



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

OBTENÇÃO DE CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE FUNDO ATRAVÉS DE DADOS DE SENSORES DE SUBSUPERFÍCIE

Lucas Gurgel de Carvalho

Orientadora: Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli

Co-Orientador: Antônio Pereira de Araújo Júnior

Novembro de 2014

LUCAS GURGEL DE CARVALHO

**OBTENÇÃO DE CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE FUNDO
ATRAVÉS DE DADOS DE SENSORES DE SUBSUPERFÍCIE**

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 2014.

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

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

Eng. Msc. Antônio Pereira de Araújo Júnior
Membro Examinador – PETROBRAS

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo apoio, incentivo, disponibilidade e por estarem sempre dispostos a se sacrificar por mim.

Aos meus amigos pelos momentos de dificuldade e de alegria que passamos juntos durante toda essa jornada.

À Petrobras e ao PRH PB-221 pelo apoio financeiro.

Ao laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN), pela parceria para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus orientadores, Carla Wilza Souza de Paula Maitelli e Antônio Pereira de Araújo Júnior pelos ensinamentos, confiança e disponibilidade em ajudar.

RESUMO

Cartas dinamométricas de fundo são a principal forma de avaliar o funcionamento de um sistema de elevação artificial operando por Bombeio Mecânico visto que, através delas, é possível saber as condições da bomba localizada no fundo do poço. Elas podem assumir diferentes formatos e indicar diferentes situações de funcionamento, incluindo possíveis falhas no sistema. Neste trabalho foi desenvolvida uma sistemática de geração de cartas dinamométricas de fundo através de dados coletados por equipamentos eletrônicos instalados em poços reais. Os equipamentos contêm sensores que medem dados de pressão, temperatura, carga e aceleração e foram instalados em diferentes pontos dos poços. Foram analisados dados coletados em poços operando com Unidade de Bombeio convencional e Unidade de Bombeio Rotaflex. O modelo foi implementado em linguagem VBA e comparado a dados de bibliografia apresentando resultados considerados satisfatórios devido à semelhança das cartas geradas no trabalho com cartas geradas pelo próprio software de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais. Além disso, uma análise da aceleração lateral medida pelos sensores também é feita.

Palavras-chave: Carta dinamométrica, Bombeio Mecânico, Carta de fundo.

ABSTRACT

Downhole dynamometer cards are the main mean to evaluate artificial lift sucker-rod pumping systems because through them it is possible to sense the conditions in which the downhole pump is operating. These cards can take several different forms and indicate different situations of functioning, including failures that may occur in the system. In this work a methodology to generate downhole cards using data from electronic equipments installed in real wells was developed. The equipments carry sensors that make measurements of pressure, temperature, load and acceleration and were installed at different locations in the wells. Data collected from wells operating with conventional pumping unit and Rotaflex pumping unit were analyzed. The model was implemented in VBA language and compared to other bibliography data leading to satisfactory results due to the similarity observed between the cards generated in the work and cards generated by the actual interface software linked to the equipment that made the original measurements. Besides, an analysis of the lateral acceleration measured by the sensors is also made.

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

Sumário

Sumário	6
1. Introdução	10
1.1 Objetivo	12
2. Aspectos Teóricos.....	15
3. Metodologia e Desenvolvimento	20
4. Resultados e Discussões.....	26
5. Conclusão	34
Referências Bibliográficas	36

Lista de Figuras

Figura 1.1. Bomba de fundo e seus componentes (Fonte: Costa, 2008).	11
Figura 1.2. Sistema completo de Bombeio Mecânico (Fonte: Rossi, 2003).	12
Figura 2.1. Curso ascendente e descendente (Fonte: Barreto Filho, 1993).	16
Figura 2.2. Carta dinamométrica de superfície (Fonte: Nascimento, 2005).	18
Figura 2.3. Carta dinamométrica de fundo (Fonte: Everitt e Jennings, 1992).	18
Figura 3.1. Gráfico de aceleração vs. tempo com segmentação de dados em ciclos.	21
Figura 3.2. Comparação de carta de fundo sem filtragem (a) e carta com filtragem (b).	23
Figura 3.3. Cartas de diferentes sensores plotadas no mesmo gráfico (Unidade de Bombeio convencional).	23
Figura 3.4. Cartas de diferentes sensores plotadas no mesmo gráfico (Unidade de Bombeio Rotaflex).	24
Figura 4.1. Semelhança entre cartas geradas no trabalho (a) e cartas geradas pelo próprio software de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais (b) disponíveis em (Wagonner e Mansure, 2000).	26
Figura 4.2. Gráfico da aceleração lateral e três cargas efetivas do primeiro teste realizado com sensor posicionado logo acima da bomba. A aceleração lateral foi deslocada para melhor visualização.	28
Figura 4.3. Gráfico da aceleração lateral e três cargas efetivas do segundo teste realizado com sensor posicionado logo acima da bomba. A aceleração lateral foi deslocada para melhor visualização.	289
Figura 1.4. Dados de aceleração, velocidade e posição calculados no trabalho (a) e calculados pelo software de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais (b). A aceleração lateral foi deslocada para melhor visualização.	30
Figura 4.5. Cartas de fundo de todos os ciclos ocorridos durante o tempo de medição em Unidade de Bombeio convencional (a) e Rotaflex (b).	31

Lista de Símbolos e Abreviaturas

a	Aceleração (in/s ²)
$a(k)$	Aceleração no ponto (k) (in/s ²)
Ao	Área da seção transversal da coluna de hastes (in ²)
$a_{real}(k)$	Aceleração real no ponto (k) (in/s ²)
$Carga_{Efetiva}$	Carga efetiva (lbf)
$Carga_{Verdadeira}$	Carga verdadeira (lbf)
dt	Frequência de aquisição de dados (s)
$MÉDIA(a_i^n)$	Média das acelerações do início (i) ao fim (n) de um ciclo (in/s ²)
$MÉDIA(v_i^n)$	Média das velocidades do início (i) ao fim (n) de um ciclo (in/s)
$MÍNIMO(s_i^n)$	Valor mínimo de posição do início (i) ao fim (n) de um ciclo (in)
Po	Pressão externa ao ponto onde é obtida Ao (psi)
$s(k)$	Posição no ponto (k) (in)
$s_{real}(k)$	Posição real no ponto (k) (in)
$v(k)$	Velocidade no ponto (k) (in/s)
$v_{real}(k)$	Velocidade real no ponto (k) (in/s)
$\sum_i^n a$	Somatório das acelerações do início ao fim de um ciclo (in/s ²)

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Poços de petróleo que, no início de sua vida produtiva, possuem energia suficiente para que os fluidos sejam produzidos naturalmente são chamados poços surgentes. Estes poços cumprem o pré-requisito básico para garantir a produção de um poço que é possuir pressão de fundo maior do que a soma das perdas de carga que ocorrem ao longo do fluxo até a superfície. Quando esse pré-requisito não é cumprido, o poço para de produzir e morre. Existem dois principais motivos que causam a morte de um poço: a pressão de fluxo no fundo do poço cai até não ser mais suficiente para superar as perdas de carga, ou as perdas de carga aumentam até superarem a pressão de fluxo no fundo do poço. O primeiro caso acontece devido à retirada de fluidos do reservatório que causa uma queda gradual da pressão do reservatório. No segundo caso problemas mecânicos como restrições ao fluxo no meio poroso ou na coluna de produção ou mudança na composição dos fluidos aumentam a resistência do fluxo e consequentemente as perdas de carga (Takács, 2003).

