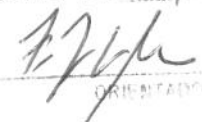


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Este exemplar corresponde à redação final
da tese defendida por Rutácio de
Oliveira Costa e aprovada
pela comissão julgadora em 24/11/1995


ORIENTADOR

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

BOMBEAMENTO MECÂNICO ALTERNATIVO
EM POÇOS DIRECIONAIS

Autor: Rutácio de Oliveira Costa.
Orientador: Francisco José Soares Alhanati.

39/95

Novembro, 1995

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
	T/UNICAMP
	C823b
V.	Ex.
TEMPO	27.560
PROG.	667/96
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	01/05/96
N.º CPD	011.00087503-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C823b Costa, Rutácio de Oliveira
Bombeamento mecânico alternativo em poços
direcionais / Rutácio de Oliveira Costa.--Campinas, SP:
[s.n.], 1995.

Orientador: Francisco José Soares Alhanati.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

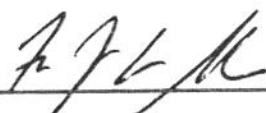
1. Poços do petróleo. 2. Engenharia de petróleo.
I. Alhanati, Francisco José Soares. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica.
III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação "Bombeamento Mecânico Alternativo em Poços Direcionais" elaborada por Rutácio de Oliveira Costa foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 24 de novembro de 1995

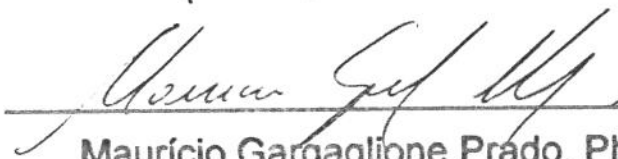
BANCA EXAMINADORA



Francisco José Soares Alhanati, Ph.D.



Denis José Schiozer, Ph.D.



Maurício Gargaglione Prado, Ph.D.

*À minha mãe, Iracema, e ao meu pai,
João Paulo (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde, e inspiração para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Alhanati, pelo empenho e pelas muitas sugestões apresentadas.

Ao Prof. Attílio, mestre e amigo.

Aos Engs. Divonsir e Barreto pela bibliografia fornecida.

Aos colegas da E&P RN-CE que contribuíram para a coleta de dados de campo, especialmente aos Engs. Cícero e Carlos Martins.

Aos colegas da Unicamp, pelo incentivo.

Aos funcionários da Unicamp, em especial à Fátima e à Alice pelos excelentes serviços prestados.

A todos, enfim, que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso desse Mestrado.

RESUMO

Este trabalho propõe um novo modelo dinâmico para o comportamento de sistemas de bombeamento mecânico alternativo, considerando trajetórias de poço tridimensionais. Mostra-se que a formulação proposta é mais geral que as anteriores, e que vários dos modelos existentes, tanto para poços verticais como para poços direcionais, dela podem ser deduzidos.

Os resultados do novo modelo, bem como os de outros seis modelos, são comparados com dados de campo coletados em 16 poços da Bacia Potiguar, Brasil. Esta comparação resultou na determinação do coeficiente de atrito de Coulomb e do fator de amortecimento adequados a estes poços. Verifica-se, ainda, que o modelo proposto é o mais preciso na previsão dos parâmetros básicos de projeto.

ABSTRACT

This work proposes a new dynamic model for the behavior of sucker rod pumping systems, that considers 3D well trajectories. It is shown that the proposed formulation is more general than the previous ones, and that several existing models, for both vertical and directional wells, can be deduced from it.

The results of this new model, as well as of six other existing models, are compared with field data collected from 16 wells in the Potiguar Basin, Brazil. This comparison resulted in the determination of the adequate Coulomb friction coefficient and dumping factor for such wells. It is verified, also, that the proposed model is the most accurate in predicting the basic design parameters.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE ANEXOS	x
Capítulo	
I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO DA LITERATURA	4
III. MODELOS EXISTENTES UTILIZADOS.....	7
IV. MODELO PROPOSTO	19
V. DADOS DE CAMPO PARA COMPARAÇÃO	39
VI. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	52
VII. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	78
NOMENCLATURA	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Poço Direcional	2
1.2 Sistema de bombeamento mecânico alternativo	2
3.1 Transmissão dos esforços em trechos inclinados	11
3.2 Definição das variáveis do modelo de Gibbs	14
4.1 Representação da Trajetória de um Poço Direcional	19
4.2 Definição dos Comprimentos de Arco s , u , e ζ	20
4.3 Forças Atuando num Elemento da Coluna de Hastes	22
4.4 Deslocamentos na Bomba de Fundo	30
4.5 Poço com Coluna de Hastes Combinada	35
5.1 Registro de Nível Dinâmico	46
5.2 Definição do Ângulo da Manivela (θ)	47
6.1 Erro Absoluto Médio no PPRL vs. Coeficiente de Atrito	55
6.2 Erro Médio no PPRL vs. Coeficiente de Atrito	55
6.3 Erro Absoluto Médio no PPRL vs. Fator de Amortecimento	56
6.4 Erro Médio no PPRL vs. Fator de Amortecimento	56
6.5 Erro Absoluto Médio no PT vs. Coeficiente de Atrito	57
6.6 Erro Médio no PT vs. Coeficiente de Atrito	57
6.7 Erro Absoluto Médio no PT vs. Fator de Amortecimento	58
6.8 Erro Médio no PT vs. Fator de Amortecimento	58
6.9 Erro Absoluto Médio no MPRL vs. Coeficiente de Atrito	59
6.10 Erro Médio no MPRL vs. Coeficiente de Atrito	59
6.11 Erro Absoluto Médio no MPRL vs. Fator de Amortecimento	60
6.12 Erro Médio no MPRL vs. Fator de Amortecimento	60
6.13 Erro Absoluto Médio no PRHP vs. Coeficiente de Atrito	61
6.14 Erro Médio no PRHP vs. Coeficiente de Atrito	61
6.15 Erro Absoluto Médio no PRHP vs. Fator de Amortecimento	62

6.16	Erro Médio no PRHP vs. Fator de Amortecimento	62
6.17	PPRL Medido vs. PPRL Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea	66
6.18	PT Medido vs. PT Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea	66
6.19	MPRL Medido vs. MPRL Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea	67
6.20	PRHP Medido vs. PRHP Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea	67
6.21	Poço 01 - Carta Medida	68
6.22	Poço 01 - Carta Prevista	68
6.23	Poço 03 - Carta Medida	68
6.24	Poço 03 - Carta Prevista	68
6.25	Poço 04 - Carta Medida	69
6.26	Poço 04 - Carta Prevista	69
6.27	Poço 05 - Carta Medida	69
6.28	Poço 05 - Carta Prevista	69
6.29	Poço 06 - Carta Medida	70
6.30	Poço 06 - Carta Prevista	70
6.31	Poço 07 - Carta Medida	70
6.32	Poço 07 - Carta Prevista	70
6.33	Poço 09 - Carta Medida	71
6.34	Poço 09 - Carta Prevista	71
6.35	Poço 12 - Carta Medida	71
6.36	Poço 12 - Carta Prevista	71
6.37	Poço 13 - Carta Medida	72
6.38	Poço 13 - Carta Prevista	72
6.39	Poço 14 - Carta Medida	72
6.40	Poço 14 - Carta Prevista	72
6.41	Poço 16 - Carta Medida	73
6.42	Poço 16 - Carta Prevista	73
6.43	Poço 18 - Carta Medida	73
6.44	Poço 18 - Carta Prevista	73

6.45	Poço 19 - Carta Medida	74
6.46	Poço 19 - Carta Prevista	74
6.47	Poço 20 - Carta Medida	74
6.48	Poço 20 - Carta Prevista	74
6.49	Poço 21 - Carta Medida	75
6.50	Poço 21 - Carta Prevista	75
6.51	Poço 22 - Carta Medida	75
6.52	Poço 22 - Carta Prevista	75
6.53	Poço 07 - Carta Prevista com $c_D = 0.25$ e $\mu = 0.05$	76
6.54	Poço 07 - Carta Prevista com $c_D = 0.05$ e $\mu = 0.25$	76
6.55	Poço 07 - Carta Prevista com $c_D = 0.25$ e $\mu = 0.25$	77

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página	
4.1	Coeficiente de Fourier para UB's Convencionais	29
5.1	Equipamento Instalado	40
5.2	Fluidos Produzidos	41
5.3	Condições Operacionais	42
5.4	Resultados dos Testes de Campo	43
5.5	Parâmetros Básicos de Projeto - Valores Medidos	48
5.6	Resumo dos Ajustes nos Dados	51
6.1	Tempo de Processamento dos Modelos	53
6.2	Erros no Cálculo dos Parâmetros de Projeto	63

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
3.1	Métodos de Cálculo dos Parâmetros Básicos de Projeto	8
4.1	Comparação Física entre os Modelos	38

LISTA DE ANEXOS

Anexo		Página
1	O Método do Raio de Curvatura	89
2	Trajetórias de Perfuração dos Poços	91
3	Cartas Dinamométricas Digitalizadas	114
4	Cartas Dinamométricas Originais	137
5	Dedução das Equações de Evchenko & Zakharchenko	144
6	Dedução das Equações do Modelo de Lea Modificado	148
7	Dedução das Expressões Utilizadas no Modelo Proposto	154
8	Fatores de Conversão	158

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os poços de petróleo são, na sua maioria, verticais. Porém, dificuldades locais, como a existência de rios, salinas ou cidades sobre o objetivo, podem implicar em projetos direcionais, mesmo para poços em terra (Fig. 1.1).

A escolha do método de elevação a ser utilizado nestes poços depende de estudo técnico-econômico onde são analisados e comparados diversos atributos de cada método de elevação (Clegg, Bucaram & Hein, 1992). Para projetos direcionais terrestres caracterizados por baixa vazão e produção desprezível de gás, por exemplo, o bombeamento mecânico alternativo (BMA) surge como uma alternativa viável (Fig. 1.2).

O BMA é conhecido há, pelo menos, 3000 anos (Schafer & Jennings, 1987), estando presente em aproximadamente 80% dos poços do planeta (Lekia, 1989) e em quase 70% dos poços brasileiros.

Na Bacia Potiguar, a produção terrestre de petróleo em poços direcionais por BMA começou em 1989. Hoje (1995), de um total de 127 poços direcionais terrestres, 75 operam com BMA. No futuro próximo, este número tende a aumentar devido a recentes descobertas de óleo em áreas de salinas e alagadiços, e a projetos de redução de malha em desenvolvimento.

Uma vez perfurado o poço, selecionada e avaliada a zona de interesse, e definido o BMA como método de elevação, deve-se *dimensionar* o sistema, ou seja, selecionar a combinação de equipamentos e condições de operação mais adequada. Em geral, assume-se uma combinação de equipamentos, a profundidade de instalação para a bomba de fundo, um conjunto de condições operacionais (curso e frequência de bombeamento), e verifica-se a possibilidade

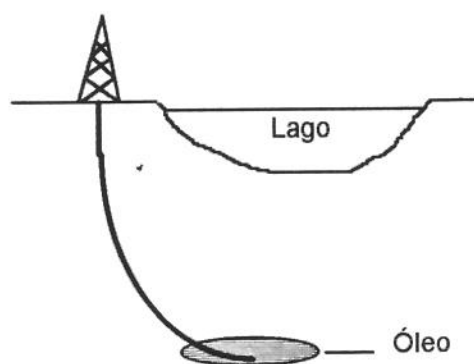


Fig. 1.1. Poço direcional

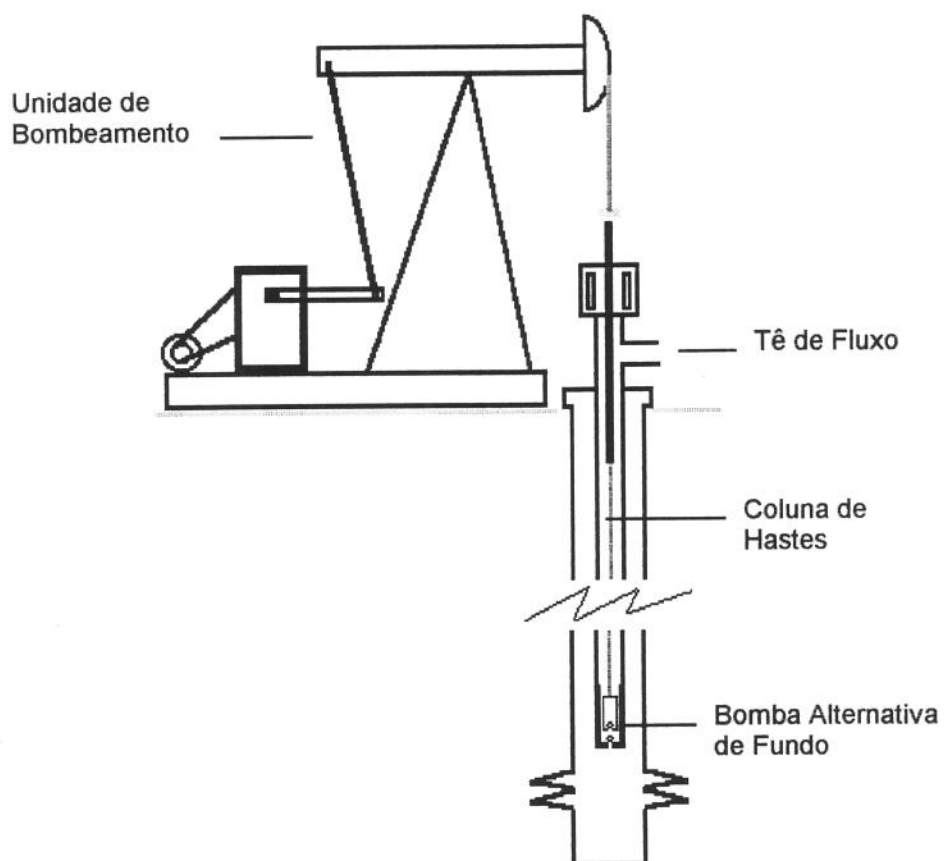


Fig. 1.2. Sistema de Bombeamento Mecânico Alternativo

de se obter a vazão desejada sem exceder os limites mecânicos dos equipamentos. Posteriormente, entre as combinações possíveis, seleciona-se a de menor custo.

Para poços direcionais, por causa do atrito haste-tubo, há dificuldade no cálculo dos parâmetros básicos de projeto que são: carga máxima na haste polida (PPRL), carga mínima na haste polida (MPRL), torque máximo no redutor da UB (PT), potência na haste polida (PRHP), e deslocamento volumétrico na bomba (PD).

Existem diversos métodos de cálculo desses parâmetros, uns mais simples e outros mais complexos. Alguns são específicos para poços verticais, como o método API RP-11L (API, 1988), largamente utilizado no Brasil. Outros, embora não levem em conta o perfil direcional do poço, permitem a inclusão de termos relacionados ao atrito haste-tubo através de um coeficiente de amortecimento que precisa ser ajustado caso a caso (Gibbs, 1963). Os métodos que levam em conta o perfil direcional do poço (Evchenko & Zakharchenko, 1984; Lukasiewicz, 1991; Gibbs, 1992) exigem a definição de um coeficiente de atrito, mas os valores sugeridos para este coeficiente variam muito de autor para autor.

Além da verificação dos limites dos equipamentos quando do dimensionamento do sistema, outros fatores fazem crescer a importância dos métodos que consideram adequadamente o perfil direcional do poço. O desgaste na coluna de hastes por atrito haste/tubo, por exemplo, está associado às cargas de contato e à velocidade de bombeamento, segundo testes realizados em laboratório por Ko *et alii* (1989). Outra aplicação prática importante, na fase de projeto da perfuração do poço, é verificar se determinado perfil de projeto é adequado para produção com BMA.

Neste trabalho, um novo modelo de cálculo dos parâmetros básicos de projeto, considerando o perfil direcional do poço, é proposto e seus resultados, bem como os de outros modelos existentes, são comparados com medições realizadas em 16 poços de campos de petróleo da Bacia Potiguar. Além disto, é feita uma investigação sobre os valores mais adequados para os coeficientes embutidos nos diversos métodos, com base nesta comparação.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Poços Verticais

O processo mais elementar para estimativa dos parâmetros básicos de projeto surgiu nos anos 30, através das contribuições de Marsh, Coberly, Slonneger e Mills (citados por Lekia, 1989). Este procedimento semi-empírico ficou sendo conhecido no Brasil como "Método Convencional". Nele, são assumidas várias hipóteses simplificadoras, o poço é considerado vertical, e efeitos dinâmicos e de atrito são desprezados.

Nos anos 50, o Midwest Research Institute iniciou as pesquisas para obtenção de um novo modelo, o qual foi repassado ao American Petroleum Institute (API) no início dos anos 60. A partir de então, esta técnica, bastante utilizada pelas companhias de petróleo, ficou conhecida como método API, e é apresentada na forma de um conjunto de tabelas e gráficos baseados em variáveis adimensionais (API, 1988). As principais hipóteses simplificadoras para este método são, entre outras (Gibbs, 1994): poço vertical, fluidos de baixa viscosidade, atrito haste/tubo e inércia de fluido desprezíveis e bomba de fundo completamente cheia.

A primeira tentativa de modelar matematicamente o problema foi feita em 1938 por Kemler (citado por Lekia, 1989), sem contudo produzir resultados práticos, provavelmente devido às dificuldades computacionais da época. Um novo modelo foi proposto por Gibbs (1963), na forma de um problema de valor de contorno composto de uma equação diferencial parcial (equação da onda amortecida), condições de fronteira (operação da bomba de fundo e cinemática da UB) e condições iniciais (repouso). A solução numérica foi obtida com o

auxílio de computadores e os resultados apresentaram boa concordância com valores medidos. O próprio Gibbs (1977) mostrou a aplicabilidade de seu modelo na simulação da maioria das condições de bombeamento.

Vários autores aprimoraram o trabalho de Gibbs. Doty & Schmidt (1983); Pavlick (1981); Lekia (1989); Láine, Keating & Jennings (1990); e Lea (1990) incluíram modelos para o escoamento dos fluidos e interações com o movimento das hastes. Chacin (1989) propôs novas formulações para o termo de amortecimento na equação de Gibbs (potências da velocidade da haste).

No Brasil, foi desenvolvido por técnicos da Petrobras (Lopes *et alii*, 1994), um simulador computacional para BMA considerando modelos de escoamento de fluidos no interior da coluna e no anular, interações com o reservatório, cálculos de torque e balanceamento da UB, a partir de um modelo inicialmente proposto por Alhanati (1988).

Inúmeros modelos têm sido publicados, tanto para auxiliar no projeto do sistema como para avaliar as condições operacionais de instalações já existentes. Porém, poucos avanços têm sido obtidos no sentido de incluir os efeitos de uma trajetória não vertical do poço no modelo de comportamento da coluna de hastes .

Poços direcionais

O primeiro processo de cálculo das cargas em poços direcionais do qual temos notícia foi introduzido na Rússia, em 1964, por Peslyak (citado por Evchenko & Zakharchenko, 1984). O modelo proposto por Evchenko & Zakharchenko (1984) é equivalente ao de Peslyak e pode ser considerado um modelo quase estático para o cálculo dos esforços em poços de trajetória plana.

Uma adaptação do método API para poços desviados foi proposta por Alhanati (1989). Em seu trabalho o autor recomendava fatores de correção para os valores obtidos pelo método API, deduzidos a partir do modelo de Evchenko & Zakharchenko, e destinados a um perfil de projeto típico de poços direcionais.

O primeiro modelo dinâmico para poços desviados foi introduzido por Lukasiewicz (1991). Seu modelo matemático pressupõe que a trajetória do poço esteja contida num plano vertical.

