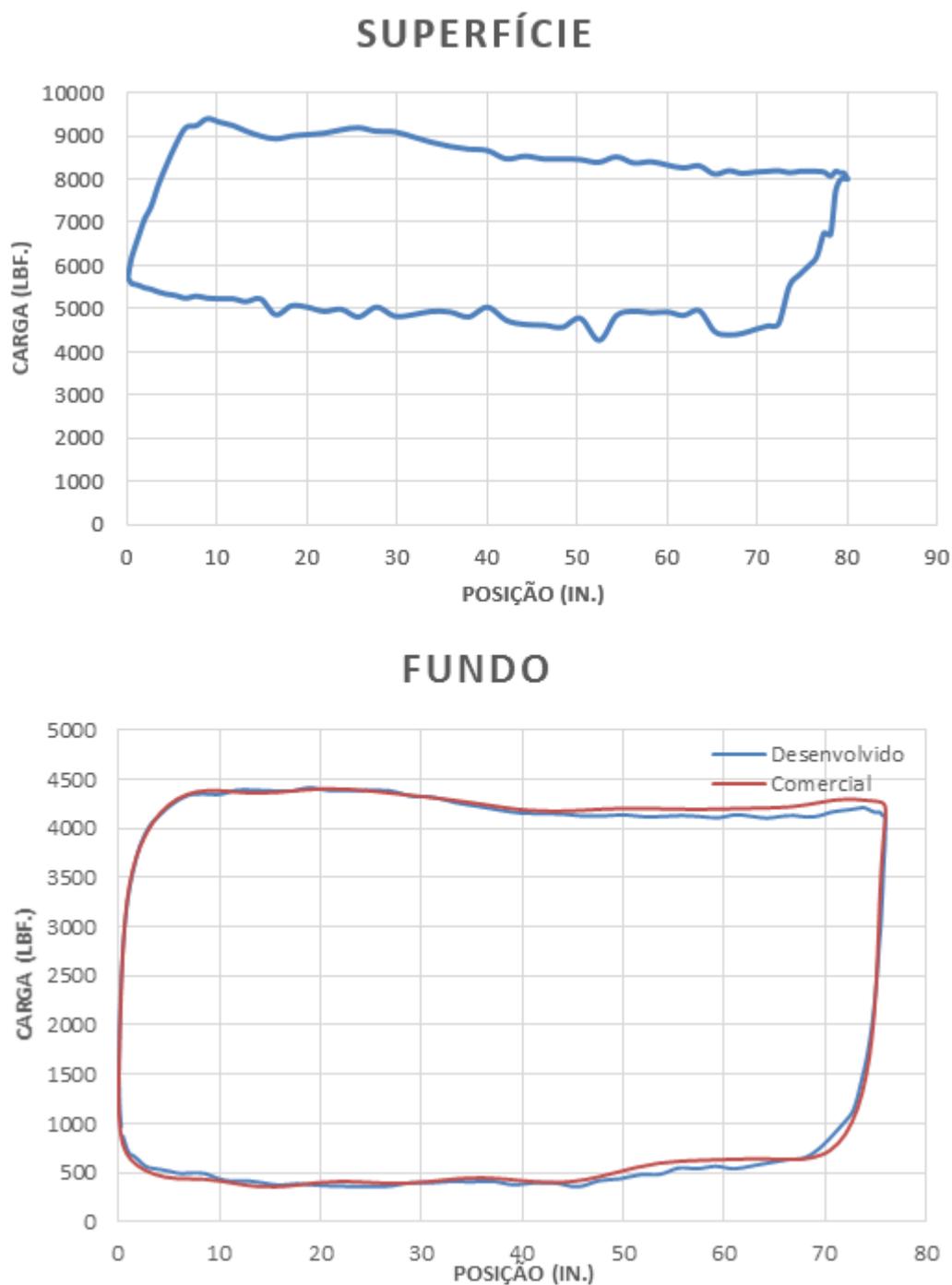
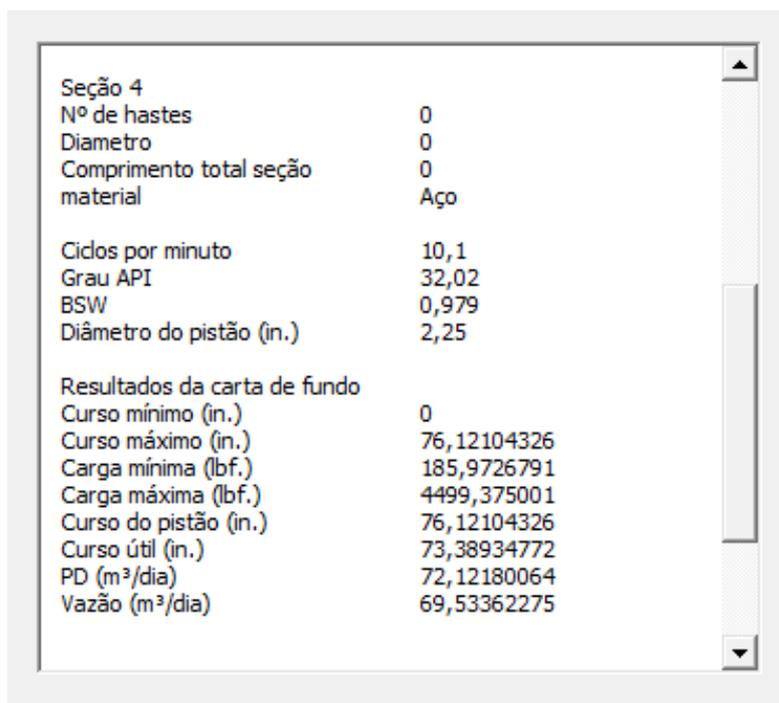