Para que poços improdutivos voltem a produzir ou mesmo para aumentar a produção de poços surgentes, métodos de elevação artificial são utilizados. Esses métodos atuam fornecendo energia adicional ao poço necessária para elevar os fluidos ou diminuindo as perdas de carga ao longo do fluxo do poço. Um dos métodos de elevação artificial mais simples e mais utilizados é o Bombeio Mecânico.

O Bombeio Mecânico consiste em uma bomba alternativa de fundo que transmite energia mecânica para o fluido na forma de um acréscimo de pressão. A Figura 1.1 ilustra uma bomba de fundo utilizada no sistema de Bombeio Mecânico. Ela é composta basicamente de pistão, camisa e válvulas de passeio e de pé. As válvulas são consideradas o coração da bomba de fundo, pois uma operação de bombeamento eficiente depende principalmente da ação apropriada das válvulas de passeio e de pé. Elas são simples *check valves* e operam segundo o princípio sede-esfera (Costa, 2008).

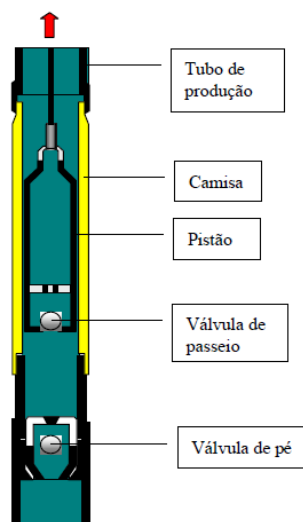


Figura 1.1. Bomba de fundo e seus componentes (Fonte: Costa, 2008).

A bomba é ligada à superfície por uma coluna de hastes que é então ligada à unidade de bombeio na superfície. A unidade de bombeio é responsável por transformar o movimento rotativo do motor de superfície em movimento alternativo que é transmitido à coluna de hastes, elemento de ligação entre a bomba de fundo e a unidade de bombeio. A coluna de hastes é, portanto, responsável por transmitir a potência entregue pela unidade de bombeio à bomba de fundo. Parte da potência é dissipada pelas resistências presentes no movimento (Barreto Filho, 1993).

Devido à sua simplicidade de utilização, manutenção e baixo custo, o Bombeio Mecânico é o método de elevação artificial mais antigo e também mais utilizado em todo o mundo (Thomas, 2004). Contudo, o Bombeio Mecânico possui desvantagens de utilização em poços com alta razão gás líquido (RGL), produção excessiva de areia, e/ou alta profundidade. A Figura 1.2 mostra o sistema completo com a ligação da bomba de fundo à coluna de hastes e da coluna de hastes à unidade de bombeio na superfície.

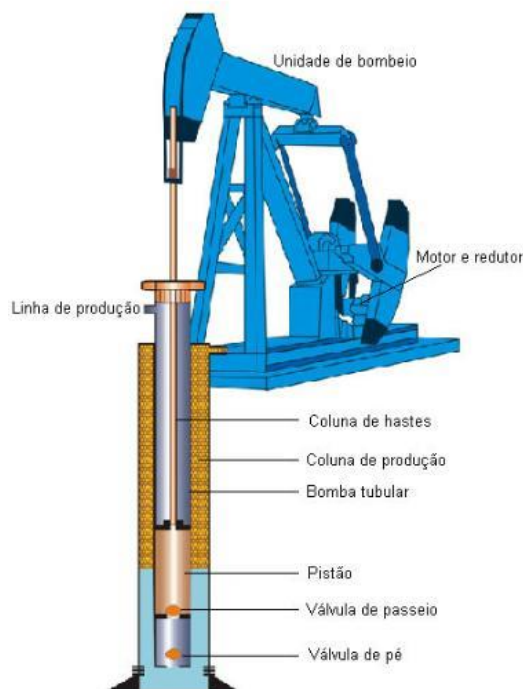


Figura 1.2. Sistema completo de Bombeio Mecânico (Fonte: Rossi, 2003).

Dada a simplicidade e a larga utilização do Bombeio Mecânico, torna-se indispensável o conhecimento de métodos eficientes de análise, controle e monitoramento dos equipamentos utilizados nesse método. As cartas dinamométricas são utilizadas justamente para esse propósito.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal obter cartas dinamométricas de fundo através de dados coletados por equipamentos instalados em poços reais produzindo por Bombeio Mecânico. Os equipamentos contêm sensores que medem dados de pressão, temperatura, carga e aceleração e foram instalados em diferentes pontos dos poços. Um editor de planilhas juntamente com a linguagem VBA são as ferramentas utilizadas para alcançar tal objetivo. Um algoritmo que avalia os dados, identifica ciclos, calcula parâmetros e esboça as cartas deve ser desenvolvido.

Além disso, também é objetivo desse trabalho comparar os resultados obtidos com dados de bibliografia para validação do método utilizado e analisar e interpretar as cartas geradas de modo a identificar as condições de funcionamento que estas indicam

tanto pelo seu formato quanto pela análise de outros dados medidos pelos sensores como a aceleração lateral e diferentes cargas.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. Aspectos Teóricos

Devido ao movimento alternativo da unidade de bombeio, tanto a bomba de fundo quanto a coluna de hastes e a coluna de produção estão sujeitas a cargas cíclicas. O movimento alternativo é dividido em curso ascendente e curso descendente.

No início do curso ascendente, o pistão, parte móvel da bomba de fundo que contém a válvula de passeio, encontra-se no ponto morto inferior e é puxado para cima com a válvula de passeio fechada devido ao peso da coluna de fluido sobre a mesma, o que promove o deslocamento de parte dos fluidos da coluna de produção para a linha de produção. Enquanto isso, a pressão no interior do corpo da bomba diminui devido ao aumento do volume, fazendo com que a válvula de pé, posicionada na parte inferior da camisa da bomba, abra e os fluidos do reservatório se desloquem para o interior da bomba e, conseqüentemente, a camisa da bomba seja preenchida por esse mesmo fluido.

No curso ascendente é importante observar que o peso da coluna de líquido acima do pistão é elevado e sustentado pela válvula de passeio. Este efeito causa o possível alongamento das hastes (Nascimento, 2005).

No final do curso ascendente, o pistão alcança o ponto morto superior e o curso descendente inicia. No curso descendente, a válvula de passeio abre devido ao aumento da pressão no interior da camisa enquanto a válvula de pé fecha devido à pressão da coluna de fluido que se encontra agora sustentada por esta válvula. Portanto, a carga de fluido é transferida para coluna de produção e esta pode sofrer um possível alongamento. É importante observar que devido à elasticidade das colunas, o curso do pistão é muitas vezes diferente do curso na superfície da haste polida e que estas descrições de curso ascendente e descendente valem para casos ideais de funcionamento, podendo variar para casos especiais como algumas situações de falha.