Lukasiewicz chegou ao requinte de considerar contribuições como a dos deslocamentos transversais e, para isto, se fez necessário resolver um sistema de equações diferenciais parciais não lineares de quarta ordem. Ocorre, porém, que, às vezes, as hastes estão apoiadas na coluna de tubos e estes deslocamentos são nulos. Mesmo quando as hastes não se apoiam nos tubos, os deslocamentos transversais são muito pequenos, devido a restrição imposta pela tubulação.

Para exemplificar o uso de seu modelo, Lukasiewicz fez uma comparação entre valores de PPRL, PT e vazão medidos em 4 poços com valores calculados pelo modelo. Os poços tinham profundidade vertical variando entre 315 e 530 metros. Ele fez ainda uma avaliação da influência da inclinação, profundidade e viscosidade no cálculo da vazão.

Gibbs (1992) apresentou o conceito de um modelo dinâmico considerando uma trajetória não necessariamente plana, para o poço direcional. Foi feita uma comparação de cartas dinamométricas e valores de PPRL e MPRL medidos com valores calculados com o modelo original para poços verticais (Gibbs, 1963) e valores obtidos pelo modelo proposto para poços desviados.

Xu e Hu (1993) anunciaram num "abstract" um modelo quase estático para BMA. Porém, aparentemente, não foram publicados os detalhes deste modelo, até o presente (1995). Em 1994, Xu apresentou um modelo de diagnóstico para poços retos e inclinados. O modelo para este tipo de trajetória, bastante rara (não há nenhum caso no Brasil), é um caso particular do modelo de Lukaziewicz.

No Capítulo III, apresentamos uma descrição mais detalhada dos principais modelos existentes. Contudo, apesar dos recentes esforços e da contribuição valiosa de vários pesquisadores, ainda não há, na literatura, um modelo matemático do comportamento da coluna de hastes em sistemas de BMA que considere tanto uma trajetória não necessariamente plana da perfuração do poço, quanto um acoplamento adequado com o escoamento de fluidos no anular haste-tubo. Para preencher esta lacuna apresentamos, no Capítulo IV, um novo modelo matemático para sistemas de BMA em poços direcionais.

· CAPÍTULO III

MODELOS EXISTENTES UTILIZADOS

Métodos a Serem Avaliados

Os modelos existentes para o cálculo dos parâmetros básicos de projeto podem ser classificados em três grupos: métodos quasi-estáticos, métodos baseados na rotina API e modelos dinâmicos. Para comparação com os dados de campo, selecionamos pelo menos dois métodos para cada um destes grupos: um específico para poço vertical e outro para poço desviado. No grupo dos modelos dinâmicos escolhemos ainda métodos que consideram o termo devido ao atrito viscoso segundo os modelos de Gibbs (1963) e Lea (1990), conforme o Quadro 3.1.

Os modelos de Gibbs (1992) e Lukasiwicz (1991) para poços direcionais não foram incluídos nas comparações porque os poços da amostra possuem trajetória de perfuração aproximadamente contida num plano vertical (Anexo 2). Nessas condições, estes modelos são casos particulares do modelo proposto com termo de atrito viscoso dado por Gibbs (1963), como veremos no Capítulo IV. Por isto, as equações que os representam não são apresentadas neste Capítulo e sim no Capítulo IV, onde descrevemos o modelo proposto.

Neste capítulo são apresentados os fundamentos matemáticos dos métodos quasi-estáticos e são descritos os métodos baseados na rotina API, bem como os modelos dinâmicos para poços verticais, considerando o termo de atrito viscoso dado por Gibbs (1963) e pelo modelo de escoamento de fluido no anular proposto por Lea (1990).

Quadro 3.1. Métodos de Cálculo dos Parâmetros Básicos de Projeto

Grupo	Trajectoria	Atrito viscoso haste-fluido	Modelo selecionado
Quasi-estáticos	Vertical	-	Convencional
	Direcional	-	Evchenko & Zakharchenko (1984)
API	Vertical	-	API
	Direcional	-	Alhanati (1988)
Modelo dinâmico	Vertical	Gibbs (1963)	Gibbs (1963)
	Vertical	Lea (1990)	Lea (1990) Modificado
	Direcional	Gibbs (1963)	Modelo Proposto c/ atrito viscoso de Gibbs (1963)
	Direcional	Lea (1990)	Modelo Proposto c/ atrito viscoso de Lea (1990)

Método Convencional

Consideremos a coluna de hastes constituída de n seções. Para uma seção genérica k definimos: ρ_{rk} , massa específica das hastes; A_{rk} , área da seção transversal das hastes; L_k , comprimento da seção. Sejam, ainda: g , aceleração da gravidade; ρ_f , massa específica do fluido; A_{rp} , área da haste polida; e p_{wh} , pressão de tubo medida na cabeça do poço.

Calcula-se, a princípio, o peso das hastes,

$$W_r = g \sum_{k=1}^n \rho_{rk} A_{rk} L_k \quad (3.1)$$

o empuxo,

$$E_f = \rho_f g \sum_{k=1}^n A_{rk} L_k + p_{wh} A_{rp} \quad (3.2)$$

e a força no pistão no curso ascendente,

$$F_o = (p_d - p_s) A_p \quad (3.3)$$

onde p_d é a pressão de descarga, dada por:

$$p_d = p_{wh} + \rho_r g h_b \quad (3.4)$$

e p_s é a pressão de sucção.

A carga estática no curso ascendente é dada por:

$$F_{TV} = W_r - E_r + F_o \quad (3.5)$$

e no curso descendente é dada por:

$$F_{SV} = W_r - E_r \quad (3.6)$$

Calcula-se ainda um esforço dinâmico, dado por:

$$F_D = W_r \frac{a_{max}}{g} \quad (3.7)$$

com $a_{max} = \frac{\omega^2 S}{2}$ e $\omega = 2\pi N$, onde N é a frequência de bombeamento e S é o curso da haste polida.

A carga máxima é calculada adicionando-se o esforço dinâmico à carga estática no curso ascendente,

$$PPRL = F_{TV} + F_D \quad (3.8)$$

enquanto que a carga mínima é obtida pela subtração do esforço dinâmico da carga estática no curso descendente,

$$MPRL = F_{SV} - F_D \quad (3.9)$$

e a potência na haste polida é dada por:

$$PRHP = (S - e_t)(F_{TV} - F_{SV} + F_D)N \quad (3.10)$$

onde a elongação da coluna de tubos é calculada por

$$e_t = \frac{F_o L_p}{E_t A_t} i_{anc} \quad (3.11)$$

O valor apropriado para i_{anc} é 0 quando a coluna de produção é ancorada e 1 quando a coluna não é ancorada.

Para o cálculo do curso do pistão é preciso subtrair do curso na superfície (S) o alongamento das hastes,

$$e_r = \frac{F_o}{E_r} \sum_{k=1}^n \frac{L_k}{A_{rk}} \quad (3.12)$$

o alongamento da tubulação, e_t e somar um alongamento dinâmico, dado por:

$$e_{ra} = \frac{a_{max}}{E_r} \sum_{k=1}^n \rho_{rk} L_k^2 \quad (3.13)$$

Assim, o curso do pistão vale

$$S_p = S + e_{ra} - e_t - e_{rf} \quad (3.14)$$

e o deslocamento volumétrico da bomba,

$$PD = \frac{\pi d_p^2 S_p N}{4} \quad (3.15)$$

enquanto que a vazão de líquido é dada por:

$$q_L = \frac{PD}{B_{Ls} + (1 - E_s) B_{gs} (R - R_{ss}) (1 - BSW / 100)} \quad (3.16)$$

onde: B_L é o fator volume de formação da fase líquida, E_s é a eficiência de separação de gás no fundo, B_g é o fator volume de formação do gás, R é a razão gás/óleo de produção, R_s é a razão de solubilidade do gás no óleo, BSW é o percentual de água e sedimentos do fluido produzido e o segundo subscrito s indica condições de pressão e temperatura na sucção.

O torque máximo é dado por:

$$PT = (PPRL - MPRL) \frac{S}{4} \quad (3.17)$$

Evchenko & Zakharchenko

O processo de cálculo proposto por Evchenko & Zakharchenko (1984) é um método quase estático válido para poços cuja trajetória de perfuração esteja contida num plano vertical.

O procedimento consiste em calcular as forças estáticas na superfície, a partir das forças no pistão, dividindo-se a coluna de hastes em trechos e calculando-se a força no topo de cada trecho (F_{si+1}) a partir da força na respectiva base (F_{si}). A Fig. 3.1 ilustra este procedimento.

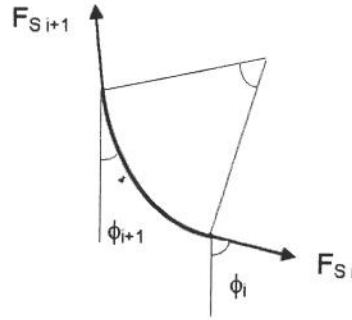


Fig. 3.1. Transmissão dos Esforços em Trechos Inclinados

Sendo ϕ_i , ϕ_{i+1} , ΔL_m e μ , respectivamente, o ângulo de inclinação nos pontos i e $i+1$, o comprimento do trecho considerado e o coeficiente de atrito, as seguintes relações são deduzidas no Anexo 5 (Alhanati, 1989):

Se $\phi_i > \phi_{i+1}$, e as hastes estão subindo, então

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_i - \phi_{i+1})(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \text{sen} \phi_i - \text{sen} \phi_{i+1} \right] \right. \\ \left. + 2\mu \left[e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \cos \phi_i - \cos \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \quad (3.18a)$$

e, se as hastes estão descendo:

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_i - \phi_{i+1})(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \text{sen} \phi_i - \text{sen} \phi_{i+1} \right] \right. \\ \left. - 2\mu \left[e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \cos \phi_i - \cos \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \quad (3.18b)$$

Se $\phi_i < \phi_{i+1}$, e as hastes estão subindo, então

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_{i+1} - \phi_i)(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[-e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \text{sen} \phi_i + \text{sen} \phi_{i+1} \right] \right. \\ \left. + 2\mu \left[e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \cos \phi_i - \cos \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \quad (3.19a)$$

e, se as hastes estão descendo:

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_{i+1} - \phi_i)(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[-e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \text{sen} \phi_i + \text{sen} \phi_{i+1} \right] \right. \\ \left. - 2\mu \left[e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \cos \phi_i - \cos \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \quad (3.19b)$$

Se $\phi_i = \phi_{i+1}$, então:

$$F_{Si+1} = \rho_r A_r \Delta L_m g (\pm \mu \text{sen} \phi + \cos \phi) + F_{Si} \quad (3.20)$$

onde se utiliza $+\mu$ para o curso ascendente e $-\mu$ para o curso descendente.

No curso ascendente, a força na primeira haste (junto ao pistão) é dada por:

$$F_{s1A} = F_o - p_d A_{r1} \quad (3.21)$$

onde A_{r1} é a área da haste na extremidade inferior da coluna. Da mesma forma, no curso descendente,

$$F_{s1D} = -p_d A_{r1} \quad (3.22)$$

sendo os valores de F_o e p_d calculados, respectivamente, pelas fórmulas (3.3) e (3.4) do método convencional.

A partir de (3.21) e (3.22) e usando-se as equações (3.18) a (3.20) chega-se a carga estática máxima e mínima na superfície, F_{TV} e F_{SV} , respectivamente.

Agora, o PPRL, o MPRL, o PRHP, o PT e a vazão são calculados através das equações (3.8) a (3.17) do método convencional.

O valor do coeficiente de atrito (μ) deve ser determinado caso a caso. Na falta de maiores informações os autores sugerem o valor de 0.25.

Método API

O método API é baseado em correlações oriundas de soluções da equação de onda amortecida através de computadores analógicos. Estas correlações são apresentadas na forma de curvas de variáveis adimensionais. O processo de solução consiste em transformar o problema para a forma adimensional, obter a solução adimensional através de curvas fornecidas, e transformar a solução adimensional em solução dimensional.

É o método mais conhecido e utilizado no Brasil, razão pela qual não apresentaremos os detalhes do procedimento de cálculo. Este último pode ser encontrado na norma API RP-11L (API, 1988).

Método de Alhanati

É uma adaptação do método API, para poços direcionais cuja trajetória esteja contida num plano vertical, proposta por Alhanati (1989). O processo de cálculo é bastante simples e consiste no cômputo de fatores de distorção a partir dos métodos de Evchenko e Zakharchenko e Convencional, e suas aplicações nos valores calculados pelo API.

Sejam F_{TV1} e F_{SV1} , os valores de F_{TV} e F_{SV} obtidos pelo método de Evchenko e Zakharchenko. Chamemos de F_{TV2} e F_{SV2} , os valores de F_{TV} e F_{SV} calculados pelo método convencional. Os fatores de distorção para as cargas nos cursos ascendente e descendente são dados por:

$$f_{da} = \frac{F_{TV1}}{F_{TV2}} \quad (3.23)$$

$$f_{dd} = \frac{F_{SV1}}{F_{SV2}} \quad (3.24)$$

Aplica-se agora estes fatores de distorção às cargas máxima e mínima calculadas pelo método API:

$$PPRL = PPRL_{API} \cdot f_{da} \quad (3.25)$$

$$MPRL = MPRL_{API} \cdot f_{dd} \quad (3.26)$$

Calcula-se agora um fator de distorção para a diferença entre carga máxima e mínima:

$$f_{dT} = \frac{PPRL - MPRL}{PPRL_{API} - MPRL_{API}} \quad (3.27)$$

Os valores de PT , $PRHP$ e S_p são, então, dados por:

$$PT = PT_{API} \cdot f_{dT} \quad (3.28)$$

$$PRHP = PRHP_{API} \cdot f_{dT} \quad (3.29)$$

$$S_p = S - (S - S_{pAPI}) f_{dT} \quad (3.30)$$

Como o método de Evchenko e Zakharchenko exige a especificação do coeficiente de atrito μ , os resultados obtidos também dependem do valor usado para este coeficiente.

Modelo de Gibbs

O modelo proposto por Gibbs (1963) é um dos mais tradicionais métodos de cálculo dos parâmetros básicos de projeto. A equação diferencial parcial a ser resolvida é dada por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g - c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.31)$$

onde $u(s,t)$ é o deslocamento de um ponto da coluna de hastes s num instante t , e v é a velocidade do som nas hastes. O coeficiente de amortecimento c é dado por:

$$c = \frac{\pi v c_D}{2 D_b} \quad (3.32)$$

onde c_D é o fator de amortecimento adimensional. A Fig. 3.2 ilustra a definição dessas variáveis.

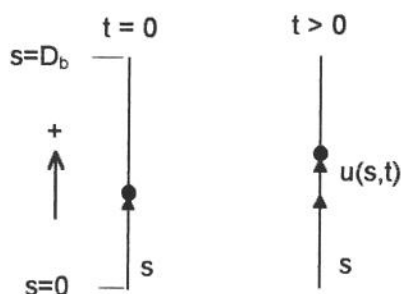


Fig. 3.2 Definição das Variáveis do Modelo de Gibbs (1963)

As condições de contorno do problema são a cinemática da UB na superfície e a operação da bomba de fundo. A condição inicial é o sistema em repouso. As expressões correspondentes às condições de contorno e à condição inicial são as mesmas do problema tridimensional que são apresentadas no Capítulo IV.

Segundo o autor, a escolha de um valor adequado para c_D poderia simular atrito viscoso e atrito de Coulomb. Assim, este valor é específico para uma geometria de poço, características dos equipamentos instalados e propriedades dos fluidos produzidos.

Uma vez calculados os deslocamentos $u(s,t)$ as forças de tração nas hastes são dadas pela lei de Hook:

$$F(s,t) = EA \frac{\partial u}{\partial s} \quad (3.33)$$

Os pares de valores de posição e força de tração na haste polida durante o ciclo de bombeio constituem a carta dinamométrica de superfície. Já os pares de posição e força no pistão representam a carta dinamométrica de fundo.

Através da carta dinamométrica de superfície, podemos calcular os valores de PPRL, MPRL, PT e PRHP, conforme mostramos no Capítulo V para as cartas dinamométricas medidas.

O cálculo da vazão de líquido para os modelos que geram a carta dinamométrica de fundo, como o modelo de Gibbs, é feito utilizando-se a mesma expressão apresentada para o método convencional (Eq. 3.16). Porém, considera-se curso efetivo (S_p) somente o deslocamento do pistão desde a abertura da válvula de pé até o ponto morto superior.

Modelo de Lea Modificado

Lea (1990) introduziu um modelo simplificado para o fluxo no anular, deduzindo uma expressão para o coeficiente de amortecimento em função dos diâmetros do pistão, tubo e hastes e da viscosidade do fluido produzido.

No caso de escoamento de fluido newtoniano, laminar, incompressível, monofásico e completamente desenvolvido pode-se mostrar (Anexo 6) que o termo de atrito viscoso na equação de movimento das hastes deve ser dado por:

$$\frac{\tau U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} = \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{rk}) \quad (3.34)$$

sendo v_r a velocidade das hastes,

$$v_r = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.35)$$

e $\bar{v}_{rk}$ a velocidade do fluido numa determinada seção. K_1 e K_2 são fatores geométricos, funções dos diâmetros do tubo e das hastes (dedução no Anexo 6), dados por:

$$K_1 = \frac{(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2 - \left[2r_r^2 \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)\right]^2}{r_r \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) \left[(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2\right]} \quad (3.36)$$

$$K_2 = \frac{2(r_t^2 - r_r^2) \left[2r_r^2 \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)\right]}{r_r \left[(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2\right]} \quad (3.37)$$

A velocidade do fluido, $\bar{v}_{rk}$, é dada, aproximadamente (Anexo 6), por:

$$\bar{v}_{rk} = \begin{cases} -v_p \frac{A_{rk}}{A_t - A_{rk}}, & \text{se } v_p < 0 \\ v_p \frac{A_p - A_{rk}}{A_t - A_{rk}}, & \text{se } v_p \geq 0 \end{cases} \quad (3.38)$$

onde v_p é a velocidade do pistão.

Lea (1990) propôs a aproximação

$$\bar{v}_{rk} = \begin{cases} -v_r \frac{A_{rk}}{A_t - A_{rk}}, & \text{se } v_r < 0 \\ v_r \frac{A_p - A_{rk}}{A_t - A_{rk}}, & \text{se } v_r \geq 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

que equivale a afirmar que as velocidades da coluna de hastes e do pistão são aproximadamente iguais. Isto permite calcular o coeficiente de amortecimento através de

$$c = \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} \left(K_1 - K_2 \frac{A_p - A_{rk}}{A_t - A_{rk}} \right), \text{ se } v_r > 0 \quad (3.40)$$

$$c = \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} \left(K_1 + K_2 \frac{A_{rk}}{A_t - A_{rk}} \right), \text{ se } v_r < 0 \quad (3.41)$$

Também pode-se demonstrar (Anexo 6) que a perda de carga por fricção é dada por:

$$\left(\frac{\partial p_r}{\partial s} \right)_k = -4\eta (K_3 \bar{v}_{rk} + K_4 v_r) \quad (3.42)$$

onde:

$$K_3 = \frac{2(r_t^2 - r_r^2) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right)}{(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2} \quad (3.43)$$

$$K_4 = \frac{(r_t^2 - r_r^2) + 2r_r^2 \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right)}{(r_t^4 - r_r^4) \ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right) + (r_t^2 - r_r^2)^2} \quad (3.44)$$

Assim, desprezando-se a aceleração, pode-se calcular a pressão de descarga na bomba, a cada instante, por:

$$p_d = p_{wh} + \rho_r g h_b + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial p_r}{\partial s} \right)_k L_k \quad (3.45)$$

EDP Modificada

Para coluna de hastes combinadas, desprezando-se o atrito haste-tubo e admitindo-se o atrito viscoso dado por (3.34), a equação do movimento se reduz a:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g - \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{rk}) \quad (3.46)$$

Nesta equação todo o "amortecimento" da equação de onda é devido ao atrito viscoso haste/fluido. Isto gera muitos problemas porque, de acordo com os valores de velocidade da haste e velocidade do fluido, poderemos ter

coeficientes de amortecimento negativos e, com isso, instabilidades na solução numérica (Lea, 1990).