Figura 4.9. Resumo dos dados para poço 1.



Seção 4	
Nº de hastes	0
Diametro	0
Comprimento total seção	0
material	Aço
Ciclos por minuto	10,1
Grau API	32,02
BSW	0,979
Diâmetro do pistão (in.)	2,25
Resultados da carta de fundo	
Curso mínimo (in.)	0
Curso máximo (in.)	76,12104326
Carga mínima (lbf.)	185,9726791
Carga máxima (lbf.)	4499,375001
Curso do pistão (in.)	76,12104326
Curso útil (in.)	73,38934772
PD (m ³ /dia)	72,12180064
Vazão (m ³ /dia)	69,53362275

Para o segundo poço, as cartas são mostradas na Figura 4.10. Percebe-se que a carta desenvolvida e a comercial também são semelhantes, estando praticamente sobrepostas. A vazão de líquido foi obtida para a carta de fundo gerada, sendo de 75,2 m³/dia, conforme indicado na Figura 4.11. Já a vazão de líquido obtida pelo programa comercial foi de 73,63 m³/dia, resultando assim, em um erro relativo de aproximadamente 2%.

Figura 4.10. Cartas de superfície e de fundo para o poço 2.

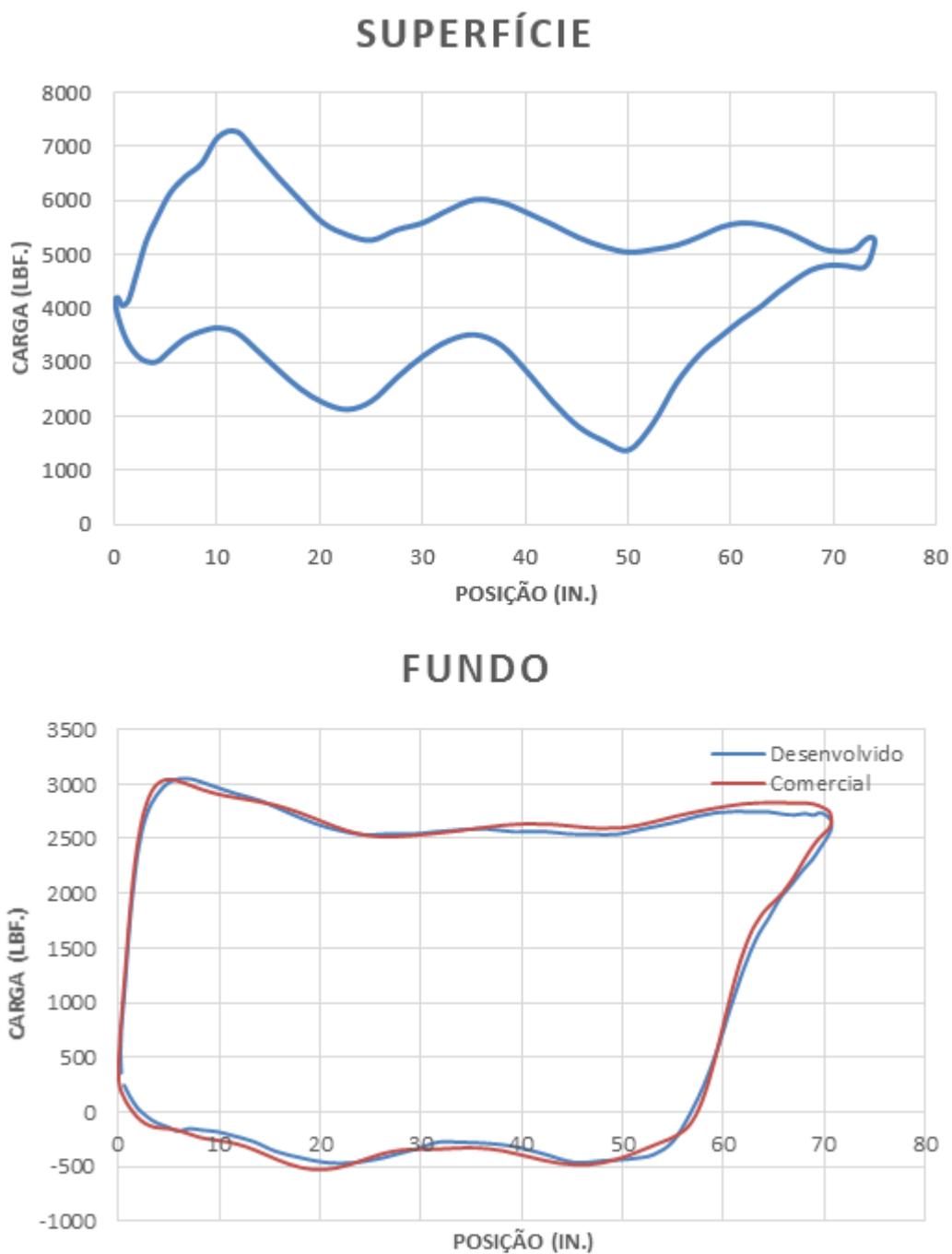
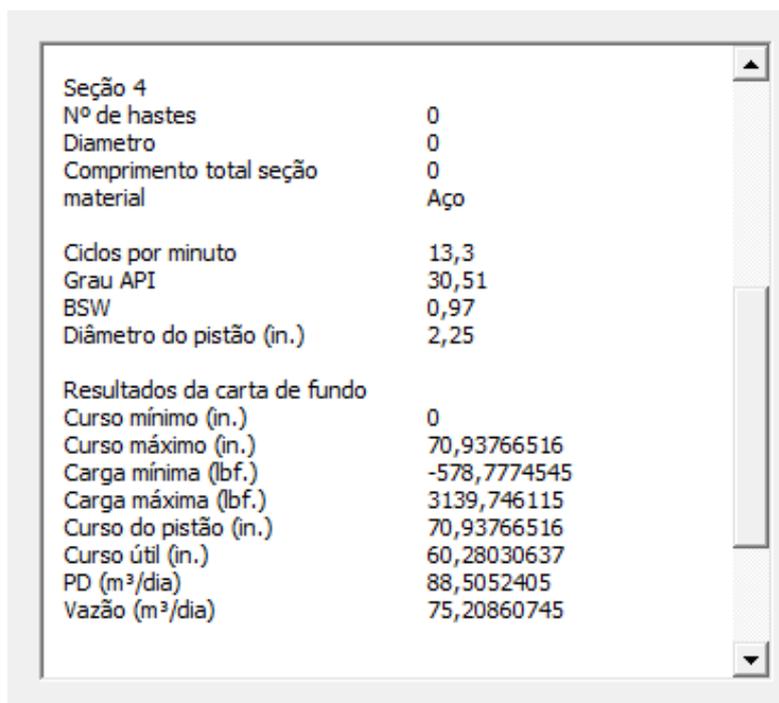


Figura 4.11. Resumo dos dados para o poço 2.



Seção 4	
Nº de hastes	0
Diâmetro	0
Comprimento total seção	0
material	Aço
Cidos por minuto	
Cidos por minuto	13,3
Grau API	30,51
BSW	0,97
Diâmetro do pistão (in.)	2,25
Resultados da carta de fundo	
Curso mínimo (in.)	0
Curso máximo (in.)	70,93766516
Carga mínima (lb.f.)	-578,7774545
Carga máxima (lb.f.)	3139,746115
Curso do pistão (in.)	70,93766516
Curso útil (in.)	60,28030637
PD (m ³ /dia)	88,5052405
Vazão (m ³ /dia)	75,20860745

Para o último poço, o de número 3, a carta comercial e a desenvolvida também foram similares, Figura 4.12, mostrando novamente que a ferramenta conseguiu cumprir o seu objetivo. A vazão de líquido calculada pela carta de fundo foi de 151,7 m³/dia, enquanto que pelo programa comercial foi de 147,61 m³/dia, um erro relativo aproximadamente 2,8%.

Figura 4.12. Carta de superfície e de fundo para o poço 3.