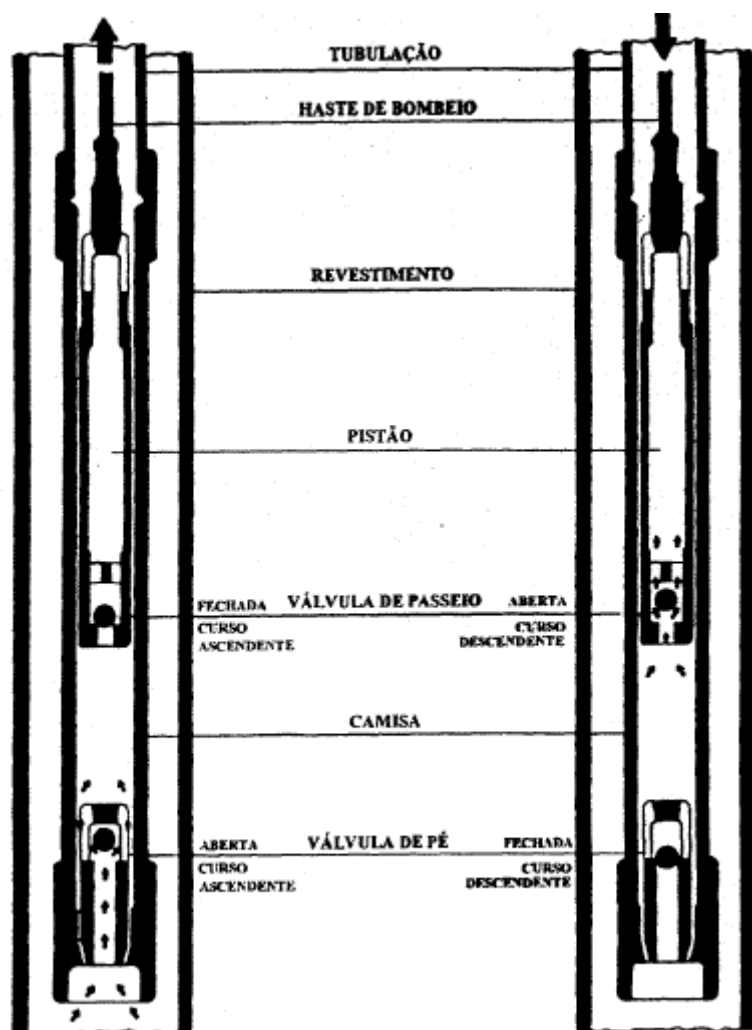


Figura 2.1. Curso ascendente e descendente (Fonte: Barreto Filho, 1993).

Uma carta dinamométrica é simplesmente um gráfico que relaciona carga no eixo das ordenadas e posição no eixo das abscissas, durante um ciclo completo de bombeio. Existem dois tipos de cartas dinamométricas: as cartas de superfície e as cartas de fundo. As cartas de superfície apresentam as cargas em função da posição da haste polida, primeira haste da coluna de hastes, situada na superfície, enquanto que a carta de fundo representa as cargas em função da posição em algum ponto no fundo do poço, geralmente logo acima da bomba de fundo.

Através da carta de superfície, é possível obter parâmetros importantes do sistema de Bombeio Mecânico, a saber, as cargas máxima e mínima na haste polida, a potência requerida para a Unidade de Bombeio e o ajuste do contrabalanço da Unidade de Bombeio. Porém, muitas vezes a carta de superfície é insuficiente para identificar as condições de funcionamento da bomba localizada no fundo do poço e detectar

eventuais situações de falhas nessa bomba. Surge então a necessidade de se obter a carta de fundo.

As cartas dinamométricas de fundo que registram as cargas no fundo do poço, logo acima da bomba, em função do curso da mesma são a principal ferramenta utilizada no acompanhamento de sistemas de Bombeio Mecânico e diagnóstico de falhas no sistema, visto que, através delas, é possível saber as condições da bomba de fundo (Lima et al., 2009). Porém, medições diretas no fundo de poços operando por Bombeio Mecânico são extremamente inviáveis devido à pequena dimensão das hastes de bombeio em relação a equipamentos sensores e às condições mecânicas extremas às quais estariam sujeitos os fios responsáveis por transmitir os dados coletados à superfície. Tais medições são tão inviáveis que o banco de dados utilizado nesse trabalho é único no mundo.

Atualmente, utilizam-se cartas dinamométricas de superfície para estimar cartas de fundo, visto que um simples dinamômetro conectado à haste polida localizada na superfície é capaz de gerar essas cartas.

Para estimar a carta de fundo, é preciso resolver a equação de onda amortecida, visto que, devido à elasticidade da coluna de hastes, ocorre uma perda irreversível de energia na forma de ondas de tensão que se propagam na velocidade do som e a equação de onda amortecida modela a propagação dessas ondas em uma haste delgada ideal (Ehimeakhe, 2010).

Algoritmos e modelos matemáticos de alta complexidade, como os descritos em Barreto Filho (1993), Everitt & Jennings (1992) e Gibbs (1966) são utilizados na estimativa das cartas de fundo a partir da carta de superfície. Portanto, pode-se dizer que cartas de fundo são de difícil aquisição e fácil análise, enquanto que cartas de superfície são de fácil aquisição, porém de difícil análise, em relação à bomba de fundo.

A Figura 2.2 mostra uma carta de superfície típica, já a Figura 2.3 mostra uma carta de fundo típica.

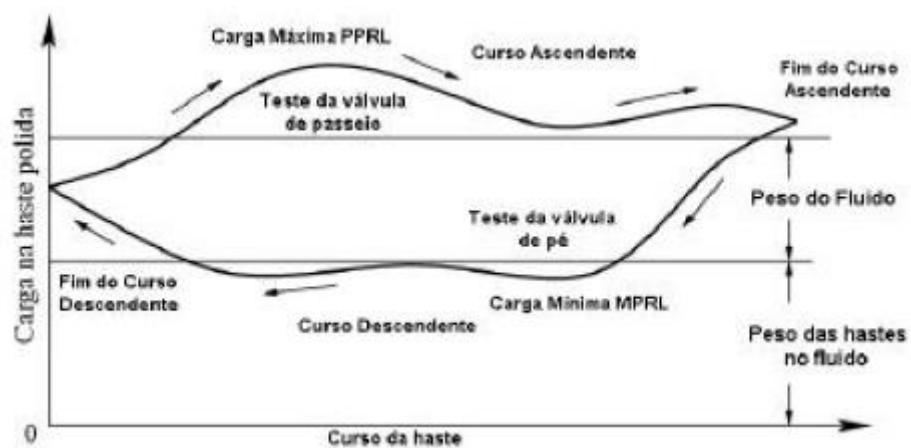


Figura 2.2. Carta dinamométrica de superfície (Fonte: Nascimento, 2005).