Segundo Gibbs (1963), a vantagem do fator de amortecimento por ele postulado é que este levaria em conta outros efeitos difíceis de modelar, como o próprio atrito de Coulomb, além do efeito de atrito viscoso.

Neste trabalho, optamos por adaptar o modelo de Lea, utilizando para a equação do movimento:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g - \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{rk}) - c v_r \quad (3.47)$$

Além disso, para $\bar{v}_{rk}$ utilizamos a expressão (3.38) e não a aproximação proposta por Lea (3.39). O fator de amortecimento c e o correspondente c_D , neste caso, não são, conceitualmente, os mesmos de Gibbs (1963) já que excluem o efeito do atrito viscoso. Como no caso do coeficiente de Gibbs, o valor de c_D também tem que ser obtido caso a caso. Na prática, como este valor varia entre limites estreitos, uma vez que tenha sido determinado para um conjunto de poços, pode ser utilizado no projeto de outros poços em condições semelhantes.

CAPÍTULO IV

MODELO PROPOSTO

Dedução da expressão da EDP para poços direcionais

No desenvolvimento a seguir consideraremos que a trajetória do tubing é a mesma do poço e que todo o movimento da coluna de hastes se dá na direção longitudinal, sendo desprezados os deslocamentos transversais, conforme a orientação de Gibbs (1992). Além disso, deduzimos primeiramente a expressão para uma coluna de hastes simples. Posteriormente, é descrito o tratamento para coluna de hastes combinadas.

A trajetória de um poço pode ser representada por uma curva no espaço tridimensional (x,y,z) , parametrizada pelo comprimento de arco (s) , conforme a Fig. 4.1.

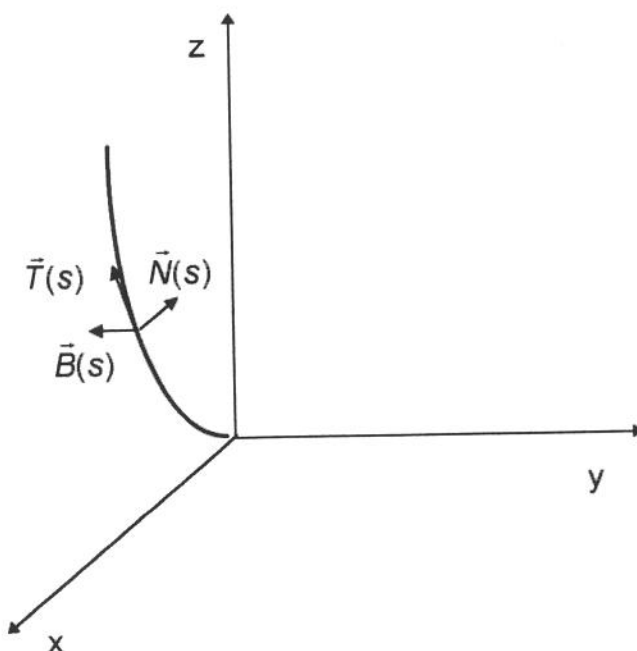


Fig. 4.1. Representação da trajetória de um poço direcional

Cada ponto da coluna de hastes é identificado pelo comprimento de arco (s), medido a partir da bomba de fundo, correspondente a sua posição no poço quando esta se encontra em repouso ($t=0$). Os deslocamentos ao longo do tempo de cada ponto da coluna são dados por $u(s,t)$. Em cada instante, o comprimento de arco desde a origem até o ponto considerado é $\zeta(s,t) = s+u(s,t)$. A Fig. 4.2 ilustra a definição dessas variáveis.

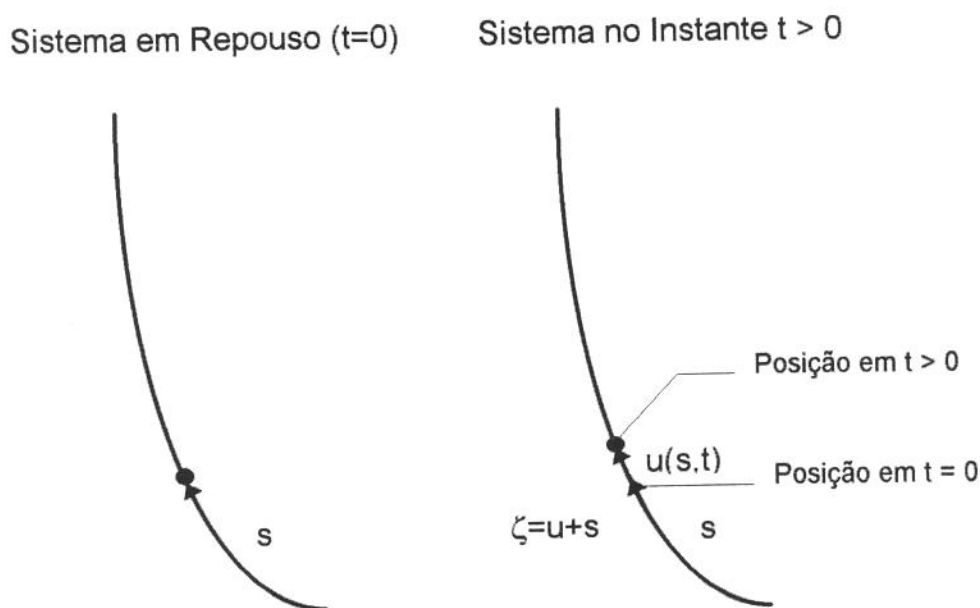


Fig. 4.2. Definição dos comprimentos de arco s , u e ζ

Assim, a posição instantânea do ponto da coluna de hastes, associado a s , é dada pelo vetor $\vec{R}(\zeta)$.

Podemos definir os seguintes vetores para cada ponto da coluna de hastes:

$$\vec{T}(\zeta) = \frac{d\vec{R}(\zeta)}{d\zeta}, \text{ vetor tangente unitário;} \quad (4.1)$$

$$\vec{K}(\zeta) = \frac{d\vec{T}(\zeta)}{d\zeta}, \text{ vetor curvatura;} \quad (4.2)$$

$$\vec{N}(\zeta) = \frac{\vec{K}(\zeta)}{|\vec{K}(\zeta)|}, \text{ vetor normal unitário;} \quad (4.3)$$

$$\vec{B}(\zeta) = \vec{T}(\zeta) \times \vec{N}(\zeta), \text{ vetor binormal unitário;} \quad (4.4)$$

$$r_c(\zeta) = \frac{1}{|\vec{K}(\zeta)|}, \text{ raio de curvatura;} \quad (4.5)$$

$$\vec{V} = \frac{d\vec{R}}{dt}, \text{ vetor velocidade.} \quad (4.6)$$

Mas,

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \frac{d\vec{R}}{d\zeta} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (4.7)$$

com

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial u(s,t)}{\partial t} \quad (4.8)$$

Assim, substituindo (4.1) e (4.8) em (4.7), vem:

$$\vec{V} = \vec{T}(\zeta) \cdot \frac{\partial u(s,t)}{\partial t} \quad (4.9)$$

ou

$$\vec{V} = \vec{T}(\zeta) \cdot v_r(s,t), \quad (4.10)$$

onde $v_r(s,t)$ é a velocidade escalar do ponto da coluna de hastes associado a s , no instante t .

Uma vez que os raios de curvatura são bastante grandes podemos desprezar os efeitos de flexão na coluna de hastes e representar as forças que atuam num elemento de haste de comprimento Δs , com massa $\Delta m = \rho_r A_r \Delta s$, conforme a Fig. 4.3.

$\vec{f}_L$, $\vec{f}_v$ e $\vec{f}_c$ são, respectivamente, a força lateral por unidade de comprimento, a força devido ao atrito viscoso por unidade de comprimento e a força devido ao atrito haste-tubo por unidade de comprimento. As forças de atrito atuam na mesma direção do vetor tangente unitário, portanto, podemos escrever:

$$\vec{f}_v = f_v \vec{T} \quad (4.11)$$

$$\vec{f}_c = f_c \vec{T} \quad (4.12)$$

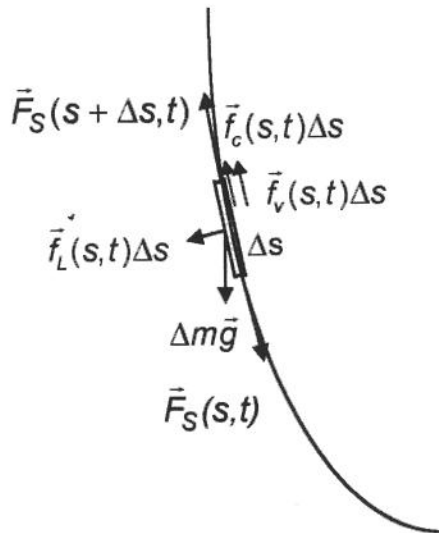


Fig. 4.3. Forças atuando num elemento da coluna de hastes

Aplicando a Segunda Lei de Newton, vem:

$$\vec{F}_S(s + \Delta s, t) - \vec{F}_S(s, t) + \rho_r A_r \Delta s \cdot \vec{g} + \vec{f}_L(s, t) \Delta s + \vec{f}_c(s, t) \Delta s + \vec{f}_v(s, t) \Delta s = \rho_r A_r \Delta s \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \quad (4.13)$$

Dividindo por Δs e aplicando o $\lim_{\Delta s \rightarrow 0}$ em ambos os membros da equação,

temos:

$$\frac{\partial \vec{F}_S(s, t)}{\partial s} + \rho_r A_r \vec{g} + \vec{f}_L(s, t) + \vec{f}_c(s, t) + \vec{f}_v(s, t) = \rho_r A_r \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \quad (4.14)$$

Os vetores $\vec{T}(\zeta)$, $\vec{N}(\zeta)$ e $\vec{B}(\zeta)$ são ortogonais. Podemos, portanto, substituir a equação vetorial (4.14) por um sistema de três equações escalares nas direções $\vec{T}(\zeta)$, $\vec{N}(\zeta)$ e $\vec{B}(\zeta)$. Assim,

$$\frac{\partial \vec{F}_S}{\partial s} \cdot \vec{T} + \rho_r A_r \vec{g} \cdot \vec{T} + \vec{f}_L \cdot \vec{T} + \vec{f}_c \cdot \vec{T} + \vec{f}_v \cdot \vec{T} = \rho_r A_r \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \cdot \vec{T} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial \vec{F}_S}{\partial s} \cdot \vec{N} + \rho_r A_r \vec{g} \cdot \vec{N} + \vec{f}_L \cdot \vec{N} + \vec{f}_c \cdot \vec{N} + \vec{f}_v \cdot \vec{N} = \rho_r A_r \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \cdot \vec{N} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial \vec{F}_S}{\partial s} \cdot \vec{B} + \rho_r A_r \vec{g} \cdot \vec{B} + \vec{f}_L \cdot \vec{B} + \vec{f}_c \cdot \vec{B} + \vec{f}_v \cdot \vec{B} = \rho_r A_r \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \cdot \vec{B} \quad (4.17)$$

A força de tração nas hastes tem direção tangente a trajetória. Assim, o primeiro termo da Eq. (4.15) fica:

$$\frac{\partial \vec{F}_S(s, t)}{\partial s} \cdot \vec{T}(\zeta) = \frac{\partial [F_S(s, t) \vec{T}(\zeta)]}{\partial s} \cdot \vec{T}(\zeta) = \frac{\partial F_S(s, t)}{\partial s} \vec{T}(\zeta) \cdot \vec{T}(\zeta) + F_S(s, t) \frac{\partial \vec{T}(\zeta)}{\partial s} \cdot \vec{T}(\zeta) \quad (4.18)$$

onde:

$$\frac{\partial \bar{T}(\zeta)}{\partial s} = \frac{\partial \bar{T}(\zeta)}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial s} \equiv \bar{K}(\zeta) \quad (4.19)$$

já que

$$\frac{\partial \zeta}{\partial s} = 1 + \frac{\partial u}{\partial s} = 1 + \frac{F_s}{E_r A_r} \equiv 1 \quad (4.20)$$

Logo, vale a aproximação:

$$\frac{\partial \bar{F}_s(s,t)}{\partial s} \cdot \bar{T}(\zeta) = \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} \quad (4.21)$$

De maneira similar, para o primeiro termo da Eq. (4.16), podemos escrever:

$$\frac{\partial \bar{F}_s(s,t)}{\partial s} \cdot \bar{N}(\zeta) = \frac{\partial [F_s(s,t) \bar{T}(\zeta)]}{\partial s} \cdot \bar{N}(\zeta) = \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} \bar{T}(\zeta) \cdot \bar{N}(\zeta) + F_s(s,t) \frac{\partial \bar{T}(\zeta)}{\partial s} \cdot \bar{N}(\zeta) \quad (4.22)$$

portanto, usando (4.19),

$$\frac{\partial \bar{F}_s(s,t)}{\partial s} \cdot \bar{N}(\zeta) = |\bar{K}(\zeta)| F_s(s,t) \quad (4.23)$$

Do mesmo modo, o primeiro termo de (4.17) resulta em:

$$\frac{\partial \bar{F}_s(s,t)}{\partial s} \cdot \bar{B}(\zeta) = \frac{\partial [F_s(s,t) \bar{T}(\zeta)]}{\partial s} \cdot \bar{B}(\zeta) = \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} \bar{T}(\zeta) \cdot \bar{B}(\zeta) + F_s(s,t) \frac{\partial \bar{T}(\zeta)}{\partial s} \cdot \bar{B}(\zeta) \quad (4.24)$$

Logo, novamente usando (4.19),

$$\frac{\partial \bar{F}_s(s,t)}{\partial s} \cdot \bar{B}(\zeta) = 0 \quad (4.25)$$

Substituindo (4.12) nos termos referentes a força de atrito de Coulomb das equações (4.15) a (4.17), podemos escrever:

$$\bar{f}_c(s,t) \cdot \bar{T}(\zeta) = f_c \quad (4.26)$$

$$\bar{f}_c(s,t) \cdot \bar{N}(\zeta) = 0 \quad (4.27)$$

$$\bar{f}_c(s,t) \cdot \bar{B}(\zeta) = 0 \quad (4.28)$$

Analogamente, substituindo (4.11) nos termos referentes a força de atrito viscoso das equações (4.15) a (4.17), podemos escrever:

$$\vec{f}_v(s,t) \cdot \vec{T}(\zeta) = f_v \quad (4.29)$$

$$\vec{f}_v(s,t) \cdot \vec{N}(\zeta) = 0 \quad (4.30)$$

$$\vec{f}_v(s,t) \cdot \vec{B}(\zeta) = 0 \quad (4.31)$$

Para a aceleração de um ponto da coluna de hastes, temos:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \frac{\partial [v_r(s,t) \vec{T}(\zeta)]}{\partial t} = \frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} \vec{T}(\zeta) + v_r(s,t) \frac{d\vec{T}(\zeta)}{d\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (4.32)$$

Mas, de (4.8) e (4.10),

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = v_r(s,t) \quad (4.33)$$

logo,

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} \vec{T}(\zeta) + [v_r(s,t)]^2 |\vec{K}(\zeta)| \vec{N}(\zeta) \quad (4.34)$$

Assim, para os termos referentes a aceleração das hastes nas equações (4.15) a (4.17), podemos escrever:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \cdot \vec{T}(\zeta) = \frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \cdot \vec{N}(\zeta) = [v_r(s,t)]^2 |\vec{K}(\zeta)| \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \cdot \vec{B}(\zeta) = 0 \quad (4.37)$$

Substituindo (4.23), (4.27), (4.30), e (4.36) em (4.16), temos:

$$|\vec{K}(\zeta)| F_s(s,t) + \rho_r A_r \vec{g} \cdot \vec{N}(\zeta) + \vec{f}_L(s,t) \cdot \vec{N}(\zeta) = \rho_r A_r |\vec{K}(\zeta)| [v_r(s,t)]^2 \quad (4.38)$$

Substituindo (4.25), (4.28), (4.31) e (4.37) em (4.17), resulta:

$$\rho_r A_r \vec{g} \cdot \vec{B}(\zeta) + \vec{f}_L(s,t) \cdot \vec{B}(\zeta) = 0 \quad (4.39)$$

A força de contato lateral por unidade de comprimento, $\vec{f}_L$, é perpendicular ao vetor tangente em cada ponto da trajetória. Assim,

$$\vec{f}_L(\zeta) \cdot \vec{T}(\zeta) = 0 \quad (4.40)$$

O módulo desta carga lateral pode ser determinado por:

$$|\vec{f}_L(s,t)| = \sqrt{[\vec{f}_L(s,t) \cdot \vec{T}(\zeta)]^2 + [\vec{f}_L(s,t) \cdot \vec{N}(\zeta)]^2 + [\vec{f}_L(s,t) \cdot \vec{B}(\zeta)]^2} \quad (4.41)$$

Substituindo (4.38), (4.39) e (4.40) em (4.41), segue:

$$|\vec{f}_L(\zeta)| = \sqrt{\left\{ \rho_r A_r \left[|\vec{K}(\zeta)| \left(v_r^2(s,t) - \frac{F_s(s,t)}{\rho_r A_r} \right) - \vec{g} \cdot \vec{N}(\zeta) \right] \right\}^2 + [\rho_r A_r \vec{g} \cdot \vec{B}(\zeta)]^2} \quad (4.42)$$

ou ainda,

$$\frac{|\vec{f}_L(\zeta)|}{\rho_r A_r} = \sqrt{\left\{ |\vec{K}(\zeta)| \left[v_r^2(s,t) - \frac{F_s(s,t)}{\rho_r A_r} \right] - \vec{g} \cdot \vec{N}(\zeta) \right\}^2 + [\vec{g} \cdot \vec{B}(\zeta)]^2} \quad (4.43)$$

As velocidades das hastes são da ordem de 1 m/s, e as forças axiais envolvidas da ordem de 10000 N. O valor de $\rho_r A_r$ é da ordem de 1.0 kg/m. Assim, podemos desprezar v_r^2 na presença de $\frac{F_s}{\rho_r A_r}$. Daí segue:

$$\frac{|\vec{f}_L(s,t)|}{\rho_r A_r} = \sqrt{[\vec{g} \cdot \vec{B}(\zeta)]^2 + \left[\vec{g} \cdot \vec{N}(\zeta) + |\vec{K}(\zeta)| \frac{F_s(s,t)}{\rho_r A_r} \right]^2} \quad (4.44)$$

O módulo da força de atrito de Coulomb por unidade de comprimento é proporcional ao módulo da força de contato lateral por unidade de comprimento. Em termos vetoriais, podemos escrever:

$$\vec{f}_c(s,t) = -\mu \frac{v_r(s,t)}{|v_r(s,t)|} |\vec{f}_L(s,t)| \vec{T}(\zeta) \quad (4.45)$$

o que, em termos escalares, equívale a:

$$f_c(s,t) = -\mu \frac{v_r(s,t)}{|v_r(s,t)|} |\vec{f}_L(s,t)| \quad (4.46)$$

Substituindo (4.21), (4.26), (4.29), (4.35) e (4.40) em (4.15), vem:

$$\frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} + \rho_r A_r \vec{g} \cdot \vec{T}(\zeta) + f_c(s,t) + f_v(s,t) = \rho_r A_r \frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} \quad (4.47)$$

Substituindo (4.46) em (4.47), podemos escrever:

$$\frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho_r A_r} \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} + \bar{g} \cdot \bar{T}(\zeta) - \mu \frac{v_r(s,t)}{|v_r(s,t)|} \frac{|\bar{f}_L(s,t)|}{\rho_r A_r} + \frac{f_v(s,t)}{\rho_r A_r} \quad (4.48)$$

A rigor, para cada ponto da coluna de hastes, os vetores $\bar{T}$, $\bar{B}$, $\bar{N}$, e $\bar{K}$, são funções de ζ e variam com o tempo. Contudo, na prática, a variação destes vetores com a posição do ponto da coluna de hastes é muito pequena, e, sem qualquer prejuízo considerável, podemos utilizar, nas equações (4.44) e (4.48) os valores destes vetores na condição inicial ($\zeta = s$).