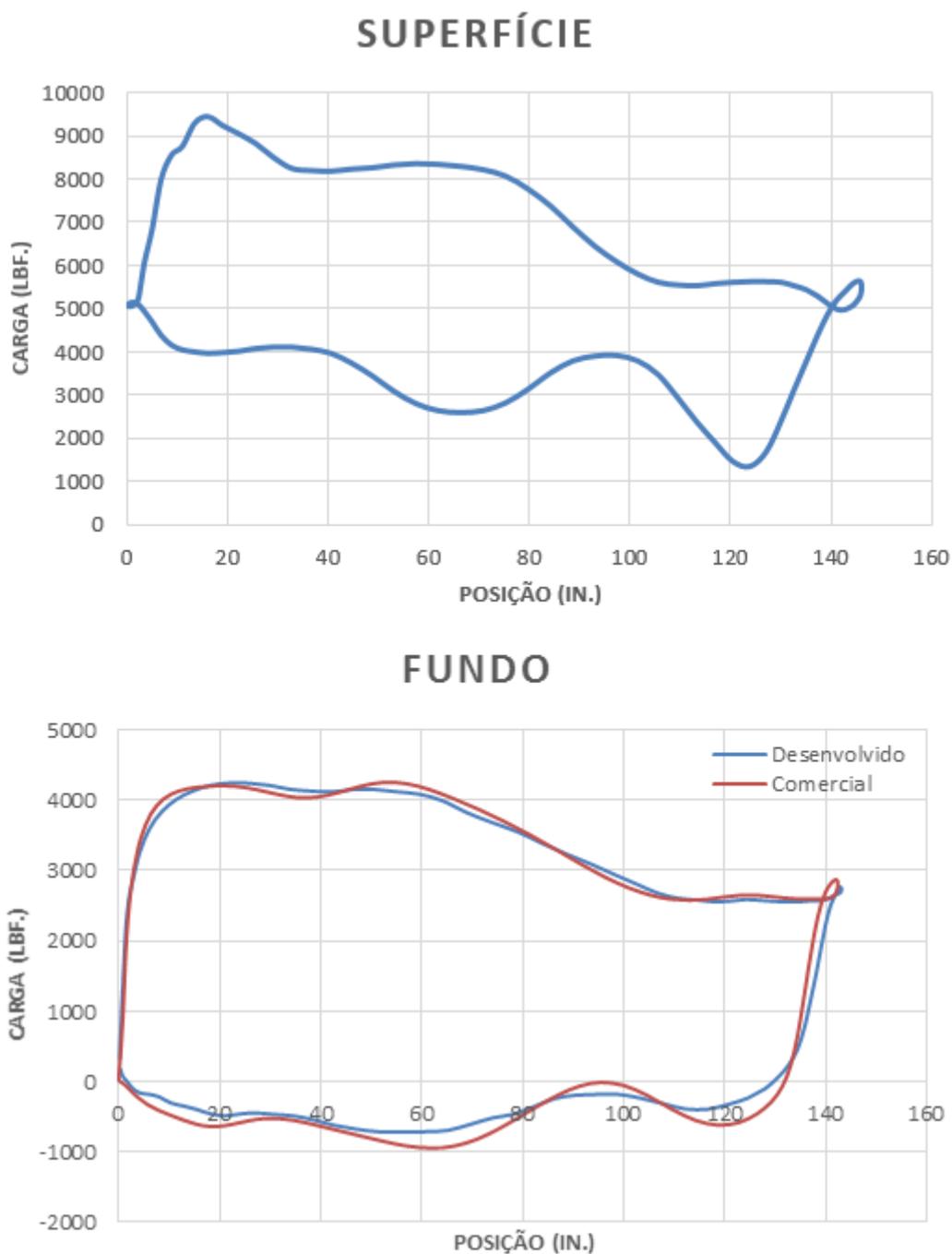
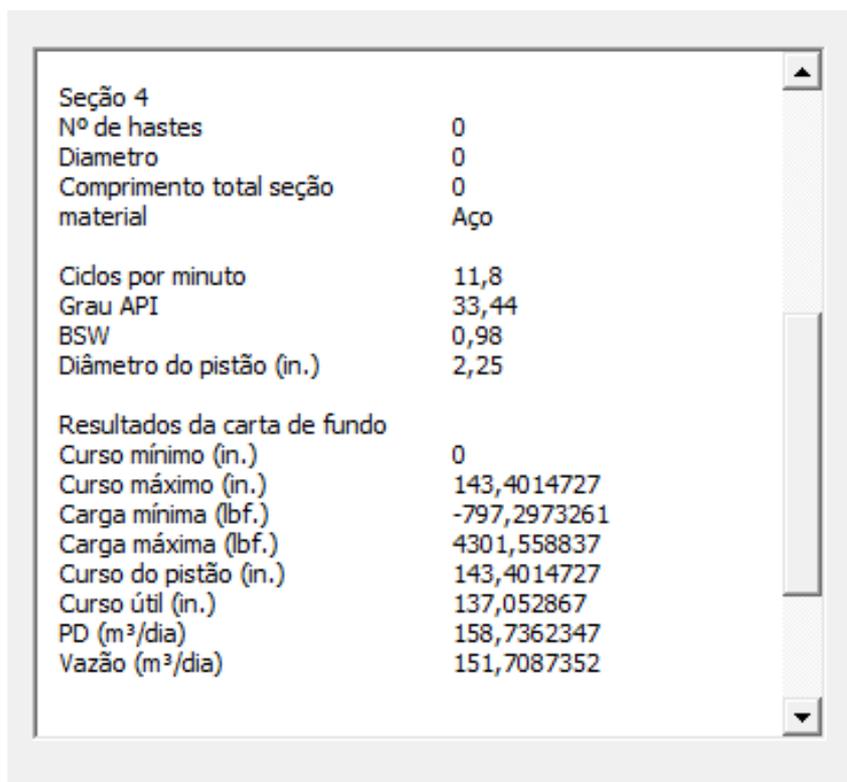


Figura 4.13. Resumo dos dados para o poço 3.