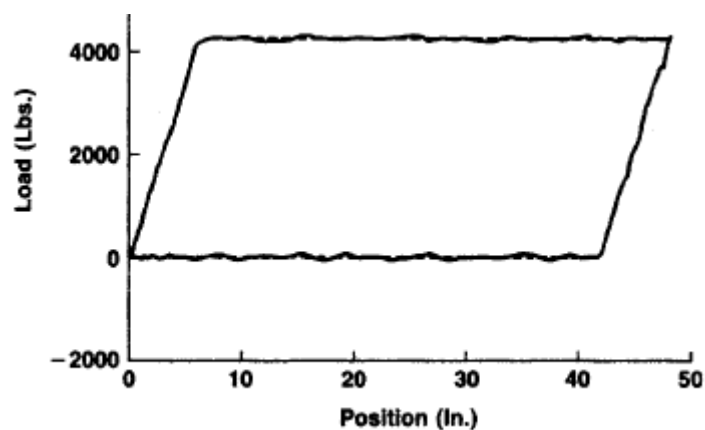


Figura 2.3. Carta dinamométrica de fundo (Fonte: Everitt & Jennings, 1992).

Capítulo 3

Metodologia e Desenvolvimento

3. Metodologia e Desenvolvimento

O banco de dados utilizado neste trabalho, denominado “The Downhole Dynamometer Database” (DDDB), foi criado com o propósito de fornecer à indústria medições diretas de alta qualidade de sistemas operando por Bombeio Mecânico. Ele contém dados de medições em poços com diferentes características. As medições foram realizadas pela Sandia National Laboratories (SNL) com equipamentos desenvolvidos pela Albert Engineering (AE). Os equipamentos contêm sensores de carga, aceleração, pressão e temperatura e foram instalados em diferentes pontos ao longo da coluna de hastes. Maiores informações a respeito deste banco de dados podem ser obtidas em Wagonner e Mansure, (2000).

Os dados das medições encontram-se inicialmente disponíveis em planilhas eletrônicas. Para que sejam transformados em cartas dinamométricas, devem ser avaliados, segmentados, processados e filtrados. Esta seção explica como ocorre esse processo.

Como as medições ocorreram durante tempos predeterminados, o primeiro passo para a geração das cartas de fundo a partir dos dados coletados é segmentar os dados em cursos completos ocorridos durante o tempo de medição, visto que não se sabe quantos ciclos de bombeio ocorreram durante a medição.

Essa tarefa é realizada identificando os picos de aceleração característicos do início de cada curso ascendente, visto que, no final do curso descendente, o sistema tem velocidade negativa que diminui até atingir a velocidade zero e em seguida se tornar positiva, já no início do curso ascendente e isso ocorre devido a atuação de uma aceleração positiva que é máxima nesse instante. Esta é uma importante técnica utilizada por produtos comerciais.

A Figura 3.1 mostra um exemplo de segmentação dos dados em ciclos utilizando o gráfico da aceleração vs. tempo. Onze picos de aceleração positiva podem ser identificados nessa figura, o que significa que ocorreram dez ciclos de bombeio durante o tempo de medição que foi de 60 segundos nesse caso, portanto, pode-se ainda determinar a velocidade de bombeio igual a dez ciclos por minutos (10 cpm).

Nesse caso, a velocidade de bombeio é realmente igual a 10 cpm, porém, o jeito correto de se determinar tal velocidade é dividindo uma unidade de tempo pelo tempo correspondente ao período dos ciclos.

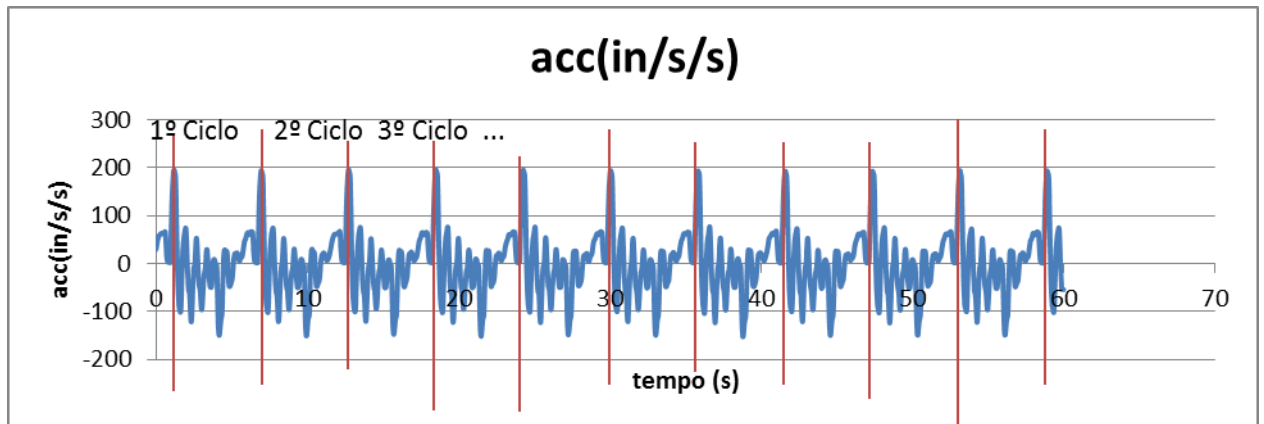


Figura 3.1. Gráfico de aceleração vs. tempo com segmentação de dados em ciclos.

Para cada ciclo, uma carta de fundo deve ser gerada. Para cada carta, é necessário definir a aceleração real em função da existência de erros de medição dos sensores.

Considerando que a velocidade ao fim de cada ciclo é a mesma, a integral da aceleração ao longo de um ciclo é nula (Equação 1). Como os dados foram coletados com frequência constante, o somatório das acelerações em cada ciclo deve ser nulo também (Equação 2). Assim, deve-se diminuir de cada valor de aceleração ao longo de um ciclo, a média da aceleração ao longo deste mesmo ciclo para se obter a aceleração real (Equação 3).

$$\oint a = 0 \quad (1)$$

$$\sum_i^n a = 0 \quad (2)$$

$$a_{real}(k) = a(k) - MÉDIA(a_i^n) \quad (3)$$

Com os valores de aceleração real calculados, calculam-se então os valores de velocidade instantânea ao longo do ciclo utilizando um método de integração numérica. Neste trabalho, a regra dos trapézios foi utilizada. Como a velocidade no início de cada ciclo é igual a zero, assume-se que o valor de velocidade inicial, $v(0)$, é igual a zero (Equação 4). Em seguida, seguindo o mesmo raciocínio usado na definição da

aceleração real, nesse caso, a posição ao fim de cada ciclo também é a mesma, define-se também a velocidade real subtraindo-se de cada velocidade calculada, a média das velocidades ao longo do ciclo (Equação 5).

$$v(k) = v(k-1) + \frac{a_{real}(k) + a_{real}(k-1)}{2} dt; v(0) = 0 \quad (4)$$

$$v_{real}(k) = v(k) - MÉDIA(v_i^n) \quad (5)$$

Para o cálculo da posição, com os valores de velocidade real e tempo, utiliza-se mais uma vez um método de integração numérica, assumindo que o valor da posição inicial em cada ciclo, $s(0)$, é igual a zero (Equação 6). Finalmente, de todos os valores de posição calculados ao longo do ciclo, subtrai-se o menor, de forma a gerar a carta a partir da posição zero (Equação 7).

$$s(k) = s(k-1) + \frac{v_{real}(k) + v_{real}(k-1)}{2} dt; s(0) = 0 \quad (6)$$

$$s_{real}(k) = s(k) - MÍNIMO(s_i^n) \quad (7)$$

Por fim, para filtrar os dados, eliminando eventuais ruídos, a média móvel é aplicada aos valores calculados de posição e aos valores medidos de carga. Então, com os dados devidamente segmentados, processados e filtrados, as cartas de fundo podem finalmente ser plotadas para cada ciclo. A fim de acompanhar a evolução no formato das cartas de fundo ao longo do poço, as cartas dos sensores posicionados em diferentes profundidades são plotadas no mesmo gráfico. A Figura 3.2 mostra a diferença entre uma carta na qual foi aplicada a filtragem de dados por média móvel e outra sem filtragem.