Assim, podemos escrever:

$$\frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho_r A_r} \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} + \bar{g} \cdot \bar{T}(s) - \mu \frac{v_r(s,t)}{|v_r(s,t)|} \sqrt{[\bar{g} \cdot \bar{B}(s)]^2 + \left[\bar{g} \cdot \bar{N}(s) + |\bar{K}(s)| \frac{F_s(s,t)}{\rho_r A_r} \right]^2} + \frac{f_v(s,t)}{\rho_r A_r} \quad (4.49)$$

Pela lei de Hook,

$$\frac{\partial u(s,t)}{\partial s} = \frac{F_s(s,t)}{E_r A_r} \quad (4.50)$$

Assim, lembrando ainda que $v_r(s,t) = \frac{\partial u(s,t)}{\partial t}$, e que $r_c(s) = \frac{1}{|\bar{K}(s)|}$, temos:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E_r}{\rho_r} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \bar{g} \cdot \bar{T}(s) - \mu \frac{v_r}{|v_r|} \sqrt{[\bar{g} \cdot \bar{B}(s)]^2 + \left[\bar{g} \cdot \bar{N}(s) + \frac{E_r}{r_c(s) \rho_r} \frac{\partial u}{\partial s} \right]^2} + \frac{f_v}{\rho_r A} \quad (4.51)$$

Se fizermos $v^2 = \frac{E_r}{\rho_r}$, onde v é a velocidade do som na coluna de hastes,

chegaremos à expressão da equação diferencial proposta para o movimento da coluna de hastes em poços direcionais:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \bar{g} \cdot \bar{T}(s) - \mu \frac{v_r}{|v_r|} \sqrt{[\bar{g} \cdot \bar{B}(s)]^2 + \left[\bar{g} \cdot \bar{N}(s) + \frac{v^2}{r_c(s)} \frac{\partial u}{\partial s} \right]^2} + \frac{f_v}{\rho_r A_r} \quad (4.52)$$

O termo de atrito viscoso proposto por Gibbs (1963) é da forma

$$\frac{f_v}{\rho_r A_r} = -c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.53)$$

Porém, como vimos no capítulo III, ao se considerar o escoamento no anular haste-tubo chega-se à expressão:

$$\frac{f_v}{\rho_r A_r} = -\frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{rk}) \quad (4.54)$$

Substituindo (4.53) em (4.52) podemos obter a EDP para o Modelo Tridimensional (3D) do movimento da coluna de hastes com termo de atrito viscoso de Gibbs:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \vec{g} \cdot \vec{T}(s) - \mu \frac{v_r}{|v_r|} \sqrt{[\vec{g} \cdot \vec{B}(s)]^2 + \left[\vec{g} \cdot \vec{N}(s) + \frac{v^2}{r_c(s)} \frac{\partial u}{\partial s} \right]^2} - c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.55)$$

Por outro lado, substituindo (4.54) em (4.53) chegaremos à expressão para o Modelo 3D com termo de atrito viscoso de Lea:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \vec{g} \cdot \vec{T}(s) - \mu \frac{v_r}{|v_r|} \sqrt{[\vec{g} \cdot \vec{B}(s)]^2 + \left[\vec{g} \cdot \vec{N}(s) + \frac{v^2}{r_c(s)} \frac{\partial u}{\partial s} \right]^2} - \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{rk}) \quad (4.56)$$

Os Modelos de Gibbs e Lukaziewicz

É interessante notar que, como partimos de uma trajetória genérica, podemos obter a equação diferencial para o movimento da coluna de hastes em poços verticais a partir de (4.55) e (4.56).

Em poços verticais, $\vec{g} \cdot \vec{T} = -g$, $r_c \rightarrow \infty$, $\vec{g} \cdot \vec{B} = 0$, e $\vec{g} \cdot \vec{N} = 0$. Assim, (4.55) se reduz a equação proposta por Gibbs (1963) para poço vertical (Eq. 3.31).

Com as mesmas substituições, características de poços verticais, a Eq. (4.56) se reduz a (3.46), que é a equação do Modelo de Lea (1990).

Inspecionando agora a expressão (4.55) e comparando com as equações apresentadas por Gibbs (1992) para poços direcionais, podemos dizer que estas coincidem, se as seguintes igualdades forem satisfeitas:

$$g(s) = \vec{g} \cdot \vec{T}(s) \quad (4.57)$$

$$\vec{g} \cdot \vec{B}(s) = 0 \quad (4.58)$$

$$Q(s) = \vec{g} \cdot \vec{N}(s) \quad (4.59)$$

$$F_{cs}(s) = \frac{v^2}{r_c(s)} \quad (4.60)$$

Estas expressões, embora não apresentadas por Gibbs, se encaixam bem nos conceitos por ele sugeridos. Cabe, portanto, observar que a Eq. (4.58) restringe o modelo de Gibbs (1992) a trajetórias contidas num plano vertical.

Novamente a partir de (4.55), podemos obter uma expressão para poços cuja trajetória está contida num plano vertical. Neste caso, $\vec{g} \cdot \vec{B}(s) = 0$, $\vec{g} \cdot \vec{T} = -g \cos \phi$, $\vec{g} \cdot \vec{N} = -g \sin \phi$, e teremos:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} - g \cos \phi - \mu \frac{v_r}{|v_r|} \left[-g \sin \phi + \frac{v^2}{r_c(s)} \frac{\partial u}{\partial s} \right] - c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.61)$$

que é equivalente ao modelo de Lukaziewicz (1991).

Condições de Contorno

A modelagem das condições de contorno para o problema em análise não é trivial, e se constitui num “capítulo à parte” da modelagem de sistemas de BMA. Não introduzimos novos conceitos nesta área, apenas adaptamos o trabalho de outros pesquisadores (Gibbs, 1963 e 1977; Doty & Schmidt, 1983; Alhanati, 1988; Laine et alii, 1989; Lea, 1990) ao caso da trajetória tridimensional.

Condição de Contorno na Superfície

Admitiremos que o movimento da haste polida, dado pela cinemática da UB, possa ser aproximado por uma série de Fourier truncada, com seis termos, conforme sugerido por Laine et alii, 1989. Isto é razoável, tendo em vista que vários autores trabalham com movimento senoidal na superfície (Barreto Filho, 1993) e que no Método API foi utilizada uma série de Fourier truncada no segundo termo (Gibbs, 1994).

A velocidade da haste polida pode ser representada por:

$$v_r(D_b, t) = \omega S [A_1 \cos \omega t + \dots + A_6 \cos 6\omega t + B_1 \sin \omega t + \dots + B_6 \sin 6\omega t] \quad (4.62)$$

Os coeficientes A_i e B_i dependem da geometria da UB. Para UB's convencionais Laine, Cole e Jennings (1989) sugerem os coeficientes da Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Coeficientes de Fourier para UB's Convencionais

i	A_i	B_i
1	0.0078489	0.4973054
2	0.0126800	0.0630766
3	0.0178800	0.0071585
4	0.0025050	0.0014288
5	0.0005550	0.0008320
6	0.0001230	0.0000700

Condição de Contorno no Fundo

A condição de contorno no fundo é um modelo para o funcionamento da bomba de fundo, com possibilidade de presença de gás e tubing não ancorado.

Define-se e_m , "espaço morto", como o espaço entre a válvula de passeio e a válvula de pé na situação de repouso, com a haste polida na posição mais inferior. Este espaço morto é deixado para evitar que, com o movimento das hastes, o pistão venha a bater na válvula de pé.

Admite-se, ainda, que nesta situação de repouso, a válvula de passeio está aberta e toda a carga de fluido está aplicada à válvula de pé. A pressão no interior da bomba é dada pela pressão hidrostática.

Ao longo do tempo, o pistão se movimenta e a distância entre as válvulas, L_b , varia. Não estando o tubo ancorado, a posição de sua extremidade também se desloca devido à variação da carga na válvula de pé (Fig. 4.4).

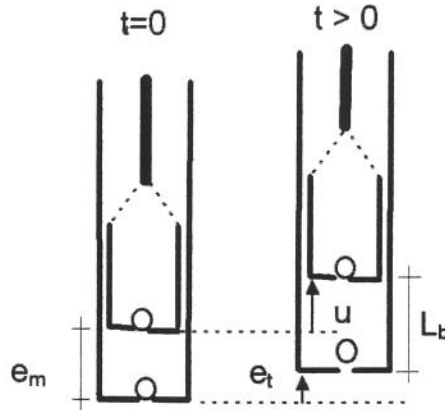


Fig. 4.4. Deslocamentos na Bomba de Fundo

A seguinte equação é válida para a distância entre as válvulas na bomba de fundo:

$$L_b(t) = u(0,t) + e_m - e_t(t) \quad (4.63)$$

com o deslocamento da extremidade do tubo e_t dado por:

$$e_t(t) = \frac{[p_b(0) - p_b(t)] D_b A_p i_{anc}}{E_t A_t} \quad (4.64)$$

onde p_b é a pressão no interior da camisa da bomba de fundo. Como no capítulo III, $i_{anc} = 0$ se o tubo é ancorado, e $i_{anc} = 1$ se o tubo não é ancorado.

Com as válvulas de passeio e pé fechadas, pode-se deduzir a seguinte expressão para a variação da pressão no interior da bomba (Anexo 7):

$$\frac{dp_b}{du} = - \frac{1}{\frac{D_b A_p i_{anc}}{E_t A_t} + k_L L_b (1 - \alpha) + \frac{L_b \alpha}{p_b}}, \text{ com } p_s < p_b(t) < p_d(t) \quad (4.65)$$

onde α é a fração volumétrica de gás na pressão p_b e k_L é a compressibilidade média da fase líquida.

À medida que o pistão se desloca durante o curso ascendente, a pressão na bomba cai. Ao atingir o limite inferior $p_b = p_s$ a válvula de pé abre e a pressão

no interior da bomba passa a ser constante e aproximadamente igual a pressão de sucção. No curso descendente, a pressão no interior da bomba aumenta até o limite superior $p_b = p_d$. Neste instante, a válvula de passeio abre e a pressão no interior da bomba passa a ser aproximadamente o valor da pressão de descarga.

A pressão na descarga da bomba é calculada de forma análoga ao caso vertical. Assim, para o Modelo 3D com termo de atrito viscoso de Gibbs, temos:

$$p_d = p_{wh} + \rho_r g h_b \quad (4.66)$$

Já para o Modelo 3D com termo de atrito viscoso de Lea, é válida a expressão:

$$p_d = p_{wh} + \rho_r g h_b + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial p_r}{\partial s} \right)_k L_k \quad (4.67)$$

com $\left(\frac{\partial p_r}{\partial s} \right)_k$ dado por (3.42).

O deslocamento $u(0,t)$ está relacionado com a velocidade da haste no ponto de conexão com o pistão, através de:

$$u(0,t) = \int_0^t v_r(0,t) dt \quad (4.68)$$

Condição Inicial

A condição inicial do problema é o sistema em repouso. Assim,

$$u(s,0)=0, \forall s \quad (4.69)$$

$$e \quad v_r(s,0) = \frac{\partial u}{\partial t}(s,0) = 0, \forall s \quad (4.70)$$

Temos, ainda, para as demais variáveis:

$$F_s(0,0) = -p_d(0)A_{r1} \quad (4.71)$$

com

$$p_d(0) = p_{wh} + \rho_r g h_b = p_b(0) \quad (4.72)$$

e, finalmente,

$$\frac{dF_s(s,0)}{ds} = -\rho_r A_r \bar{g} \cdot \bar{T}(s) \quad (4.73)$$

Solução Numérica do Problema

A expressão (4.52) é uma Equação Diferencial Parcial (EDP) de segunda ordem, não linear. Ela é bastante semelhante à equação de onda amortecida (3.31), a diferença fundamental sendo o termo não linear de amortecimento, devido ao atrito de Coulomb.

Dentre as várias opções possíveis para a solução numérica do problema de contorno, adotamos o método das diferenças finitas, de forma totalmente análoga à proposta por Laine et alii (1990) para a equação de onda amortecida.

Derivando-se a Eq. (4.50) em relação ao tempo, vem:

$$\frac{\partial v_r(s,t)}{\partial s} = \frac{1}{E_r A_r} \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial t} \quad (4.74)$$

As equações (4.49) e (4.74) formam um sistema de equações diferenciais parciais de primeira ordem equivalentes à Eq. (4.52). O procedimento consiste em calcular a velocidade em cada ponto da coluna num dado instante de tempo, para posteriormente calcular as cargas, já considerando as novas velocidades. O esquema numérico descrito a seguir é apresentado em maiores detalhes no Anexo 7.

Solução Numérica para o Modelo 3D c/ Termo de Atrito Viscoso de Gibbs

As velocidades e forças nas hastes num ponto i , num instante j são dadas por:

$$v_n^{j+1} = \frac{\frac{\Delta t}{\rho_r A_r \Delta s} (F_{si+1}^j - F_{si-1}^j) + 2\bar{g} \cdot \bar{T}_i \Delta t + \frac{2f_{ci}^j \Delta t}{\rho_r A_r} + (2 - c\Delta t)v_n^j}{2 + c\Delta t} \quad (4.75)$$

$$\text{onde } \frac{f_{ci}^j}{\rho_r A_r} = -\mu \frac{v_n^j}{|v_n^j|} \sqrt{(\bar{g} \cdot \bar{B}_i)^2 + \left(\bar{g} \cdot \bar{N}_i + |\bar{K}_i| \frac{F_{si}^j}{\rho_r A_r} \right)^2} \quad (4.76)$$

e

$$F_{si}^{j+1} = \frac{E_r A_r}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{n+1}^{j+1} - v_{n-1}^{j+1}) + F_{si}^j \quad (4.77)$$

Solução Numérica para o Modelo 3D c/ Termo de Atrito Viscoso de Lea

As equações para solução numérica do Modelo 3D com termo de atrito viscoso de Lea são:

$$v_n^{j+1} = \frac{\frac{\Delta t}{\rho_r A_r \Delta s} (F_{si+1}^j - F_{si-1}^j) + 2\bar{g} \cdot \bar{T}_i \Delta t - \frac{2f_{ci}^j \Delta t}{\rho_r A_r} + \left(2 - \frac{\eta_i U_r K_1}{\rho_r A_r} \Delta t \right) v_n^j + 2 \frac{\eta_i U_r K_2 \Delta t}{\rho_r A_r} v_i^j}{2 + \frac{\eta_i U_r K_1}{\rho_r A_r} \Delta t} \quad (4.78)$$

com $\frac{f_{ci}^j}{\rho_r A_r}$ dado por (4.76), e F_{si}^{j+1} por (4.77).

Discretização das Condições de Contorno

Para a condição de contorno na superfície (nó $n+1$), simplesmente se avalia a velocidade da haste polida através de (4.62). Assim,

$$v_{n+1}^j = \omega S [A_1 \cos \omega j \Delta t + \dots + A_6 \cos 6\omega j \Delta t + B_1 \sin \omega j \Delta t + \dots + B_6 \sin 6\omega j \Delta t] \quad (4.79)$$

No procedimento numérico também é necessária a determinação da carga na haste polida. Esta é dada por:

$$F_{sn+1}^{j+1} = E_r A_r \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{rn+1}^{j+1} - v_{rn}^{j+1}) + F_{sn}^j \quad (4.80)$$

Para a condição de contorno no fundo, as equações (4.81) até (4.86) são utilizadas no processo iterativo de cálculo da velocidade do pistão e da força na extremidade inferior da coluna de hastes. Isto é necessário porque, no caso da bomba de fundo, a carga depende da velocidade do pistão e esta depende da carga.

Calcula-se o deslocamento do pistão por:

$$u_1^{j+1} = u_1^j + \Delta u_1 \quad (4.81)$$

com

$$\Delta u_1 = \frac{v_{r1}^{j+1} + v_{r1}^j}{2} \Delta t \quad (4.82)$$

A pressão na descarga da bomba p_d^{j+1} é então calculada a partir das expressões (4.66) ou (4.67), conforme o acoplamento do escoamento de fluido no espaço anular.

Já a pressão no interior da bomba de fundo é calculada por:

$$p_b^{j+1} = \begin{cases} p_d^{j+1}, & \text{se } p_b^j + \Delta p_b \geq p_d^{j+1} \\ p_b^j + \Delta p_b, & \text{se } p_s < p_b^j + \Delta p_b < p_d^{j+1} \\ p_s, & \text{se } p_b^j + \Delta p_b \leq p_s \end{cases} \quad (4.83)$$

$$\text{com } \Delta p_b = - \frac{\Delta u}{\frac{D_b A_{p_{anc}}}{E_t A_t} + k_L L_b^j (1 - \alpha^j) + \frac{I_b \alpha^j}{\rho_b^j}} \quad (4.84)$$

A força no ponto de enroscamento do pistão na coluna de hastes é dada por:

$$F_{s1}^{j+1} = (p_d^{j+1} - p_b^{j+1}) A_p - p_d^{j+1} A_{r1} \quad (4.85)$$

Já a velocidade pode ser calculada por:

$$v_{r1}^{j+1} = v_{r2}^{j+1} - \frac{(F_{s1}^{j+1} - F_{s1}^j) \Delta s}{E_r A_r \Delta t} \quad (4.86)$$

Valores de Δx , Δt e Critério de Parada

Utilizamos o mesmo critério de estabilidade de Laine et alii (1990) para o modelo numérico proposto ($\Delta s / \Delta t \geq v$).

Schafer e Jennings (1987) afirmaram que a utilização de Δs da ordem de 200m já resulta em uma aproximação bastante satisfatória. Neste trabalho, no entanto, utilizamos Δs menor que 20m, para evitar que se percam pontos de medição da trajetória do poço. Isto corresponde a, aproximadamente, dividir o ciclo de bombeio em 2000 intervalos de tempo, devido o critério de estabilidade.

Segundo os mesmos autores, para poços com até 15 cpm, partindo-se do repouso, após 3 ciclos a carta dinamométrica já não se modifica significativamente. A máxima frequência de bombeamento para os poços testados é 14 cpm. Ainda assim, por segurança, trabalhamos com 5 ciclos.

Todos estes cuidados foram tomados para se assegurar a maior precisão prática possível. Entretanto, é possível que se possa obter resultados semelhantes com valores de Δs e Δt um pouco maiores, reduzindo assim o tempo de processamento

Coluna de Hastes Combinada

Até aqui, apresentamos as expressões do modelo para coluna de hastes simples. Entretanto, é mais comum a existência de poços com colunas de hastes combinadas. Por este motivo, é necessária uma adequação do modelo para este caso.

O modelo apresentado é válido em cada seção da coluna de hastes com diâmetro constante. Nos pontos em que ocorre mudança de seção, há continuidade de velocidade, mas, a rigor, não de força, já que há um pequeno efeito de pressão (Fig. 4.5).