The image shows a screenshot of a software window displaying well data for 'Seção 4'. The data is presented in a list format with two columns: the parameter name and its corresponding value. The parameters include well characteristics, operational settings, and bottom hole survey results.

Seção 4	
Nº de hastes	0
Diametro	0
Comprimento total seção material	0
	Aço
Cidos por minuto	11,8
Grau API	33,44
BSW	0,98
Diâmetro do pistão (in.)	2,25
Resultados da carta de fundo	
Curso mínimo (in.)	0
Curso máximo (in.)	143,4014727
Carga mínima (lb.f.)	-797,2973261
Carga máxima (lb.f.)	4301,558837
Curso do pistão (in.)	143,4014727
Curso útil (in.)	137,052867
PD (m³/dia)	158,7362347
Vazão (m³/dia)	151,7087352

Como dito no capítulo anterior, os poços 4 e 5 apresentam colunas de hastes combinadas formadas por seções de materiais diferentes. No entanto, o programa comercial, usado para verificar se as cartas estavam sendo geradas corretamente, não considera essa situação. Para averiguar se as cartas de fundo estavam de acordo com o previsto, ambas foram avaliadas por um engenheiro da área, comprovando a eficácia da ferramenta. Contudo, vale frisar que a ferramenta desenvolvida é restrita à poços verticais e como esses são direcionais as cartas de fundo (Figura 4.14 e 4.15) não são ideais. O cálculo das cartas de fundo em poços direcionais pressupõe uma equação diferencial parcial diferente da utilizada.

Figura 4.14. Carta de superfície e de fundo para o poço 4.