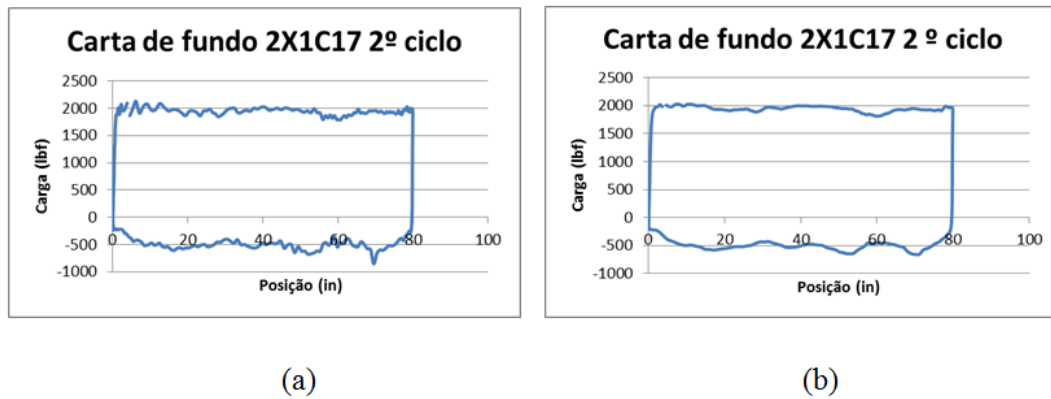


Figura 3.2. Comparação de carta de fundo sem filtragem (a) e carta com filtragem (b).

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram cartas de diferentes sensores plotadas no mesmo gráfico. Os dados da Figura 3.3 foram coletados em uma Unidade de Bombeio convencional enquanto que os dados da Figura 3.4 foram coletados em uma Unidade de Bombeio Rotaflex. Na Figura 3.3 percebe-se que os sensores 2 e 3 estão localizados no fundo do poço, próximos à bomba de fundo devido à semelhança de suas cartas com cartas de fundo e por registrarem menores cargas enquanto que os sensores 4 e 5 estão localizados mais próximos à superfície devido à semelhança de suas cartas com cartas de superfície e por registrarem maiores cargas. A profundidade da bomba, disponível no banco de dados, é 2722 *ft* enquanto que as profundidades dos sensores 2 a 5 são respectivamente 2689, 2462, 1010 e 8 *ft*.

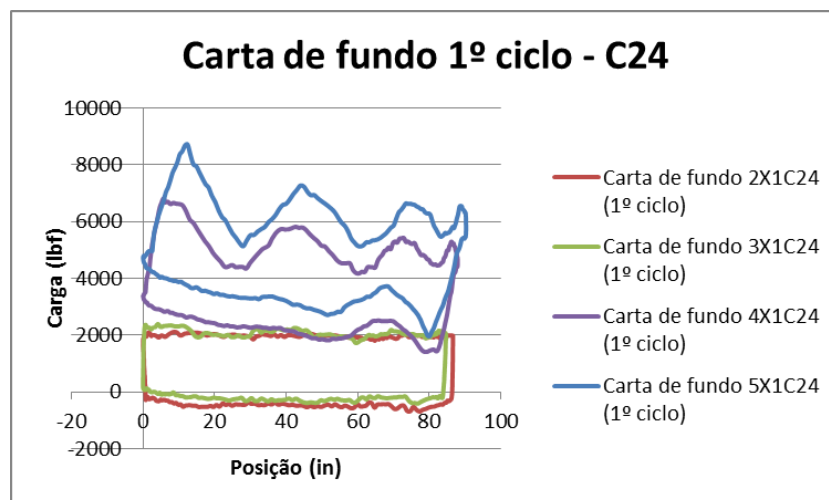


Figura 3.3. Cartas de diferentes sensores plotadas no mesmo gráfico (Unidade de Bombeio convencional).

Já na Figura 3.4, percebe-se que todos os sensores encontram-se mais próximos ao fundo do poço devido à semelhança de suas cartas com cartas de fundo. Os sensores 1, 2 e 3 encontram-se em maiores profundidades devido ao registro de menores cargas. A profundidade da bomba, disponível no banco de dados, é 9231 *ft* enquanto que as profundidades dos sensores 1 a 5 são respectivamente 9229, 9087, 8785, 7658 e 7506 *ft*.

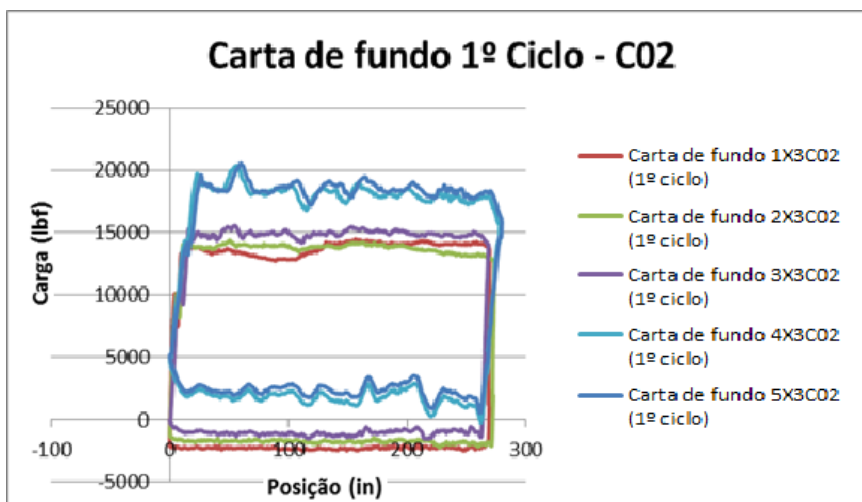


Figura 3.4. Cartas de diferentes sensors plotadas no mesmo gráfico (Unidade de Bombeio Rotaflex).

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

Algumas das cartas geradas nesse trabalho foram comparadas às aquelas disponíveis em Wagonner & Mansure (2000) que foram geradas pelo próprio software de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais. Ao observar a Figura 4.1 percebe-se que existe grande semelhança entre as cartas.