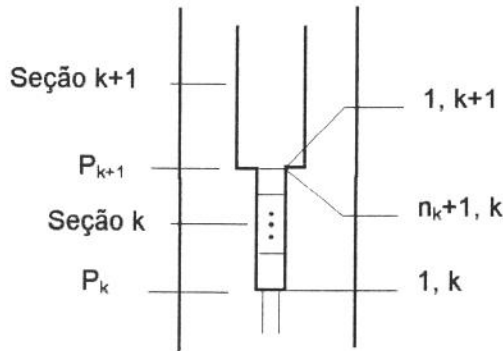


Fig. 4.5. Poço com Coluna de Hastes Combinada

Assim, se k designa uma seção da coluna de hastes com n_k segmentos e k+1 é seção subsequente, vale:

$$v_{r1,k+1}^{j+1} = v_{rn_{k+1},k}^{j+1} \quad (4.87)$$

$$F_{s1,k+1}^{j+1} = F_{sn_{k+1},k}^{j+1} - p_{k+1}^{j+1}(A_{rk+1} - A_{rk}) \quad (4.88)$$

As forças no ponto de mudança de seção, podem ser calculadas discretizando-se a Eq. (4.74) através de esquema de diferenças atrasadas para a seção k+1, como segue:

$$F_{S1,k+1}^{j+1} = E_r A_{rk+1} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s_{k+1}} (v_{r2,k+1}^{j+1} - v_{r1,k+1}^{j+1}) + F_{S1,k+1}^j \quad (4.89)$$

Analogamente, para a seção k, podemos escrever:

$$F_{Sn_{k+1},1}^{j+1} = E_r A_{rk} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s_k} (v_{rn_{k+1},k}^{j+1} - v_{rn_k,k}^{j+1}) + F_{Sn_{k+1},1}^j \quad (4.90)$$

Subtraindo (4.89) de (4.90) e aplicando (4.87) e (4.88), vem:

$$v_{r1,k+1}^{j+1} = v_{rn_{k+1},k}^{j+1} = \frac{(p_{k+1}^{j+1} - p_{k+1}^j)(A_{rk+1} - A_{rk})}{E_r \Delta t} + \frac{A_{rk}}{\Delta s_k} v_{rn_k,k}^{j+1} + \frac{A_{rk+1}}{\Delta s_{k+1}} v_{r2,k+1}^{j+1} \quad (4.91)$$

$$\frac{A_{rk}}{\Delta s_k} + \frac{A_{rk+1}}{\Delta s_{k+1}}$$

Como $p_{k+1}^{j+1} \cong p_{k+1}^j$, a Eq. (4.91) resulta aproximadamente em:

$$v_{rn_{k+1},k}^{j+1} = \frac{\frac{A_{rk}}{\Delta s_k} v_{rn_k,k}^{j+1} + \frac{A_{rk+1}}{\Delta s_{k+1}} v_{r2,k+1}^{j+1}}{\frac{A_{rk}}{\Delta s_k} + \frac{A_{rk+1}}{\Delta s_{k+1}}} \quad (4.92)$$

O procedimento de cálculo consiste em determinar inicialmente as velocidades nos pontos da coluna de hastes onde não ocorre mudança de seção. Depois, através da Eq. (4.92) calcula-se as velocidades nos pontos em que ocorre mudança de seção. Em seguida, através de (4.89) e (4.90) calcula-se as forças.

O Cálculo do Triedro Móvel

Quando o poço é perfurado, em determinados pontos da trajetória são medidos a profundidade, L_m , a inclinação, ϕ , e o azimute, ψ . No entanto, para o cálculo, precisamos determinar as coordenadas (x,y,z) para, em seguida, determinar $\vec{T}$, $\vec{B}$, e $\vec{N}$.

Existem diversos métodos de cálculo da trajetória para poços direcionais visando a obtenção das coordenadas (x, y, z) dos diversos pontos a partir dos parâmetros L , ϕ e ψ . Neste trabalho, utilizamos o método do raio de curvatura, descrito no Anexo 1 (French Oil and Gas Industry Association, 1990).

Através do método do raio de curvatura somos capazes de determinar o vetor posição associado a cada ponto da trajetória do poço de comprimento de arco s . Matematicamente, conhecemos a função

$$\vec{R}(s) = (x(s), y(s), z(s)) \quad (4.93)$$

O vetor posição nos pontos s_i é, portanto:

$$\vec{R}_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (4.94)$$

O vetor tangente pode ser calculado através do seguinte esquema de diferenças centradas para a Eq. (4.1):

$$\vec{T}_i = \frac{\vec{R}_i^+ - \vec{R}_i^-}{2\Delta s_w} \quad (4.95)$$

onde:

$$\vec{R}_i^+ = \vec{R}(s_i + \Delta s_w) \quad (4.96)$$

$$\text{e } \vec{R}_i^- = \vec{R}(s_i - \Delta s_w) \quad (4.97)$$

com o incremento no comprimento de arco $\Delta s_w < \Delta s_k, \forall k$.

O vetor curvatura está relacionado ao vetor posição por:

$$\vec{K}(s) = \frac{d^2 \vec{R}(s)}{ds^2} \quad (4.98)$$

O esquema de diferenças centradas equivalente a (4.98) é:

$$\vec{K}_i = \frac{\vec{R}_i^+ - 2\vec{R}_i + \vec{R}_i^-}{(\Delta s_w)^2} \quad (4.99)$$

O vetor normal é, simplesmente,

$$\vec{N}_i = \frac{\vec{K}_i}{|\vec{K}_i|} \quad (4.100)$$

e o vetor binormal é obtido de por:

$$\vec{B}_i = \vec{T}_i \times \vec{N}_i \quad (4.101)$$

Comparação do Modelo Proposto com os Existentes

Nos Capítulos III e IV descrevemos diversos modelos de cálculo dos parâmetros de projeto. O Quadro 4.1 compara a modelagem física das várias formas de cálculo destes parâmetros.

Podemos observar que o modelo proposto é o mais completo até o momento, sendo capaz de levar em conta a dinâmica das hastes e de simular condições de contorno de fundo complexas, atrito haste-tubo para trajetórias de poço tridimensionais e atrito viscoso segundo os modelos de Gibbs e Lea.

Quadro 4.1. Comparação Física entre os Modelos

	Conv.	E&Z	API	API adap	Gibbs (1963)	Lea	Lukaz.	Gibbs (1992)	3D (*)	3D (**)
Dinâmica de Hastes	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Condições de contorno de fundo complexas (gás, ancoragem)	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Modelo de atrito viscoso de Lea	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓
Calcula atrito haste-tubo para trajetória plana	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓
Calcula atrito haste-tubo para trajetória não plana.	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓

(*) Modelo 3D proposto com termo de atrito viscoso de Gibbs

(**) Modelo 3D proposto com termo de atrito viscoso de Lea

CAPÍTULO V

DADOS DE CAMPO PARA COMPARAÇÃO

Para a comparação das diversas metodologias de cálculo dos parâmetros básicos de projeto foram coletados dados de 22 poços dos campos de Canto do Amaro, Alto da Pedra, Cajazeiras, Conceição e Salina Cristal, na Bacia Potiguar.

Estes poços foram selecionados aleatoriamente entre os poços direcionais equipados com BMA existentes. Todos tem completação simples e estão situados em áreas de alagadiços e salinas. Suas profundidades de perfuração medidas estão entre 850 e 1150m, com inclinações finais entre 25 e 50 graus. No Anexo 2, são apresentados os dados geométricos das trajetórias destes poços; no Anexo 3, os pontos das cartas dinamométricas; e, no Anexo 4, as cartas dinamométricas como originalmente foram coletadas. As Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, a seguir, apresentam um resumo dos demais dados coletados.

Os dados referentes aos equipamentos instalados no poço, bem como as trajetórias de perfuração dos poços foram obtidos diretamente de arquivos da Petrobras.

O gradiente de temperatura e a RGO de produção indicados nas tabelas são estimativas feitas pelos engenheiros responsáveis pelo acompanhamento de cada reservatório, baseadas em informações medidas anteriormente em poços das proximidades, produtores da mesma formação.

As condições de operação e as características dos fluidos produzidos (API, viscosidade e BSW) foram obtidas dos testes de campo, descritos em maiores detalhes a seguir.

Tabela 5.1. Equipamento Instalado

Poço	Diâm. Rev. (in)	Coluna de Tubos			Coluna de Hastes					Bomba	
		Diâm. (in)	Packer (s/n)	Âncora (s/n)	H. pol. (in)	Quant 7/8" 3/4" 5/8"			Cent. (s/n)	Diâm (in)	Prof. (m)
1	7	2 7/8	N	N	1 1/8"	50	58	-	N	2 1/4	823
2	5 1/2	2 7/8	N	N	1 1/8"	-	44	30	N	2 1/4	566
3	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	47	59	-	N	2 1/4	803
4	7	2 7/8	N	N	1 1/8"	-	107	-	N	2 1/4	815
5	7	2 7/8	S	N	1 1/4"	-	109	-	N	2 1/4	833
6	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	42	-	-	S	2 1/4	730
7	7	2 7/8	N	S	1 1/8"	-	44	53	N	1 3/4	739
8	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	-	39	59	N	1 3/4	744
9	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	41	48	-	N	2 1/4	681
10	7	2 7/8	N	S	1 1/8"	98	-	-	N	2 1/4	746
11	7	3 1/2	N	N	1 1/4"	86	-	-	N	2 1/4	652
12	7	2 7/8	N	N	1 1/8"	-	45	56	N	2 1/4	769
13	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	-	45	56	N	1 3/4	772
14	7	2 7/8	N	N	1 1/8"	-	97	-	N	2 1/4	741
15	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	-	45	55	N	1 3/4	760
16	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	-	42	54	S	1 3/4	732
17	7	2 7/8	N	N	1 1/8"	-	46	53	N	1 3/4	754
18	7	2 7/8	N	N	1 1/8"	-	49	41	N	2 1/4	685
19	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	-	59	30	N	2 1/4	675
20	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	-	46	53	N	2 1/4	753
21	7	2 7/8	N	N	1 1/8"	-	46	55	N	1 3/4	771
22	7	2 7/8	N	N	1 1/4"	-	102	-	N	2 1/4	777

Tabela 5.2. Fluidos Produzidos

Poço	°API	Viscosidade do Óleo(cp)		BSW (%)	RGO (m ³ /m ³)
		40°C	80°C		
1	18.0	16.5	4.5	93.0	10.9
2	18.6	21.0	12.0	96.0	4.6
3	18.6	315.0	54.0	40.0	11.7
4	19.3	9.0	3.0	7.0	9.8
5	18.0	16.5	4.5	19.0	9.8
6	35.7	11.0	5.8	2.5	1.0
7	35.9	8.0	4.2	1.0	1.0
8	36.8	7.5	4.2	2.8	1.0
9	38.0	7.5	4.0	2.5	1.0
10	34.0	11.5	5.5	54.0	1.0
11	34.0	8.0	4.2	40.0	1.0
12	17.0	90.0	36.5	72.0	1.0
13	40.0	5.0	3.2	78.0	2.0
14	34.0	10.5	5.3	15.0	1.0
15	38.0	5.8	3.5	82.0	2.0
16	31.0	8.0	4	50.0	2.0
17	17.0	150.0	27	66.0	1.0
18	38.0	5.8	3.5	8.5	2.0
19	35.0	9.2	4.5	54.0	1.0
20	32.0	12.0	6	40.0	1.0
21	36.0	8.8	4.5	0.9	1.0
22	35.0	13.5	6.8	55.0	2.0

Tabela 5.3. Condições Operacionais

Poço	Temp. Cabeça (°F)	Grad. Geot (°F/m)	Pressão Tubo (kgf/cm ²)	Pressão Rev. (kgf/cm ²)	Curso (in)	N (cpm)
1	80.0	0.0577	7.2	7.2	32	8.0
2	80.0	0.0577	3.5	3.5	44	8.5
3	80.0	0.0577	2.5	2.5	32	8.0
4	80.0	0.0577	1.2	1.2	24	8.0
5	80.0	0.0577	1.8	1.8	32	10.5
6	103.8	0.0340	2.0	2.0	24	10.0
7	103.8	0.0340	2.5	2.5	38	12.0
8	103.8	0.0340	4.0	4.0	30	10.0
9	103.8	0.0340	6.0	6.0	38	13.0
10	103.8	0.0340	3.0	3.0	24	10.0
11	103.8	0.0340	4.0	4.0	38	11.0
12	103.8	0.0340	3.0	3.0	38	14.0
13	103.8	0.0340	5.0	5.0	38	12.0
14	103.8	0.0340	7.0	7.0	46	11.0
15	103.8	0.0340	6.0	6.0	30	11.0
16	103.8	0.0340	5.0	5.0	30	11.0
17	103.8	0.0340	2.5	2.5	32	12.0
18	103.8	0.0340	3.0	3.0	38	10.0
19	103.8	0.0340	5.0	5.0	46	13.0
20	103.8	0.0340	0.0	0.0	40	10.0
21	103.8	0.0340	2.5	2.5	38	10.0
22	103.8	0.0340	14.0	14.0	30	10.0

Tabela 5.4 Resultados dos Testes de Campo

Poço	Vazão (m ³ /d)	Nível Dinam (m)	Enchim. Pleno Bomba ¹ (S/N)	Teste da Válvula Passeio ¹	Teste da Válvula de Pé ¹
1	18.1	140	S	OK	OK
2	13.7	554	S	VAZ	OK
3	18.1	103	S	OK	OK
4	10.6	558	S	OK	OK
5	7.8	-	N	OK	OK
6	7.8	738	N	OK	OK
7	7.0	745	N	OK	OK
8	7.5	744	S	VAZ	OK
9	35.0	673	S	VAZ	OK
10	12.0	749	S	VAZ	OK
11	18.9	641	S	VAZ	OK
12	9.0	763	N	OK	OK
13	20.1	762	S	OK	OK
14	25.8	734	N	OK	OK
15	9.4	746	S	VAZ	OK
16	14.1	701	S	VAZ	OK
17	12.1	649	S	VAZ	OK
18	15.3	678	N	OK	OK
19	45.1	762	S	VAZ	OK
20	12.9	756	N	-	-
21	15.2	788	S	VAZ	OK
22	26.5	64	S	OK	OK

¹ Resultado parcial obtido a partir do exame visual da carta dinamométrica.

Testes de Campo

O testes de campo consistem em testes de produção, análises de laboratório, registros de carta dinamométrica e nível dinâmico.

Teste de Produção

O teste de produção visa medir a vazão de líquido e coletar amostras de fluidos para posterior análise em laboratório.

O procedimento usual é direcionar a produção do poço para um tanque de teste por um período que varia entre 6 e 24h, em função da produção esperada do poço e do volume máximo do tanque de testes. Através da medição de nível no tanque calcula-se o volume produzido e estima-se a produção diária de líquidos.

Análises de Laboratório

As amostras de fluidos produzidos coletados durante o teste de produção são enviadas ao laboratório para determinação de BSW, densidade, e viscosidade do óleo.

A determinação do BSW é feita a partir da média aritmética dos BSW de duas amostras do mesmo poço. Este valor é comparado com valores históricos para validação. Caso haja dúvida, novas amostras são coletadas para confirmação.

O óleo, após ser separado da água, é analisado para determinação de densidade e viscosidade. A medição de viscosidade é feita em duas temperaturas, 40°C e 80°C.

Registro Dinamométrico

A carta dinamométrica é um gráfico de carga versus posição da haste polida durante o ciclo de bombeio, obtida através de um dinamômetro hidráulico.

O dinamômetro é instalado em um espaçador colocado entre o prendedor (grampo) e a mesa do cabresto. A seguir, bombeia-se o fluido hidráulico até que toda a carga da haste passe através do aparelho, e faz-se o registro das cargas ao longo do ciclo.

Em seguida, com a UB parada, são realizados mais duas medições: a carga estática máxima (teste da válvula de passeio) e a carga estática mínima (teste da válvula de pé).

A carta assim obtida segue para o escritório onde é digitalizada através de um "scanner" (Anexo 4). A partir da imagem digitalizada, um programa de computador gera a seqüência de pontos (carga, posição), para processamentos posteriores. Esta seqüência tem início e fim coincidentes e começa pela posição extrema inferior da haste polida. No Anexo 3 apresentamos os pontos das cartas obtidos por este procedimento.

Registro de Nível Dinâmico

O nível dinâmico é obtido através de equipamento emissor/receptor de onda acústica, conhecido como sonolog.

Após a montagem do equipamento numa tomada do anular do poço, é dado um disparo com um cartucho explosivo ou de gás a alta pressão. O ruído produzido desde o disparo até a reflexão do som no nível de fluido no anular é registrado (Figura 5.1).

O cálculo do nível dinâmico é feito identificando-se, no registro, os picos correspondentes à reflexão do som nas luvas. A distância entre as luvas consecutivas numa coluna de tubos é de aproximadamente 9,3 m. Assim, através da contagem do número de luvas existentes entre a superfície e o nível de fluido no anular é possível, determinar a profundidade deste nível.

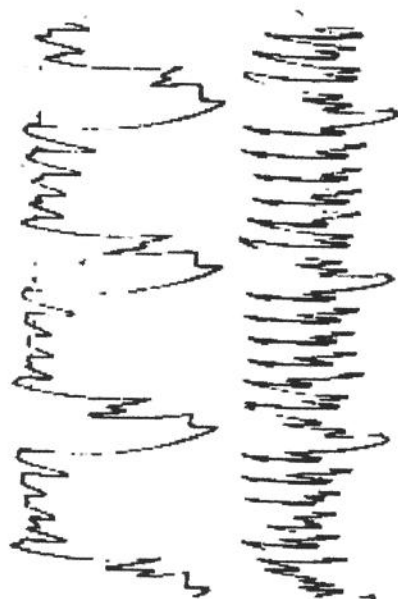


Figura 5.1. Registro do nível dinâmico

Quando o poço não possui obturador ("packer"), é possível, também, estimar a vazão de gás pelo anular, através do fechamento do anular e acompanhamento do crescimento de pressão e variação do nível dinâmico. Em todos os poços esta metodologia foi executada. Entretanto, não houve variação do nível dinâmico ou da pressão no anular com o revestimento fechado, indicando que a vazão de gás pelo anular era próxima de zero.

Obtenção dos Parâmetros para Comparação

Os parâmetros básicos de projeto (PPRL, MPRL, PT, PRHP, e q_L) podem ser determinados, pelas várias metodologias de cálculo apresentadas, a partir dos dados de equipamentos instalados, das propriedades dos fluidos e das condições de operação. Os valores destes parâmetros também podem ser extraídos diretamente da carta dinamométrica real e dos resultados dos testes de campo, possibilitando a comparação entre os diversos modelos existentes.

A obtenção do PPRL e do MPRL a partir da carta dinamométrica de superfície medida é feita diretamente pela leitura da carga máxima e carga mínima do conjunto de pontos da carta.

Seja θ é o ângulo da manivela (Fig. 5.2). Em UB's convencionais com $\theta = \omega t$ e cinemática expressa por (4.62), o cálculo do fator de torque f_T é dado por:

$$f_T(\theta) = S[A_1 \cos \theta + \dots + A_6 \cos 6\theta + B_1 \sin \theta + \dots + B_6 \sin 6\theta] \quad (5.1)$$

com os coeficientes da Tabela 4.1.

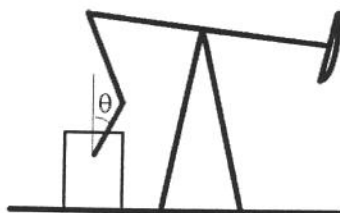


Figura 5.2. Definição do Ângulo da Manivela (θ)

Considerando-se que a UB está perfeitamente balanceada, desprezando-se o desbalanceio estrutural, determina-se a curva de torque líquido no eixo do redutor e, conseqüentemente, o PT. O torque líquido no redutor é dado por:

$$T_N(\theta) = F_s(\theta) \cdot f_T(\theta) - M \sin \theta \quad (5.2)$$

onde M , o contrabalanceio, é calculado de modo que o torque máximo nos cursos ascendente e descendente sejam equivalentes.