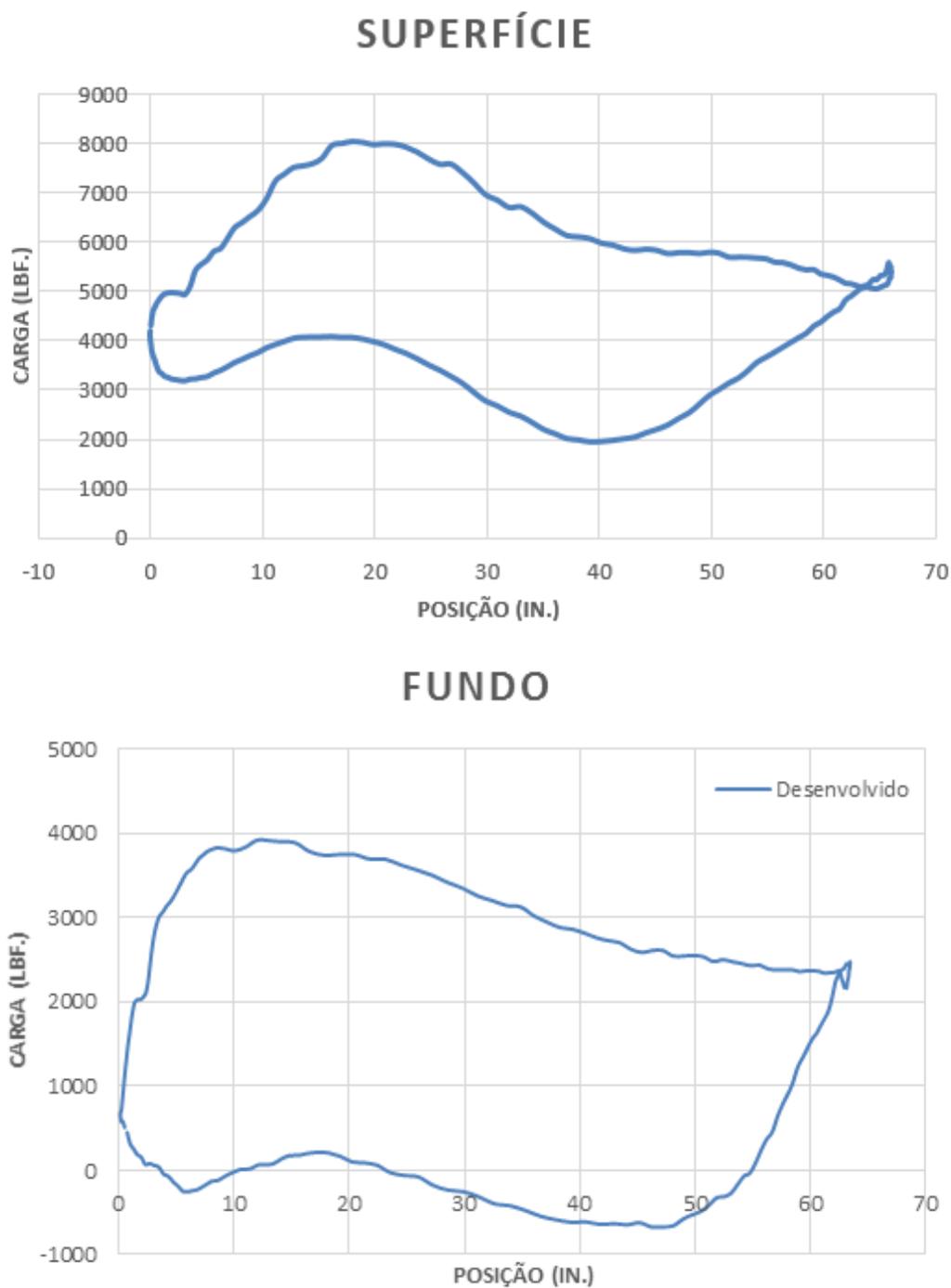
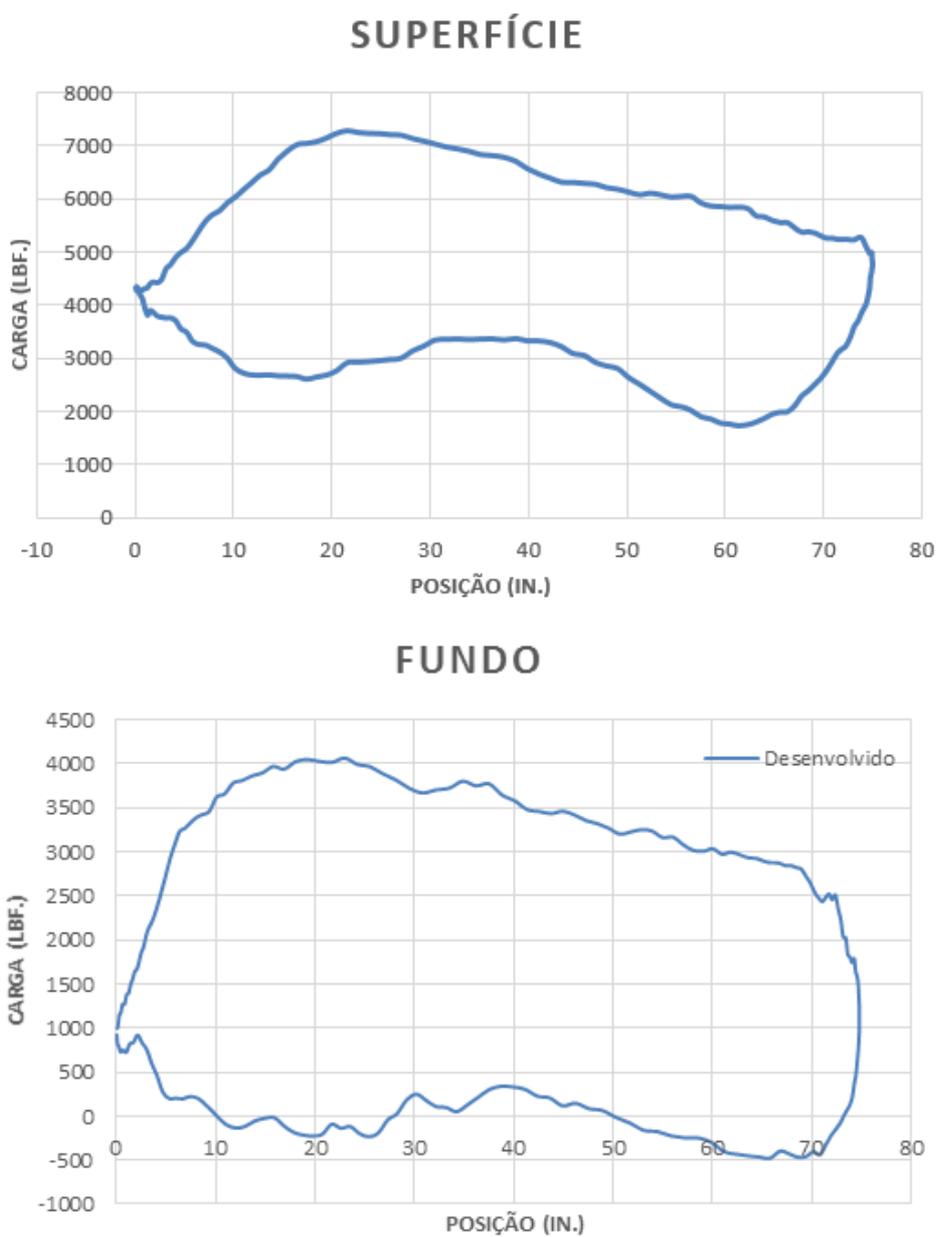


Figura 4.15. Carta de superfície e de fundo para o poço 5.