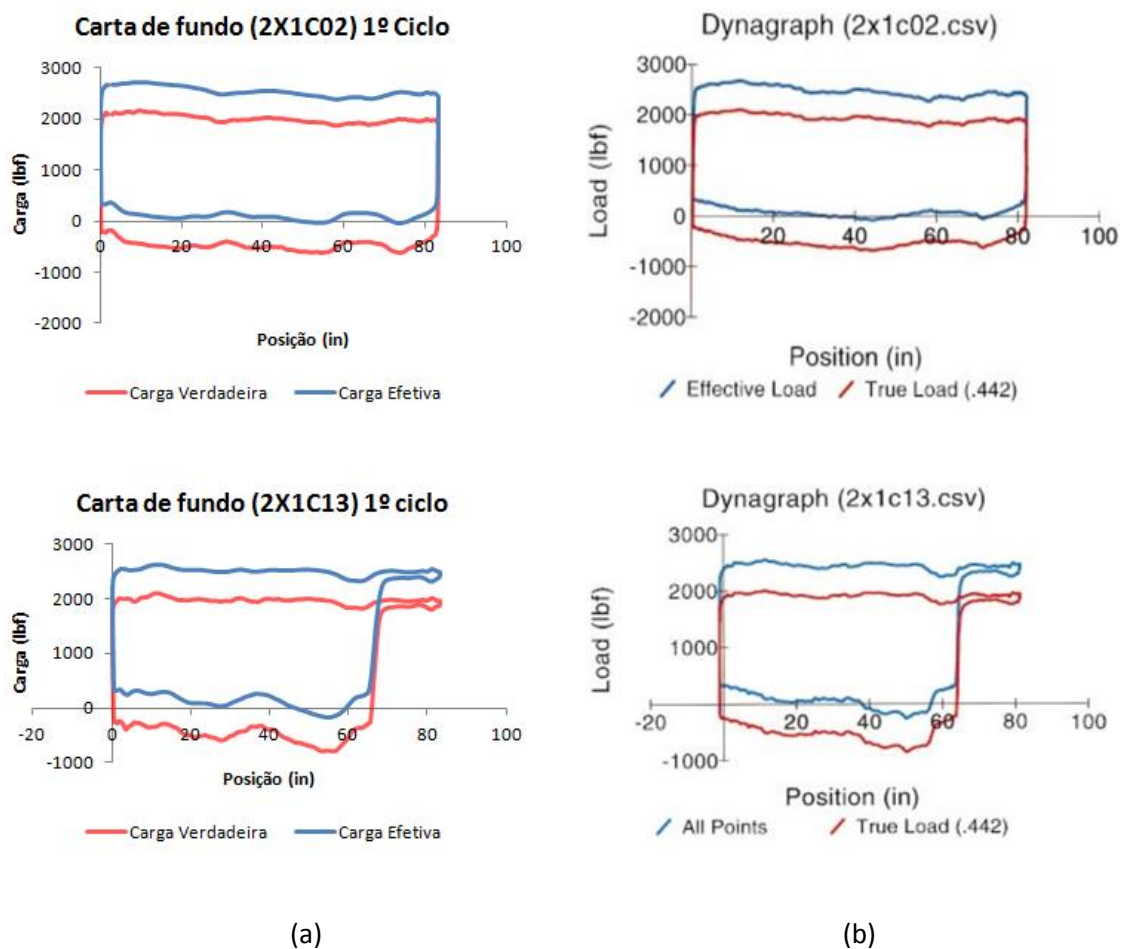


Figura 4.1. Semelhança entre cartas geradas no trabalho (a) e cartas geradas pelo próprio software de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais (b) disponíveis em (Wagonner & Mansure, 2000).

Na Figura 4.1 as cartas foram plotadas em função da carga verdadeira, medida pelos equipamentos sensores, e da carga efetiva, calculada em função da carga

verdadeira. A carga efetiva é a carga que pode causar flambagem, segundo Lea & Patillo (1995), e é obtida pela Equação 8.

$$Carga_{Efetiva} = Carga_{Verdadeira} + Po.Ao \quad (8)$$

Na Equação 8, Ao é a área da seção transversal da coluna de hastes e Po é a pressão externa ao ponto onde é obtida Ao .

Na figura 4.1, as primeiras cartas, que possuem “2X1C02” no título, representam medições do primeiro teste realizado de sensores situados logo acima da bomba. Tais cartas indicam funcionamento normal da bomba devido ao seu formato retangular. Porém, ao olhar para o trecho que representa o curso descendente, nota-se a existência de uma carga compressiva que mesmo que pequena, pode causar flambagem. A carga compressiva máxima é de cerca de 50 lbf segundo Wagonner e Mansure (2000) enquanto que a calculada nesse trabalho é de 47 lbf.

Para verificar a ocorrência ou não da flambagem, a aceleração lateral juntamente com diferentes cargas efetivas são úteis. Na medição de carga, foram usados três sensores dispostos na circunferência da luva.

A figura 4.2 mostra um gráfico com a aceleração lateral, deslocada para facilitar a visualização, e três cargas efetivas, medidas pelos três diferentes sensores, no mesmo período de tempo em que foram obtidas as cartas. A aceleração lateral aumenta no trecho descendente, quando a carga se torna compressiva, isso indica movimento lateral. Em seguida, essa aceleração diminui e as cargas se separam. O que possivelmente ocorre nesse caso é flambagem seguida de contato da coluna de hastes com a parede da coluna de produção. Segundo Wagonner e Mansure (2000), essa situação não é comprovada e outras situações podem produzir o mesmo comportamento.

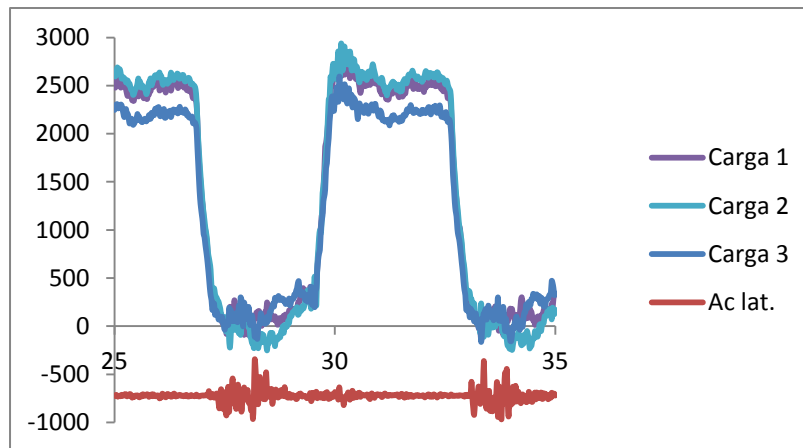


Figura 4.2. Gráfico da aceleração lateral e três cargas efetivas do primeiro teste realizado com sensor posicionado logo acima da bomba. A aceleração lateral foi deslocada para melhor visualização.