A potência na haste polida PRHP é determinada a partir da área da carta dinamométrica, ou seja:

$$PRHP = N \oint F_s(s) ds \quad (5.3)$$

A vazão é obtida diretamente do Teste de Produção.

Os valores dos parâmetros básicos de projeto obtidos através dos testes de campo com os poços selecionados constam da Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Parâmetros Básicos de Projeto - Valores Medidos

POÇO	PPRL (LBF)	MPRL (LBF)	PT (LBF.IN)	PRHP (HP)	q _L (M3/D)
1	5190	3140	21000	1.1	18.1
2	5620	1700	47000	2.6	13.7
3	5810	3120	26100	1.5	18.1
4	7250	2790	25400	1.2	10.6
5	6820	2310	36100	1.9	7.8
6	7040	2770	23300	1.1	7.8
7	5360	1670	34000	1.7	7.0
8	5700	1170	32700	1.6	7.5
9	7110	2300	52400	3.3	35.0
10	8050	2960	33500	1.8	12.0
11	8060	2400	59800	3.6	18.9
12	7100	1940	32300	1.9	9.0
13	7070	1500	57000	3.7	20.1
14	6370	2780	43400	2.1	25.8
15	5940	1900	34300	2.3	9.4
16	5940	1800	35300	1.9	14.1
17	6620	1100	46600	3.0	12.1
18	6470	1710	46800	2.0	15.3
19	7260	1540	61700	5.4	45.1
20	8200	1840	64600	3.1	12.9
21	5910	1450	46700	2.7	15.2
22	5210	2240	26500	1.6	26.5

Crítica dos Dados de Campo

Erros estão presentes sempre que há medição. Assim, todos os dados coletados estão sujeitos a erros, em que pese todos os cuidados que se teve ao obtê-los. Daí a necessidade de uma crítica dos dados coletados.

Quando detectada alguma inconsistência entre os diversos valores medidos foi necessário fazer pequenos ajustes nos valores lidos para se obter um conjunto coerente de dados. Isto ocorreu nos casos em que o nível dinâmico medido e a RGO de produção eram incompatíveis com a carta dinamométrica medida, que indicava claramente apenas um enchimento parcial da camisa da bomba por "pancada de fluido" ou interferência de gás.

O diagnóstico de "pancada de fluido" é uma evidência de que o nível dinâmico está próximo da profundidade da bomba. Assim, nos casos em que o nível dinâmico medido não coincidiu com a profundidade da bomba, e havia "pancada de fluido", o valor do nível dinâmico foi corrigido para a profundidade da bomba.

Algumas informações necessárias para o cálculo dos parâmetros de projeto estão mais sujeitas a incertezas pois não foram determinadas diretamente por instrumentos. É o caso da pressão de sucção (p_s), da fração volumétrica de gás na sucção da bomba (α) e do espaço morto na bomba de fundo.

A pressão de sucção depende do nível dinâmico e da vazão de gás ventilado pelo anular. A fração de gás na sucção da bomba depende da RGO de produção, da eficiência de separação gás-líquido de fundo, e da pressão de sucção.

O espaço morto foi considerado igual a 30 cm para todos os poços. Este valor é decorrente dos procedimentos operacionais de completação, em que as hastes são descidas até que a válvula de passeio toque na válvula de pé, para depois serem erguidas cerca de 30 cm.

A eficiência de separação foi considerada nula, uma vez que, de acordo com as medições feitas, a vazão de gás pelo anular foi aproximadamente zero. Em consequência, a pressão de sucção foi admitida como a soma da pressão medida no revestimento com a hidrostática correspondente ao nível dinâmico. Assim,

$$p_s = p_{cf} + \rho_f g(h_b - h_d) \quad (5.4)$$

A fração de gás na sucção da bomba, juntamente com a pressão de sucção, influenciam diretamente o cálculo da vazão para um dado deslocamento volumétrico. Definida a eficiência de separação e a pressão de sucção, a fração de gás na bomba é função única da RGO de produção. No entanto, dispunha-se apenas de uma estimativa muito "crua" da RGO de produção. Por isso, optou-se por corrigir o valor de RGO de produção, mantendo-se a estimativa da eficiência de separação como nula, de forma a obter uma vazão de líquido calculada próxima da vazão medida. O modelo escolhido para este ajuste foi o modelo 3D com acoplamento do escoamento de fluido, supostamente o de melhor precisão. Isto forçou a eliminação da vazão de líquido como parâmetro de comparação entre os modelos.

Os poços equipados com BMA na Bacia Potiguar geralmente não possuem obturador, devido às baixas pressões de reservatório e às baixas RGO's de formação. Entretanto, num dos poços analisados (nº 5) este dispositivo estava instalado. Neste caso, sabe-se que a eficiência de separação é nula, mas não se tem como calcular a pressão de sucção. Por isso, utilizou-se uma pressão que implicasse numa vazão de produção igual a vazão medida. O valor obtido (100psi), sendo baixo, é coerente com a carta dinamométrica, que indicava pancada de fluido ou interferência de gás.

Um resumo dos ajustes feitos durante a crítica de dados é apresentado na tabela 5.6.

Poços Descartados

Nenhum dos modelos ou métodos de cálculo apresentados foi construído para simular sistemas com bombas de fundo defeituosas. Todos eles partem do pressuposto de que os equipamentos estão em perfeitas condições.

Porque comprometeriam qualquer estudo comparativo, alguns poços, que apresentavam elevado vazamento nos testes das válvulas de passeio e pé, tiveram de ser descartados.

A identificação destes poços é feita a partir das cartas dinamométricas originais (Anexo 4) e outros dados, tais como: nível dinâmico, RGO e vazão

medida. Quando se identificou o vazamento pela carta dinamométrica, e se verificou que a vazão produzida era menor a vazão prevista, sendo impossível o ajuste da vazão através de pequenas variações de RGO e nível dinâmico, considerou-se o vazamento grande. Neste caso, o poço foi descartado. Por outro lado, mesmo se identificando o vazamento, se a vazão produzida era maior ou igual a vazão prevista, ou uma pequena variação na RGO ajustava a vazão, considerou-se o vazamento insignificante e o poço foi considerado no teste.

Seguindo este procedimento foram descartados os poços 2, 8, 10, 11, 15, 17, identificados na Tabela 5.3, pelo vazamento na válvula de passeio. Assim, restaram 16 poços para comparação entre os modelos. Os resultados dessa comparação são apresentados no Capítulo VI.

Tabela 5.6. Resumo dos Ajustes nos Dados

POÇO	VARIÁVEL	DE	PARA
4	RGO	9.8	8.0
6	RGO	1.0	1.6
7	RGO	1.0	2.7
12	NÍVEL	763	770
	RGO	1.0	8.0
14	NÍVEL	734	742
	RGO	1.0	1.2
16	RGO	2.0	1.6
19	RGO	1.0	0.8
20	RGO	1.0	2.8

CAPÍTULO VI

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Nos capítulos III e IV descrevemos as metodologias de cálculo a serem comparadas. Neste capítulo, apresentamos a comparação dos resultados dos modelos com as medições de campo, identificando os melhores métodos e determinando os coeficientes de atrito (μ) e amortecimento (c_D) mais adequados.

Os modelos são comparados quanto a precisão dos valores calculados para os parâmetros de projeto e quanto ao tempo de processamento.

Tempo de processamento

A Tabela 6.1 fornece valores médios do tempo de processamento necessário ao cálculo dos parâmetros básicos de projeto, para um poço, utilizando-se os processos de cálculo apresentados nos capítulos III e IV. Estes tempos foram medidos em um microcomputador 486 DX de 66 Mhz.

Como já era esperado, os métodos Convencional, Evchenko & Zakharchenko, API, e Alhanati são bem mais rápidos que os demais, enquanto que os modelos que levam em conta a trajetória 3D do poço são os mais lentos. Entretanto, em função da máquina utilizada nos cálculos e dos intervalos de Δs e Δt utilizados nos modelos dinâmicos, pode haver flutuações destes valores. Os modelos dinâmicos 3D, por exemplo, são mais lentos que os modelos dinâmicos verticais, porque, além da maior complexidade das expressões envolvidas, utilizam Δs e Δt quatro vezes menores.

Os modelos de Evchenko & Zakharchenko e Alhanati foram calculados dividindo-se cada seção da coluna de hastes em 40 trechos de forma a se considerar todas as medições de trajetória realizadas.

A vantagem de se ter um procedimento que leva menos tempo pode, aparentemente, ser irrelevante, já que os tempos envolvidos são pequenos. Entretanto, num projeto real, isto não acontece pois, em geral, há necessidade de calcular os parâmetros básicos de projeto para dezenas ou até centenas de combinações de equipamentos, profundidades e condições operacionais.

Tabela 6.1 Tempo de Processamento dos Modelos

MODELO	TEMPO (S)	TEMPO RELATIVO AO CONVENCIONAL
Convencional	0.2	1.0
Evchenko & Zakharchenko	0.2	1.0
API	0.2	1.0
Alhanati	0.2	1.0
Gibbs (1963)	14.0	70.0
Lea Modificado	14.8	74.0
3D c/ A.V. de Gibbs	104.3	521.5
3D c/ A.V. de Lea	108.9	544.5

Precisão dos Valores Calculados para os Parâmetros de Projeto

Vimos, no Capítulo V, que a vazão não pôde ser utilizada nas comparações entre os modelos porque foi usada para ajustar a RGO de produção.

Todos os outros parâmetros (PPRL, MPRL, PT, e PRHP) são extraídos da carta dinamométrica. Contudo, os erros de medição percentuais, a que estão sujeitas estas variáveis, não são os mesmos. O menor erro de medição ocorre no valor do PPRL, enquanto o maior no MPRL (Tripp & Kilgore, 1990).

Assim, ao se usar o critério de menor erro nos valores medidos, a variável mais adequada para comparação seria o PPRL. Porém, sendo a UB o elemento mais caro dentro do sistema, a grandeza mais importante no projeto de um sistema de BMA é o PT. Por isso, na avaliação dos diversos modelos, estas variáveis serão as principais referências para comparação.

No que se segue, o erro (ε_i) é definido através da Eq. (6.1) e o valor absoluto do erro através da Eq. (6.2). As Eqs. (6.3) e (6.4) representam o erro médio e o erro absoluto médio na amostra de 16 poços.

$$\varepsilon_i = \frac{\xi_{ci} - \xi_{mi}}{\xi_{mi}} \quad (6.1)$$

$$\delta_i = |\varepsilon_i| \quad (6.2)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \varepsilon_i \quad (6.3)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \delta_i \quad (6.4)$$

O erro absoluto médio ($\bar{\delta}$) dá idéia da precisão e o erro médio ($\bar{\varepsilon}$) indica se o método de cálculo é a favor ou contra a segurança.

A seguir, são apresentados gráficos dos erros médios ($\bar{\varepsilon}$) e absolutos médios ($\bar{\delta}$) da amostra, obtidos com os diversos métodos, para as diversas variáveis.

Em todos os gráficos são mostrados os erros encontrados para os modelos convencional e API que, assim, servem de referência.

Para os métodos de Evchenko & Zakharchenko (1984), Alhanati (1989), 3D com atrito viscoso (A.V.) de Gibbs e 3D com atrito viscoso (A.V.) de Lea, estes erros serão mostrados em função do coeficiente de atrito de Coulomb (μ). Já para os métodos de Gibbs (1963) e Lea (1990) modificado estes erros são mostrados em função do fator de amortecimento adimensional (c_D). Com isso, além de identificar os métodos mais adequados, será possível determinar os valores desses coeficientes, de forma a se obter o menor erro no cálculo dos parâmetros básicos de projeto para os poços da amostra.

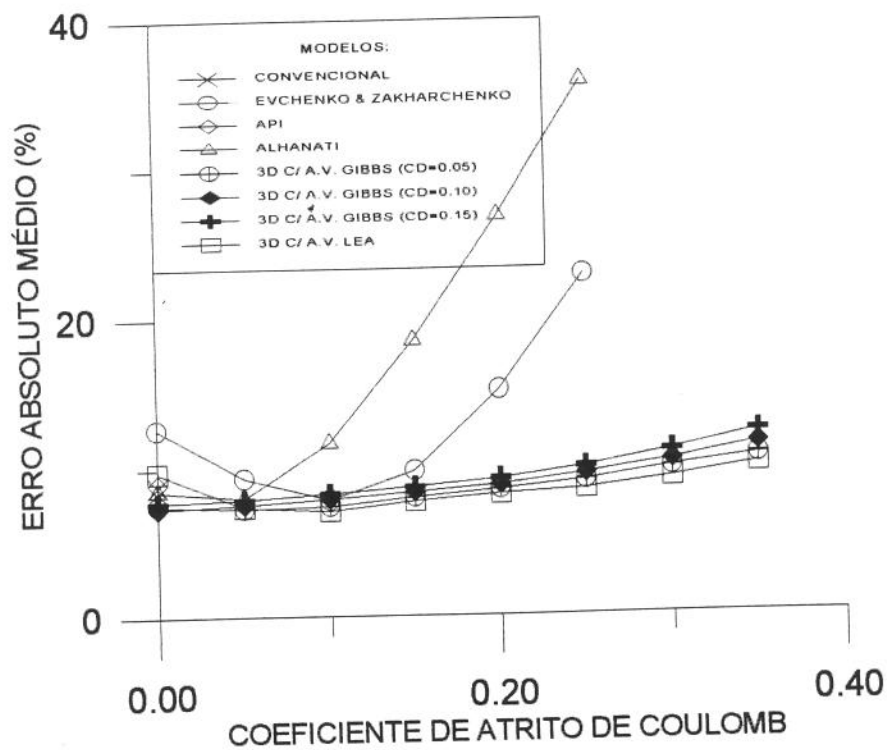


Fig. 6.1. Erro Absoluto Médio no PPRL vs. Coeficiente de Atrito

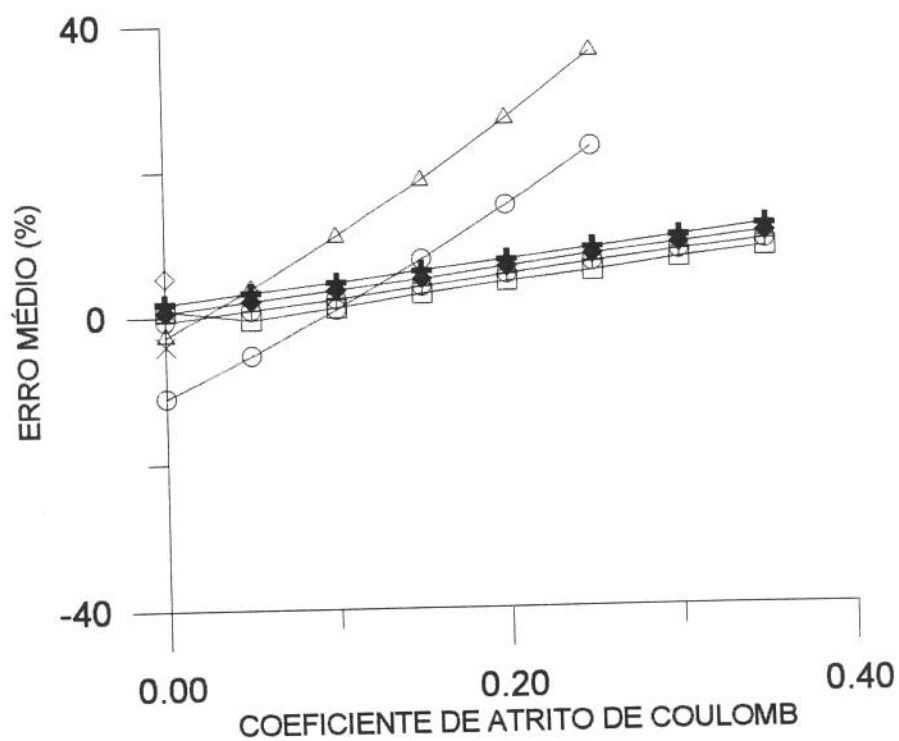


Fig. 6.2 Erro Médio no PPRL vs. Coeficiente de Atrito

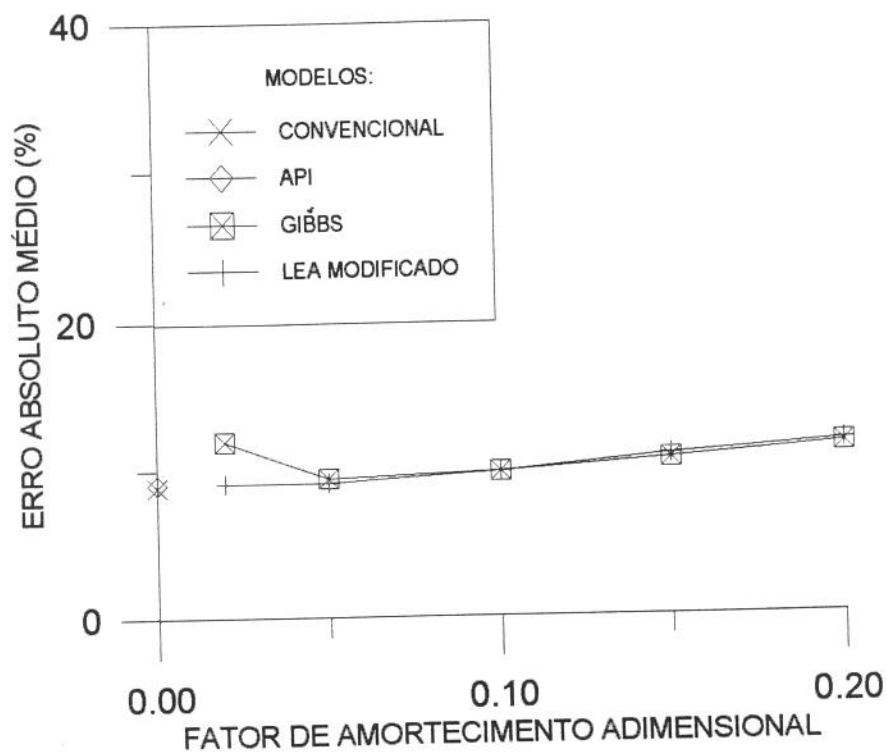


Fig. 6.3. Erro Absoluto Médio no PPRL vs. Fator de Amortecimento

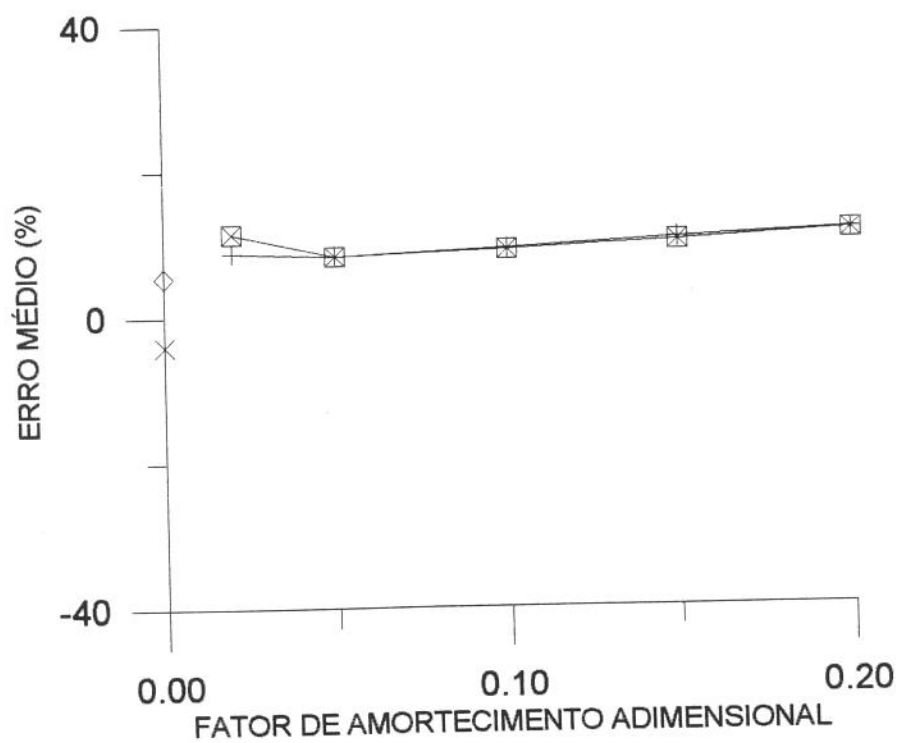


Fig. 6.4. Erro Médio no PPRL vs. Fator de Amortecimento.