Capítulo 5

Conclusão

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, projetou-se primeiramente o protótipo de uma unidade de bombeio que fosse capaz de simular o funcionamento de um sistema de bombeio mecânico. Além disso, pensando na futura automação dessa unidade de bombeio, desenvolveu-se uma ferramenta computacional que gera cartas dinamométricas de fundo a partir de cartas de superfície, de fácil aquisição em campo. A ferramenta também consegue obter a vazão de líquido na superfície através da carta de fundo gerada.

A metodologia empregada para obter as medidas da UB foi simples, baseando-se em uma unidade de bombeio real e adotando uma escala de redução. Com essas medidas as peças foram desenhadas no *SketchUp* e poderão ser fabricadas. Já para a carta de fundo, adotou-se a metodologia desenvolvida por Everitt e Jennings (1992), na qual o comportamento da coluna de hastes é modelada a partir da equação da onda amortecida, sendo essa solucionada pelo método numérico das diferenças finitas.

No intuito de validar a ferramenta computacional desenvolvida, usou-se três poços, incluindo poços com hastes combinadas e, por meio de seus respectivos dados e cartas de superfície, as cartas de fundo foram geradas em comparação com as fornecidas através de um programa comercial. Todas as cartas geradas foram similares às obtidas comercialmente e as vazões calculadas por meio da carta de fundo também estavam de acordo com o previsto, provando que o programa atingiu o objetivo proposto.

A carta de superfície, embora de aquisição economicamente viável, é de difícil interpretação, já que além de refletir as condições da bomba de fundo é formada por um ruído. Diante disso, ressalta-se a importância de se obter as cartas dinamométricas de fundo para a avaliação do funcionamento de um sistema de bombeio mecânico.

O protótipo, que ainda precisa ser construído, abre espaço para que outros projetos sejam criados com base nele, como a automação da unidade de bombeio. Através de sensores de carga e posição, pode-se obter a carta dinamométrica de superfície, e, assim, a ferramenta computacional criada nesse trabalho será empregada para gerar a de fundo. Além da automação, a parte de subsuperfície da unidade de bombeio poderá mostrar como funciona a bomba de fundo do sistema de bombeio mecânico, sendo uma ferramenta academicamente interessante.

Por fim, como recomendação para trabalhos futuros baseados na ferramenta computacional, seria interessante incorporar o cálculo para poços direcionais e o fator de calibração para a vazão.

Referências

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 11AR**: Recommended Practice for Care and Use of Subsurface Pumps. 4 ed. Washington, Estados Unidos: API Publishing Services, 2000.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API TR 11L**: Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems (Conventional Units). 5 ed. Washington, Estados Unidos: Api Publishing Services, 2008.

ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Pereira de. **Cálculo da carta dinamométrica de fundo para poços direcionais**. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

BARRETO FILHO, Manuel de Almeida. **Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico de bombeio mecânico em poços de petróleo**. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1993.

BARRETO FILHO, Manuel de Almeida et al. **Automatic Downhole Card Generation and Classification**. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 1996, Denver, Colorado. Society Of Petroleum Engineers, 1996. p. 311 - 318. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2118/36605-MS>>. Acesso em: 04 abr. 2015.

BROWN, Kermit E. **Overview of artificial lift systems**. Journal Of Petroleum Technology. Tulsa, Estados Unidos, p. 2384-2396. out. 1982.

COSTA, Rutácio de Oliveira. **Bombeamento mecânico alternativo em poços direcionais**. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1995.

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

EVERITT, T.A.; JENNINGS, J.W. **An improved finite-difference calculation of downhole dynamometer cards for sucker-rod pumps**. SPE Production Engineering, 121-127. fev. 1992.

GIBBS, S. G., Houston. **Method of determining sucker rod pump performance**. EUA n. 3343409. 26 de setembro de 1967. United States Patent Office.

GOMES, Heitor Penalva. **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente para a Análise de Cartas Dinamométricas no Método de Elevação por Bombeio Mecânico**. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

HOFFMAN, Joe D.. **Numerical Methods for Engineers and Scientists**. 2. Ed. Nova Iorque, Estados Unidos: Marcel Dekker, 2001.

KNAPP, Roy M.. **A Dynamic Investigation of Sucker Rod Pumping**. 1969. 42 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, University Of Kansas, Lawrence, Kansas, Estados Unidos, 1969.