Ainda na Figura 4.1, as cartas com (2X1C13) no título representam medições de um segundo teste realizado duas horas após o primeiro. Os sensores analisados são os mesmos, logo acima da bomba. Dessa vez as cartas indicam que apenas aproximadamente 75% da bomba está sendo preenchida e consequentemente, está ocorrendo pancada de fluido. A carga compressiva máxima agora é de cerca de 250 lbf e o gráfico da aceleração lateral junto com as diferentes cargas para este caso, representado na Figura 4.3, mostra um pico maior de aceleração lateral seguido de separação das cargas. A combinação desses dois fatores observados, maior carga compressiva e maior aceleração lateral seguido de separação das cargas, pode indicar flambagem mais intensa e contato também mais intenso da coluna de hastes com a parede da coluna de produção.

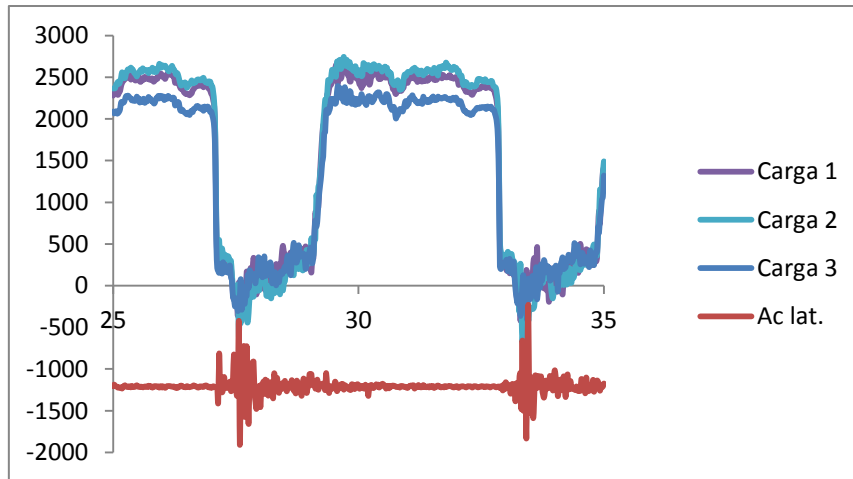
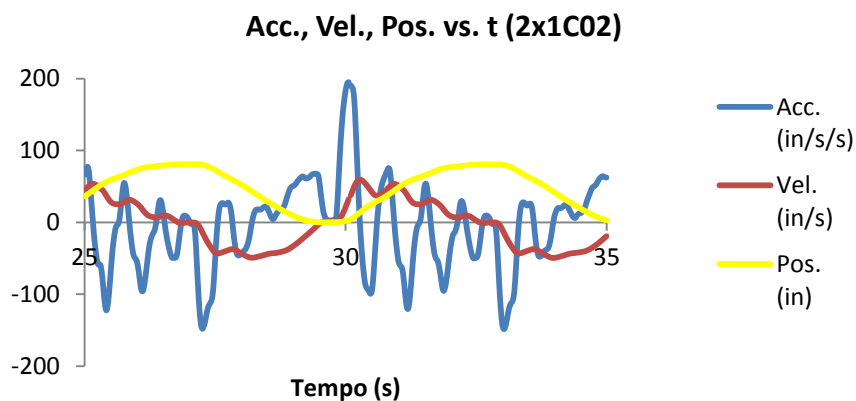
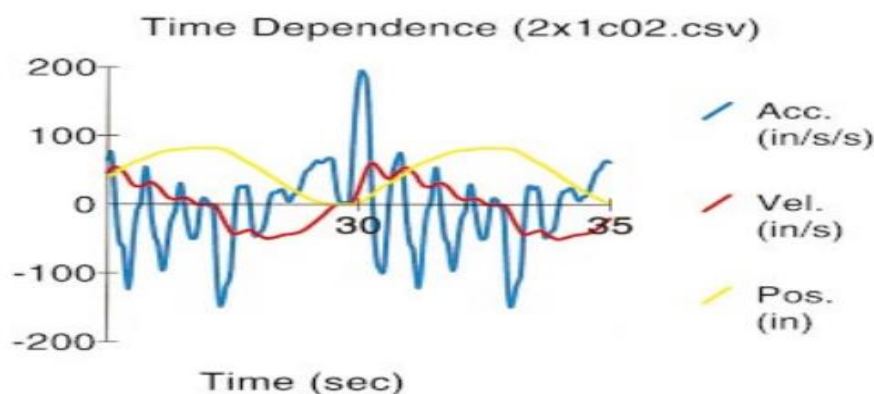


Figura 4.3. Gráfico da aceleração lateral e três cargas efetivas do segundo teste realizado com sensor posicionado logo acima da bomba. A aceleração lateral foi deslocada para melhor visualização.

Além das cartas de fundo, podem ser comparados também alguns dados calculados nesse trabalho com dados calculados pelo *software* de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais. A Figura 4.3 mostra uma comparação entre dados de aceleração, velocidade e posição. Mais uma vez percebe-se uma grande semelhança entre os gráficos.



(a)

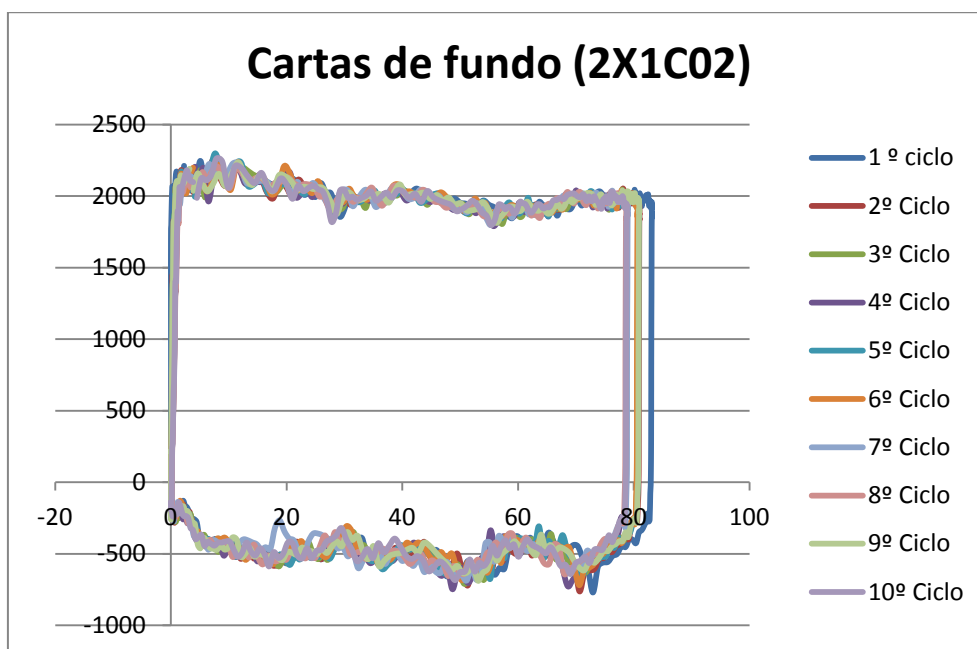


(b)