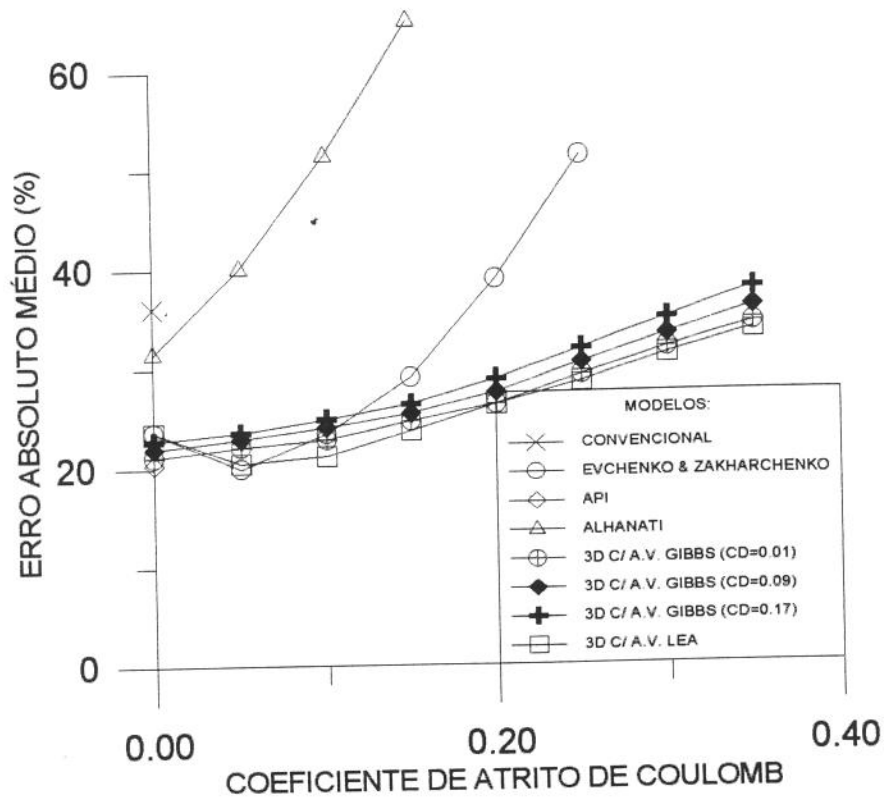


Fig. 6.5. Erro Absoluto Médio no PT vs. Coeficiente de Atrito.

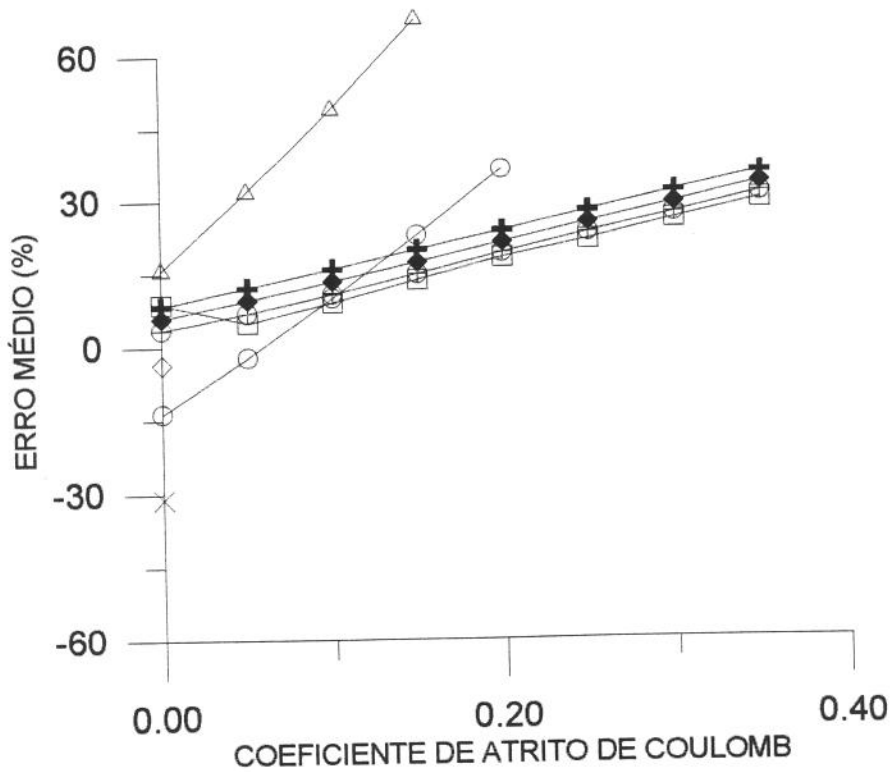


Fig. 6.6. Erro Médio no PT vs. Coeficiente de Atrito.

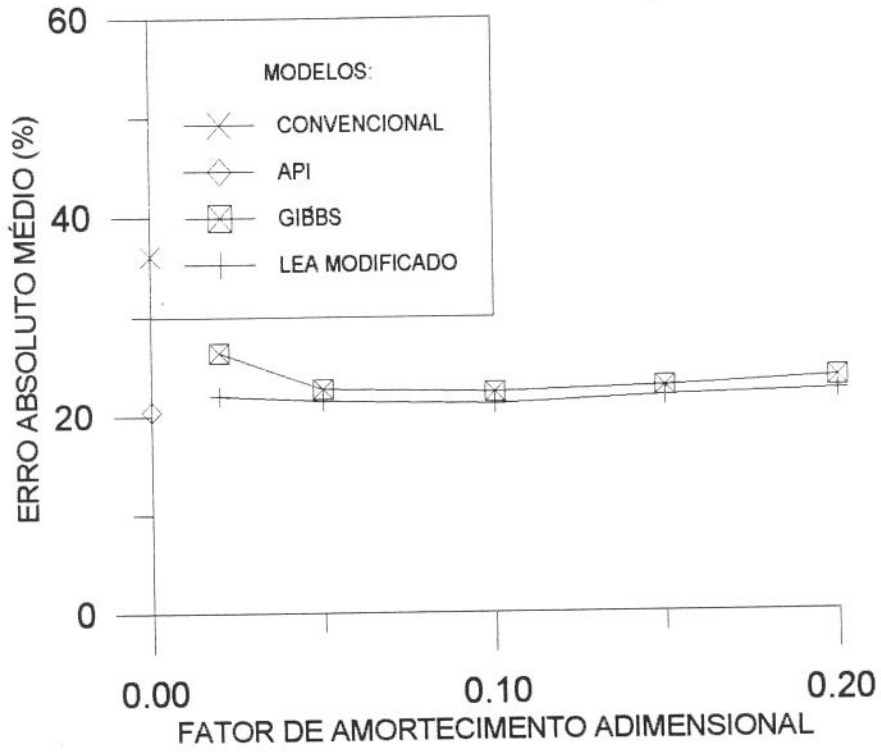


Fig. 6.7. Erro Absoluto Médio no PT vs. Fator de Amortecimento

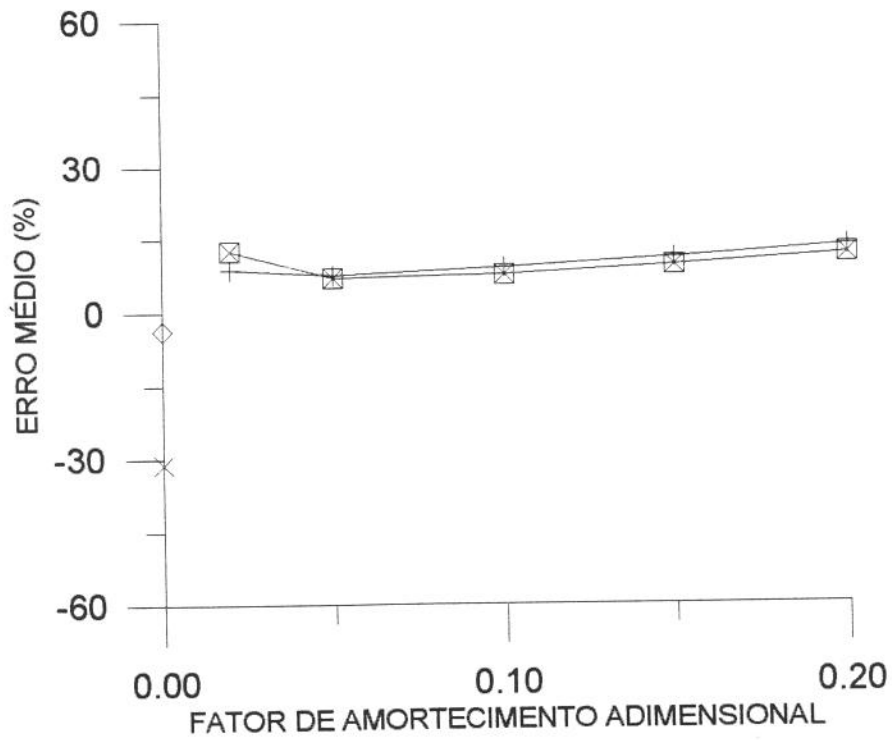


Fig. 6.8. Erro Médio no PT vs. Fator de Amortecimento

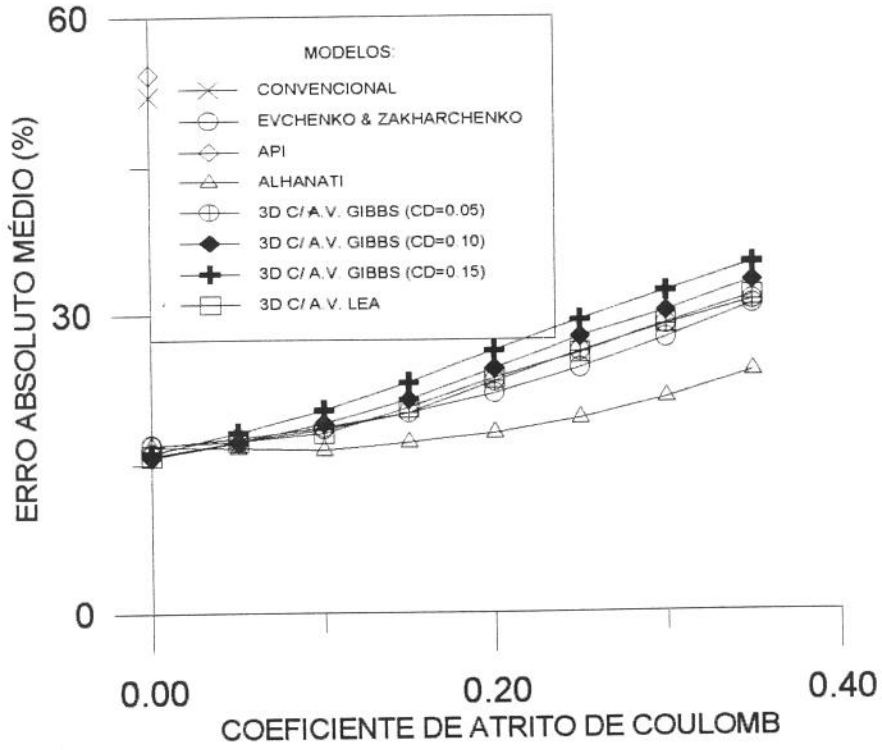


Fig. 6.9. Erro Absoluto Médio no MPRL vs. Coeficiente de Atrito.

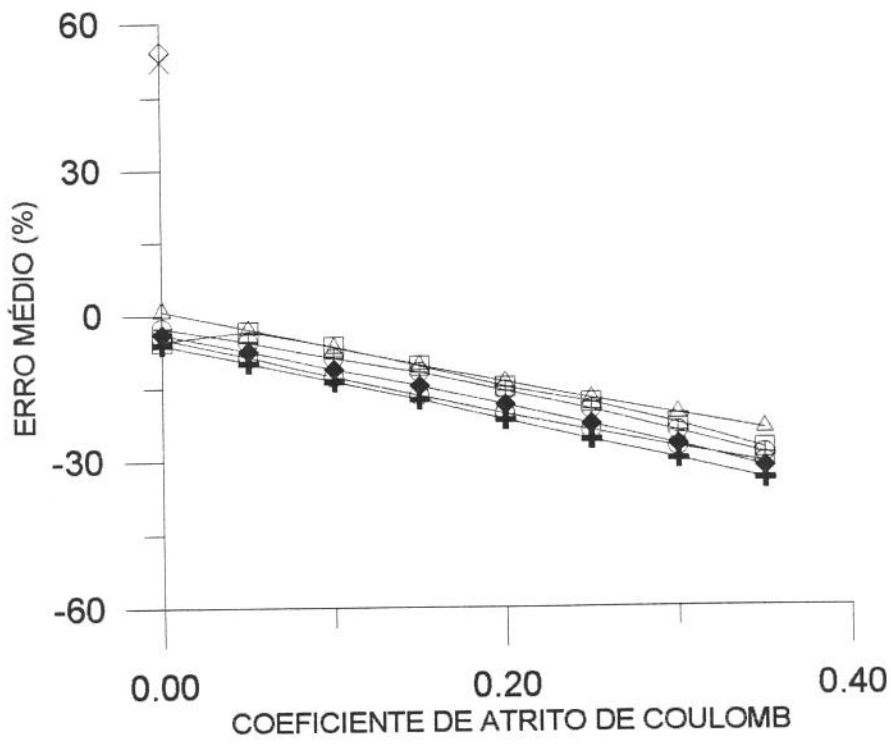


Fig. 6.10. Erro Médio no MPRL vs. Coeficiente de Atrito.

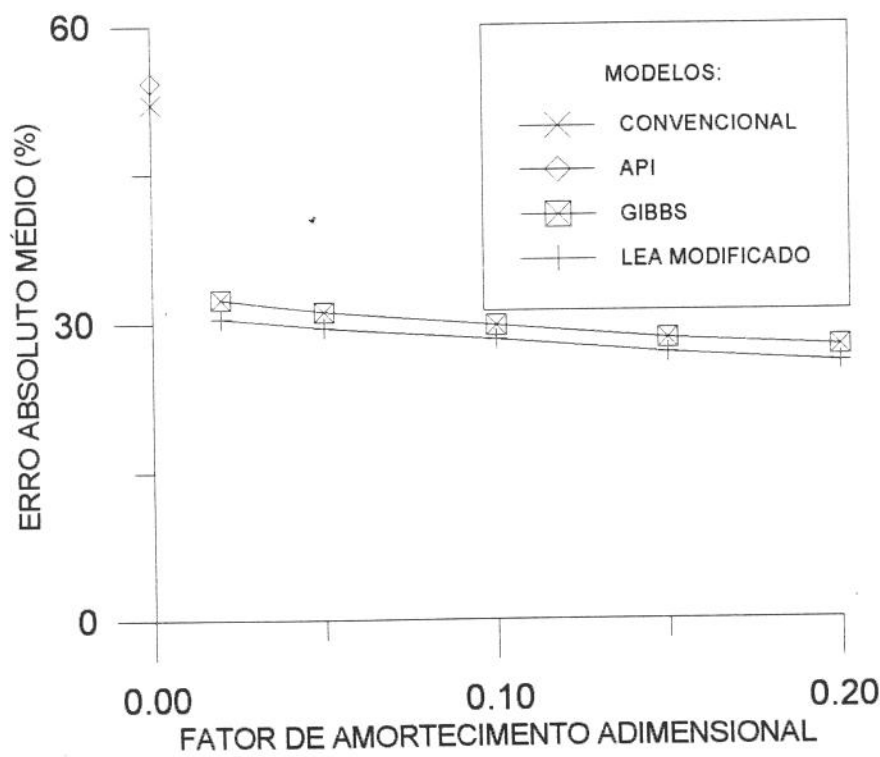


Fig. 6.11. Erro Absoluto Médio no MPRL vs. Fator de Amortecimento

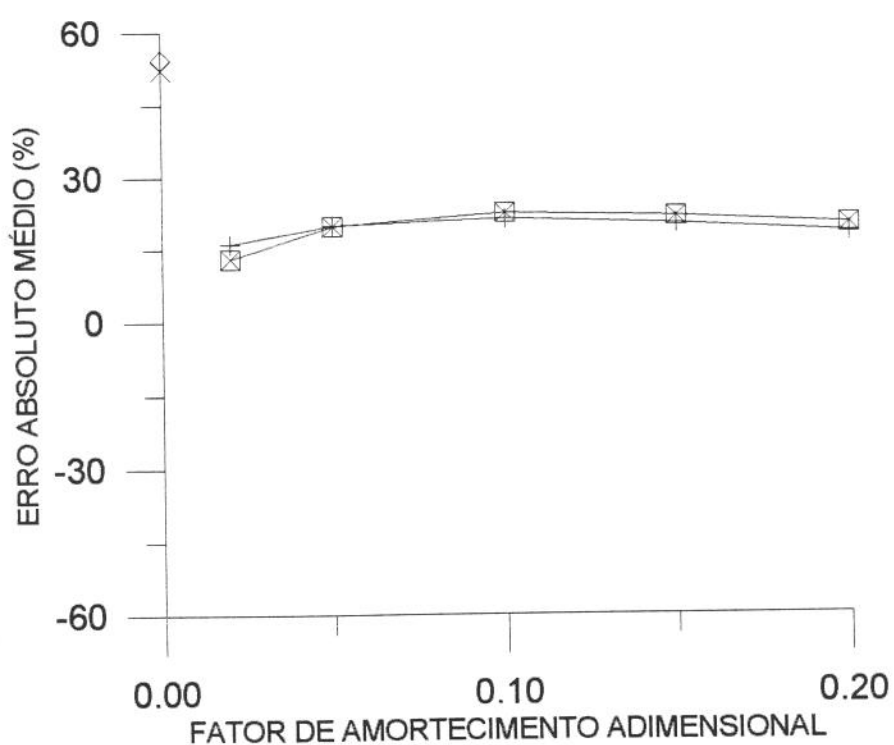


Fig. 6.12. Erro Médio no MPRL vs. Fator de Amortecimento

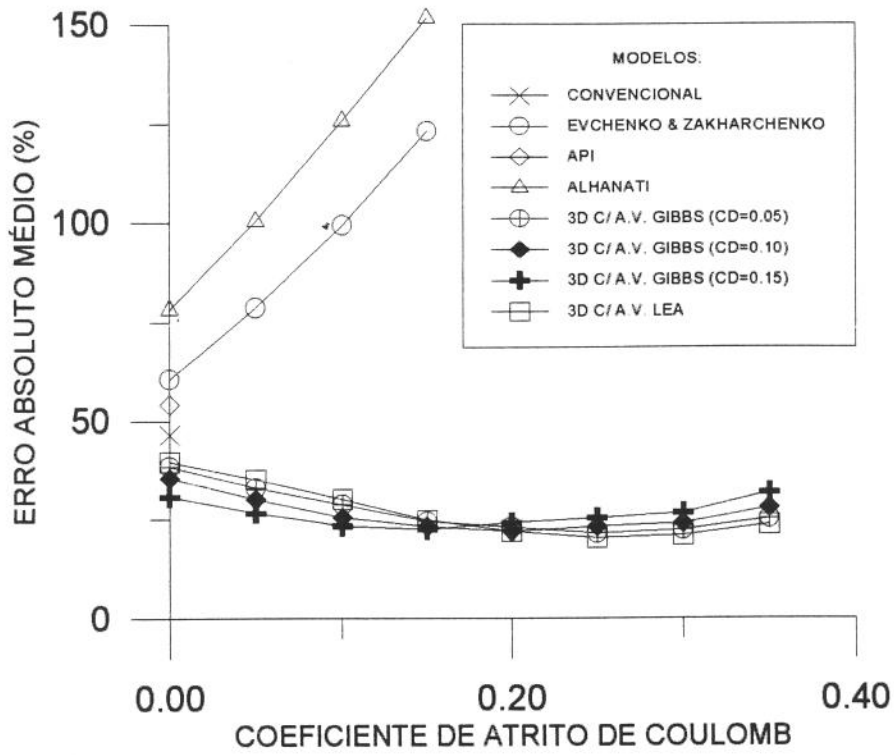


Fig. 6.13. Erro Absoluto Médio no PRHP vs. Coeficiente de Atrito.