LIMA, Fábio Soares de. **Detecção e Classificação de Modos de Operação do Bombeio Mecânico Via Cartas Dinamométricas**. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

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

VIDAL, Francisco José Targino. **Desenvolvimento de um Simulador de Bombeio por Cavidades Progressivas**. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

WEISZFLOG, Walter (Ed.). **Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**. [s. l.]: Melhoramentos, 2012. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br>>. Acesso em: 15 maio 2015.

Anexo

ANEXO

Nesse anexo a dedução da equação da onda, proposta por Everitt e Jennings (1992) é mostrada. Na Equação (1), tem-se a equação da onda amortecida.

$$v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{144Eg_c}{\rho}} \quad (2)$$

Com o objetivo de considerar hastes com diâmetros e materiais variáveis, multiplica-se toda a equação por $\frac{\rho A}{144g_c}$, Equação (3), resultando na Equação (4),

$$\frac{\rho A}{144g_c} \frac{144Eg_c}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho A}{144g_c} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho A}{144g_c} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (4)$$

A resolução dessa equação diferencial parcial é feita pelo método das diferenças finitas. Sendo as aproximações mostradas nas Equações (5), (6) e (7).

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{i,j} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right|_{i,j} = \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta t^2} \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{i,j} = \frac{\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i+\frac{1}{2},j} - \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta x} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x^2} - \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (7)$$

Na Equação (7) o Δx^2 aparece. Deseja-se, no entanto, trabalhar com Δx já que permitiria um Δx diferente para cada tamanho de haste, obtendo soluções exatas para hastes combinadas. Dessa forma, a Equação (7) é rearranjada para que esse termo apareça, resultando na Equação (8).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j} = \frac{1}{(\Delta x)^+} \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} - \frac{1}{(\Delta x)^-} \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (8)$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x^+ + \Delta x^-}{2} \quad (9)$$

Substitui-se essas aproximações por diferenças finitas na Equação (4), resultando na Equação (10), com operações algébricas.

$$EA \left[\frac{1}{(\Delta x)^+} \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} - \frac{1}{(\Delta x)^-} \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \right] = \frac{\rho A}{144 g_c} \left(\frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta t^2} + c \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta t} \right) \quad (10)$$

$$\left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+ \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} \right) - \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^- \left(\frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \right) = \frac{\rho A}{144 g_c} \left[\left(\frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta t^2} \right) + c \left(\frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta t} \right) \right] \quad (11)$$

$$\left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+ \frac{1}{\Delta x} u_{i+1,j} = u_{i,j+1} \left(\frac{\rho A}{144 g_c \Delta t^2} + \frac{c \rho A}{144 g_c \Delta t} \right) + u_{i,j} \left[\left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+ \frac{1}{\Delta x} + \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^- \frac{1}{\Delta x} - \frac{2\rho A}{144 g_c \Delta t^2} - \frac{c \rho A}{144 g_c \Delta t} \right] + u_{i,j-1} \left(\frac{\rho A}{144 g_c \Delta t^2} \right) - \left[\left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^- \frac{1}{\Delta x} \right] u_{i-1,j} \quad (12)$$

Multiplica-se toda a Equação (12) por $\overline{\Delta x}$, obtendo-se a Equação (13).

$$\left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+ u_{i+1,j} = u_{i,j+1} \left[\frac{\overline{\Delta x}}{\Delta t^2} \frac{\rho A}{144 g_c} (1 + c \Delta t) \right] - u_{i,j} \left[(2 + c \Delta t) \frac{\overline{\Delta x}}{\Delta t^2} \frac{\rho A}{144 g_c} - \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+ - \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^- \right] + u_{i,j-1} \left(\frac{\overline{\Delta x}}{\Delta t^2} \frac{\rho A}{144 g_c} \right) - u_{i-1,j} \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^- \quad (13)$$

Divide-se a Equação (13) por $\left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+$ e se faz uma média para $\frac{\rho A}{144 g_c}$,

mostrada na Equação (14), obtendo-se finalmente a Equação (15), usada para transmitir a posição da superfície à posição imediatamente antes da bomba de fundo.

$$\alpha = \frac{\overline{\Delta x}}{\Delta t^2} \left[\frac{\left(\frac{\rho A}{144 g_c} \right)^+ + \left(\frac{\rho A}{144 g_c} \right)^-}{2} \right] \quad (14)$$

$$u_{i+1,j} = \frac{u_{i,j+1} \left[\alpha(1+c\Delta t) \right] - u_{i,j} \left[\alpha(2+c\Delta t) - \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+ - \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^- \right] + \alpha u_{i,j-1} - u_{i-1,j} \left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^-}{\left(\frac{EA}{\Delta x} \right)^+} \quad (15)$$