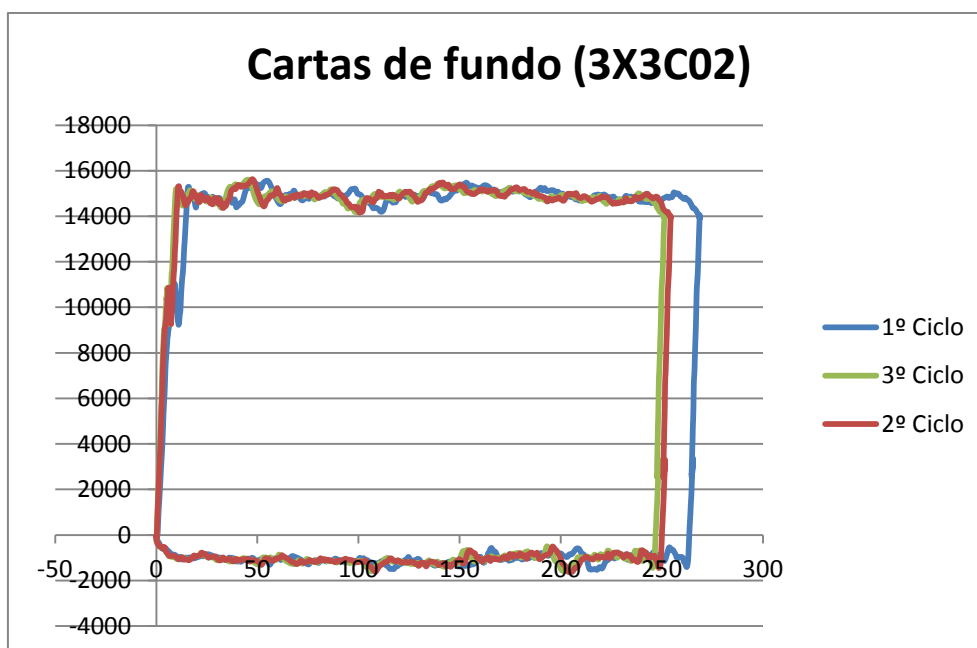
Figura 4.4. Dados de aceleração, velocidade e posição calculados no trabalho (a) e calculados pelo *software* de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais (b).

Na Figura 4.4, percebe-se que apesar da curva de posição apresentar um comportamento contínuo, as curvas de velocidade e aceleração apresentam muitas variações em curtos espaços de tempo, indicando que o sistema está acelerando e desacelerando constantemente. Isso ocorre devido à propagação das ondas de tensão na coluna.

Por fim, outro gráfico interessante de ser analisado que pode ser facilmente gerado é o da carta de fundo de todos os ciclos ocorridos durante a medição para cada sensor. A Figura 4.5 mostra um gráfico desse tipo para uma medição em Unidade de Bombeio Convencional (a), e em Unidade de Bombeio Rotaflex (b).



(a)



(b)

Figura 4.5. Cartas de fundo de todos os ciclos ocorridos durante o tempo de medição em Unidade de Bombeio convencional (a) e Rotaflex (b).

A Figura 4.5 mostra que as cartas se comportam de forma semelhante em todos os ciclos, apresentando poucas variações entre os ciclos, com exceção do ciclo 1, que nos dois casos mostrados na figura, apresenta curso ligeiramente superior. No gráfico (a) o curso máximo ocorre no primeiro ciclo e é igual a 83 in enquanto que o curso

mínimo ocorre no décimo ciclo e é igual a 79 in. Já no gráfico (b), o curso máximo ocorre no primeiro ciclo e é igual a 268 in, enquanto que o curso mínimo ocorre no terceiro ciclo e é igual a 251 in. Esse comportamento se repete em todos os casos com poucas variações. Isso ocorre possivelmente devido ao transiente elétrico inerente ao sistema.

Capítulo 5

Conclusão

5. Conclusão

Dada a grande semelhança entre as cartas e os dados gerados nesse trabalho e as cartas e os dados gerados pelo próprio *software* de interface com os equipamentos que fizeram as medições originais observada nas Figuras 4.1 e 4.3, conclui-se que o método utilizado apresenta excelentes resultados e sugere-se que seja utilizado em trabalhos futuros.

Ainda como sugestão para trabalhos futuros, algum método de integração numérica diferente do que foi utilizado, a regra dos trapézios, pode ser utilizado para análise de sensibilidade. Além disso, a filtragem de dados pode ser aplicada logo na etapa de avaliação dos dados a fim de minimizar variações bruscas das medições, facilitando o processo de segmentação.

Pode-se concluir também que o banco de dados utilizado no trabalho é uma ferramenta valiosa no estudo de cartas dinamométricas.

Além disso, como visto, a interpretação de dados de aceleração pode fornecer boas informações sobre as condições de funcionamento de um sistema operando por Bombeio Mecânico. Devido à popularização recente de acelerômetros, dispositivos eletrônicos que medem aceleração, e de microcontroladores, o acesso a dispositivos como esses ficou mais fácil e, portanto, sugere-se também um estudo que priorize a aquisição e processamento de dados de acelerômetros visando a aplicação em sistemas de Bombeio Mecânico.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems (4th ed.): API RP 11L, 1988.
- BARRETO FILHO, M.A. (1993). Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico de Bombeio Mecânico em poços de petróleo (Dissertação de Mestrado). Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- COSTA, R. O. Curso de Bombeio Mecânico. Petrobras, 2008
- EHIMEAKHE, V., "Comparative Study of Downhole Cards Using Modified Everitt-Jennings Method and Gibbs Method," Southwestern Petroleum Short Course 2010.
- EVERITT, T. A.; JENNINGS, J. W. An improved finite-difference calculation of downhole dynamometer cards for sucker-rod pumps. *SPE Production Engineering*, 121-127, fevereiro de 1992.
- GIBBS, S. G., Computer Diagnosis of Down-Hole Conditions In Sucker Rod Pumping Wells. JPT, pag. 91-98, jan., 1966.
- GIBBS, S. G., Houston. Method of determining sucker rod pump performance. EUA n. 3343409. 26 de setembro de 1967. United States Patent Office.
- IBRAHIM AHMED, M. F. e SADEK, N. N. (2012) Automatic Well Testing and PIP Calculations Using Smart Rod Pump Controllers. Society of Petroleum Engineers .(SPE 150885)
- LEA, J. F. And PATILLO, P. D. (1995) Interpretation of Calculated Forces on Sucker Rods (SPE 25416)
- NASCIMENTO, J. M. A. (2005). Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico (Dissertação de Mestrado). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- ROSSI, N. C. M. Bombeio Mecânico: apostila Universidade Corporativa PETROBRAS, 2003.
- S. LIMA, FÁBIO, H. GUEDES, LUIZ AFONSO e R. SILVA, DIEGO (2009). Detecção de falhas no sistema de Bombeio Mecânico utilizando descritores de fourier e ferramentas estatísticas.
- TAKÁCS, G. Sucker-rod pumping manual. Tulsa: PennWell Corporation, 2003.
- THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Interciência, 2ª Edição, 2004.
- WAGGONER, J. R. e MANSURE, A. J. (2000) Development of the downhole dynamometer database. Society of Petroleum Engineers .(SPE 60768)