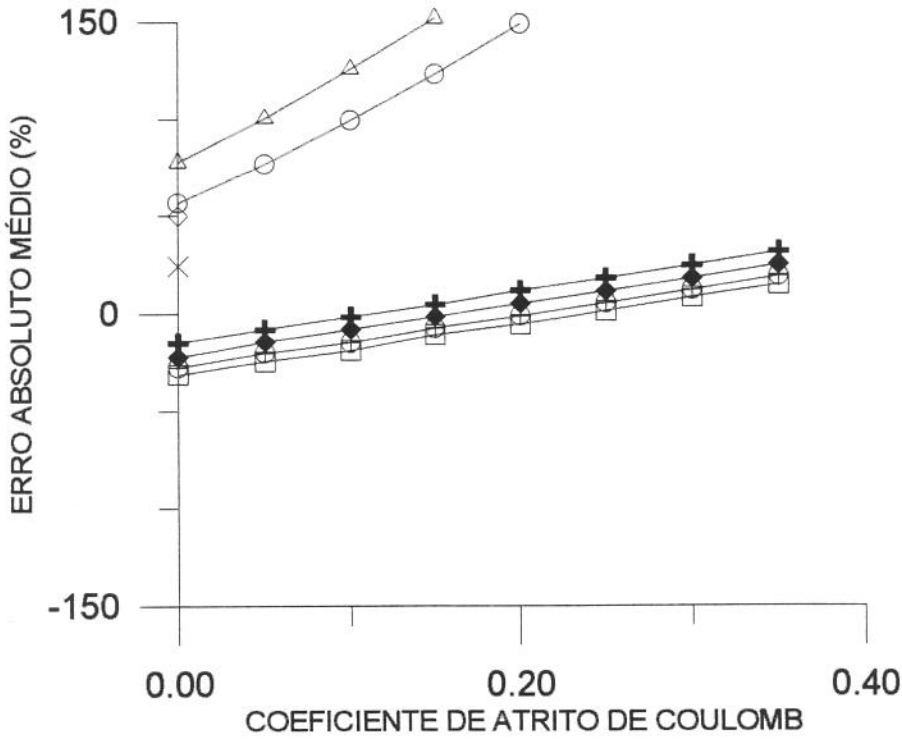


Fig. 6.14. Erro Médio no PRHP vs. Coeficiente de Atrito.

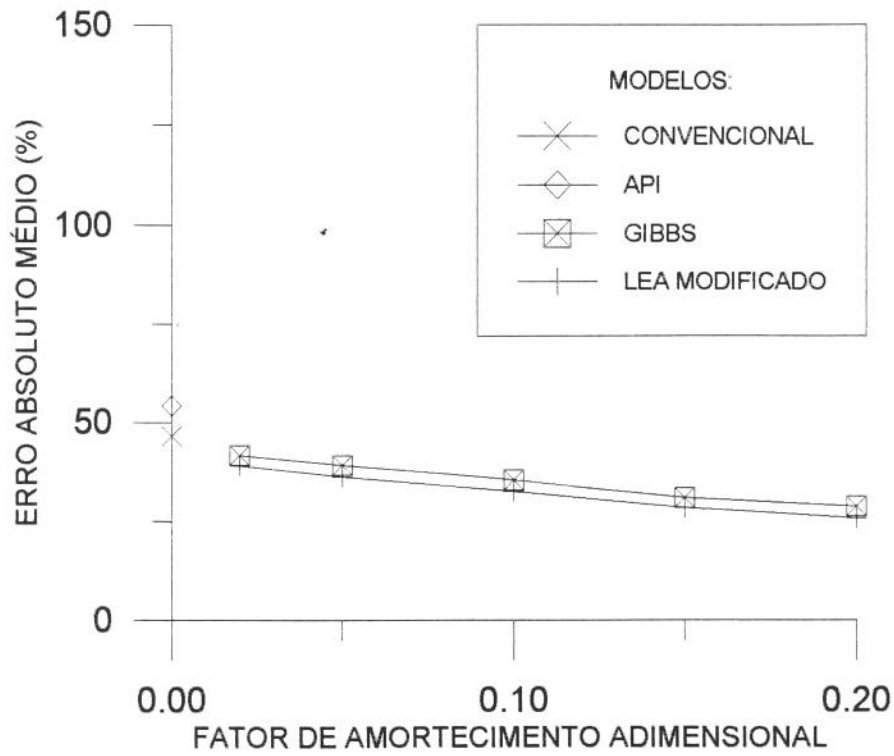


Fig. 6.15. Erro Absoluto Médio no PRHP vs. Fator de Amortecimento

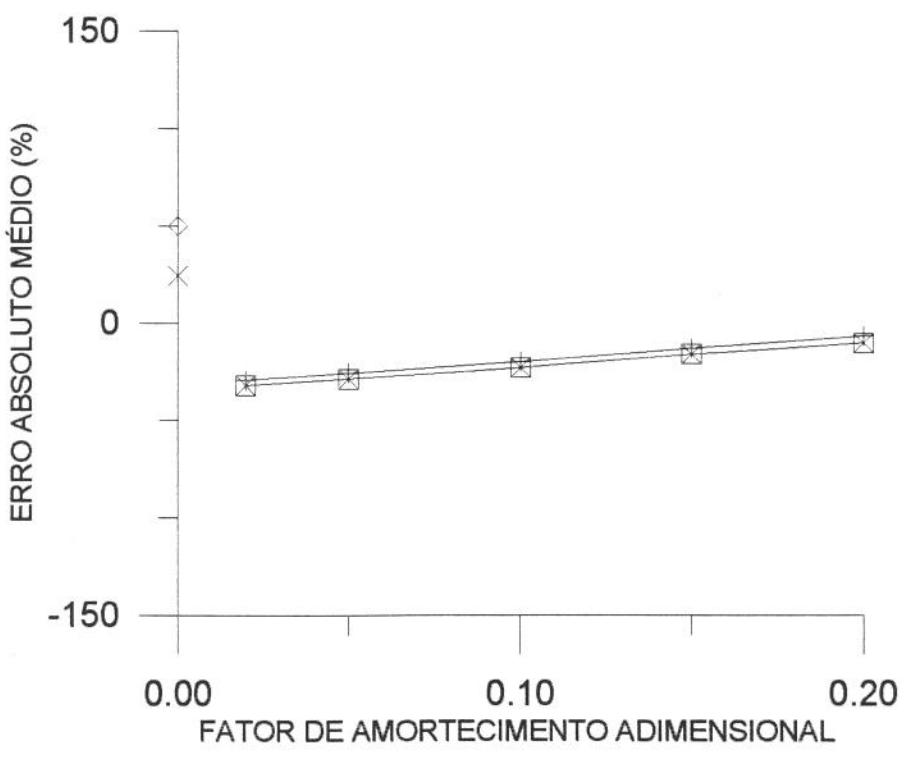


Fig. 6.16. Erro Médio no PRHP vs. Fator de Amortecimento

Em seguida, complementando as informações dos gráficos citados, é apresentada uma tabela contendo os erros no cálculo dos parâmetros de projeto pelos diversos métodos (Tabela 6.2).

Tabela 6.2. Erros no Cálculo dos Parâmetros Básicos de Projeto

MODELO	C_D	μ	PPRL		MPRL		PT		PRHP	
			$(\bar{\epsilon})$	$(\bar{\delta})$	$(\bar{\epsilon})$	$(\bar{\delta})$	$(\bar{\epsilon})$	$(\bar{\delta})$	$(\bar{\epsilon})$	$(\bar{\delta})$
Convencional	0	0	-4.0	8.8	52.2	52.2	-31.1	36.1	24.2	46.5
Evchenko & Zakharchenko	0	0.05	-5.4	9.4	-8.8	17.6	-2.3	20.0	77.1	78.6
	0	0.1	0.8	7.9	-12.8	18.7	9.8	23.5	99.4	99.4
API	0	0	5.3	9.0	54.4	54.4	-3.7	20.5	50.1	54.2
Alhanati	0	0.05	3.8	8.1	-3.0	16.6	31.6	34.7	100.4	100.4
	0	0.1	10.8	11.7	-6.8	16.4	48.8	49.2	125.8	125.8
Gibbs (1963)	0.05	0	8.1	9.4	19.6	31.2	7.0	22.7	-29.0	39.3
Lea (1990) Modificado	0.05	0	8.2	9.1	19.7	29.6	7.5	21.5	-26.0	36.2
3D c/ atrito visc. de Gibbs	0.05	0.05	0.8	7.3	-5.6	17.3	6.8	22.1	-20.2	33.0
	0.1	0.05	2.0	7.6	-7.5	17.2	9.5	23.0	-14.8	30.1
	0.15	0.05	3.2	8.0	-10.0	18.2	12.0	23.6	-8.3	26.7
	0.2	0.05	4.2	8.2	-12.7	19.7	14.5	24.3	-2.7	24.4
3D c/ atrito visc. de Lea	0	0.05	-0.5	7.4	-3.5	17.3	4.8	20.5	-24.7	35.2
	0	0.1	1.1	7.2	-6.7	18.1	8.8	21.2	-19.1	30.3

Tomando como principal referência para comparação os erros no PPRL e PT as seguintes conclusões podem ser obtidas da análise das Figs. 6.1 a 6.16 e da Tabela 6.2:

1) O método convencional deu bons resultados, mas, em geral, o PT foi subavaliado e foram registrados expressivos erros no cálculo do MPRL e do PRHP.

2) O método de Evchenko & Zakharchenko (1984) produziu bons resultados com exceção do cálculo do PRHP.

3) Quanto ao método API, este teve bom desempenho no cálculo do PPRL e do PT. Talvez seja este o motivo de seu sucesso na Bacia Potiguar. Erros expressivos, semelhantes aos do método convencional, foram registrados no cálculo dos demais parâmetros.

4) O método de Alhanati (1989) reduziu o erro no PPRL e MPRL, mas aumentou o erro no PT em comparação com o método API. Como os métodos API, Convencional e Evchenko & Zakharchenko, não teve boa performance no cálculo do PRHP.

5) Os modelos de Gibbs (1963) e Lea modificado (1990) resultaram em erros bastante semelhantes aos do método API no cálculo do PPRL e PT. Nos demais parâmetros tiveram desempenho bem superior.

6) O modelo 3D com atrito viscoso de Lea ou com atrito viscoso de Gibbs teve excelente comportamento no cálculo de todos os parâmetros básicos de projeto. Os seus resultados foram sempre melhores ou iguais aos dos melhores modelos em todas as variáveis, e ainda, a favor da segurança (exceto no cálculo do PRHP). Assim, pode ser considerado o modelo mais preciso.

7) O melhor valor do coeficiente de atrito de Coulomb foi de 0.05, conforme pode ser verificado nas Figs. 6.1, 6.2, 6.5 e 6.6 e na Tabela 6.2, resultando no menor erro no cálculo do PPRL e PT, tanto para os modelos 3D como para os métodos de Evchenko & Zakharchenko e Alhanati. Toda a faixa dos valores sugeridos por Presber (1990), 0.05 a 0.10, apresentou bons resultados.

8) Ainda pela observação das Figs. 6.1, 6.2, 6.5 e 6.6 e da Tabela 6.2 pode-se determinar o melhor valor para o coeficiente de amortecimento adimensional do modelo 3D com atrito viscoso de Gibbs como sendo da ordem de 0.05. Aqui, também, verificou-se que toda a faixa de valores recomendada para poços verticais (0.05 a 0.15) deu bons resultados. A sensibilidade deste modelo a variações do coeficiente de amortecimento foi baixa, sugerindo que, em outras aplicações, mesmo que ocorra um erro de 100 % na avaliação desse coeficiente, o erro no cálculo dos parâmetros de projeto deverá ainda ser baixo.

9) Os erros no cálculo do PRHP foram consideráveis em todos os modelos. Na tabela 6.2 verifica-se que o erro diminui com o aumento do coeficiente de amortecimento adimensional (c_D) do modelo 3D com atrito viscoso de Gibbs. Para se chegar a valores razoáveis de erro é necessário aumentar o fator de

amortecimento para valores não relatados na literatura. Surge, então, a hipótese de parte desse amortecimento ser devido ao dinamômetro.

10) Nos métodos que não geram a carta de superfície a partir de condições de contorno de fundo complexas (Convencional, API, Evchenko & Zakharchenko, API adaptado), os erros no cálculo do PRHP foram bem maiores. Isto ocorreu porque havia poços com enchimento parcial da bomba entre os poços da amostra. Num processo de dimensionamento, normalmente, se procura evitar a ocorrência dessa situação.

Nas Figs. 6.17 a 6.20 são apresentados gráficos de parâmetros de projeto medidos versus parâmetros calculados pelo modelo 3D com atrito viscoso de Lea e coeficiente de atrito de Coulomb igual a 0.05.

O espalhamento observado nas figuras é devido aos erros do modelo, erros nas variáveis de entrada e erros nos valores medidos tidos como verdadeiros. Se pudermos reduzir os dois últimos certamente teremos um menor espalhamento. O método API, largamente utilizado na indústria do petróleo, apresenta maior espalhamento no cálculo dos mesmos parâmetros para poços verticais, conforme pode ser observado nos gráficos de Griffin (citado por Tripp & Kilgore, 1990).

Apesar da previsão das cartas dinamométricas, pelo modelo proposto, ser apenas um meio para a obtenção dos parâmetros básicos de projeto, é válido comparar cartas previstas com cartas medidas para se avaliar, qualitativamente, a precisão do modelo proposto em prever a forma da carta dinamométrica. Nas Figs. 6.21 a 6.52 é feita uma comparação entre as cartas dinamométricas medidas e as cartas previstas pelo método 3D com atrito viscoso de Lea e coeficiente de atrito de Coulomb de 0.05.

Ao realizarmos uma comparação visual, observamos uma divergência sistemática entre os dois grupos de cartas dinamométricas relacionada a oscilações nas cargas, as quais, aparentemente, estão bastante atenuadas nas cartas medidas.

O próprio fenômeno físico e as equações diferenciais utilizadas para descrevê-lo indicam que as oscilações, de fato, existem. No entanto, não se pode determinar a contribuição do dinamômetro na atenuação das vibrações sem medições adicionais com instrumentos mais precisos.

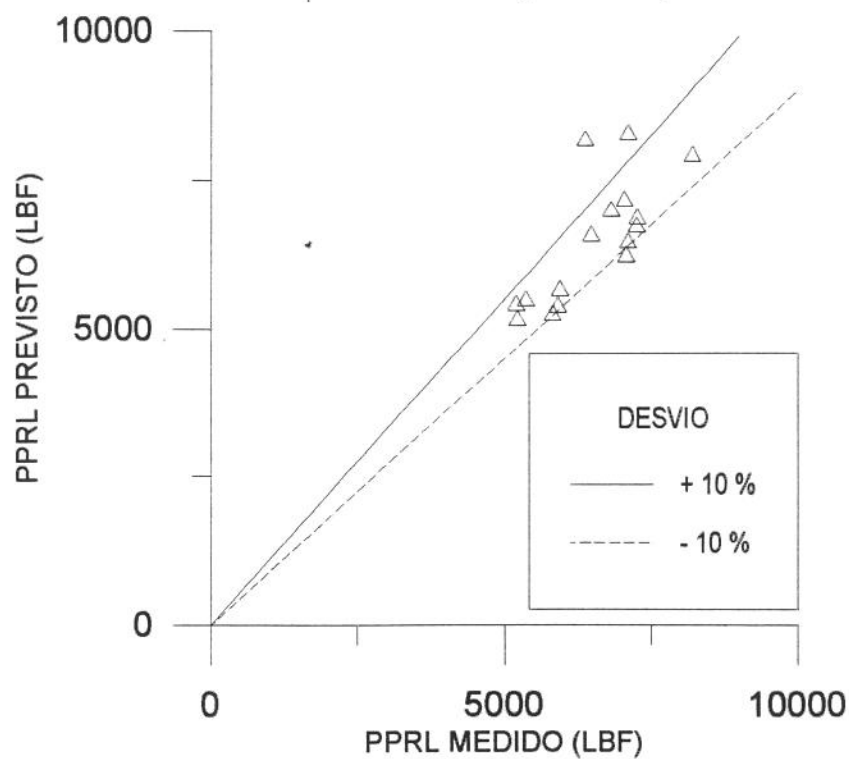


Fig. 6.17. PPRL Medido vs. PPRL Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea

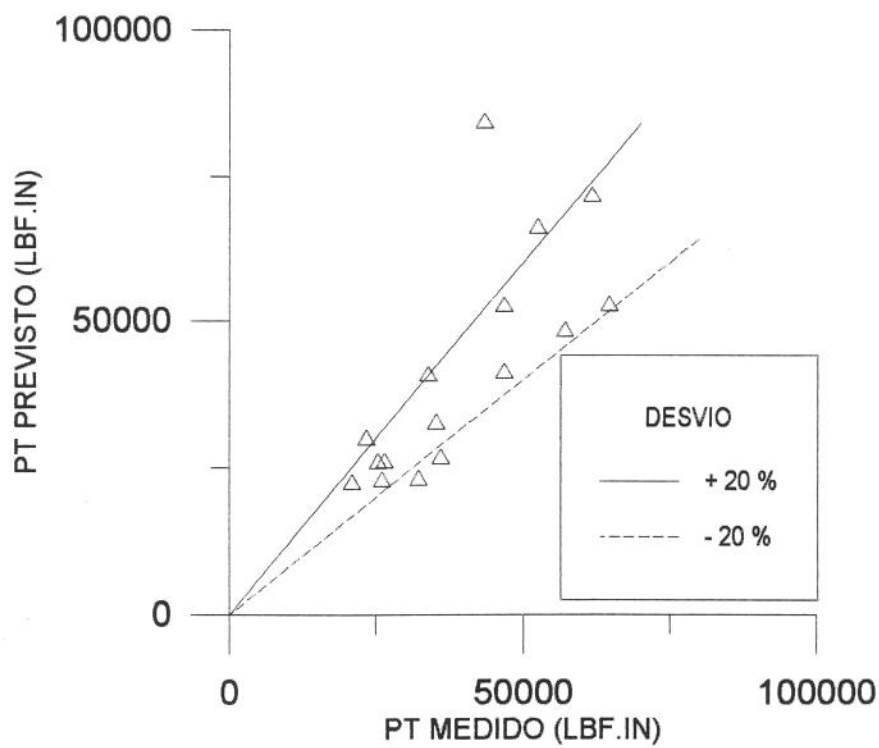


Fig. 6.18. PT Medido vs. PT Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea

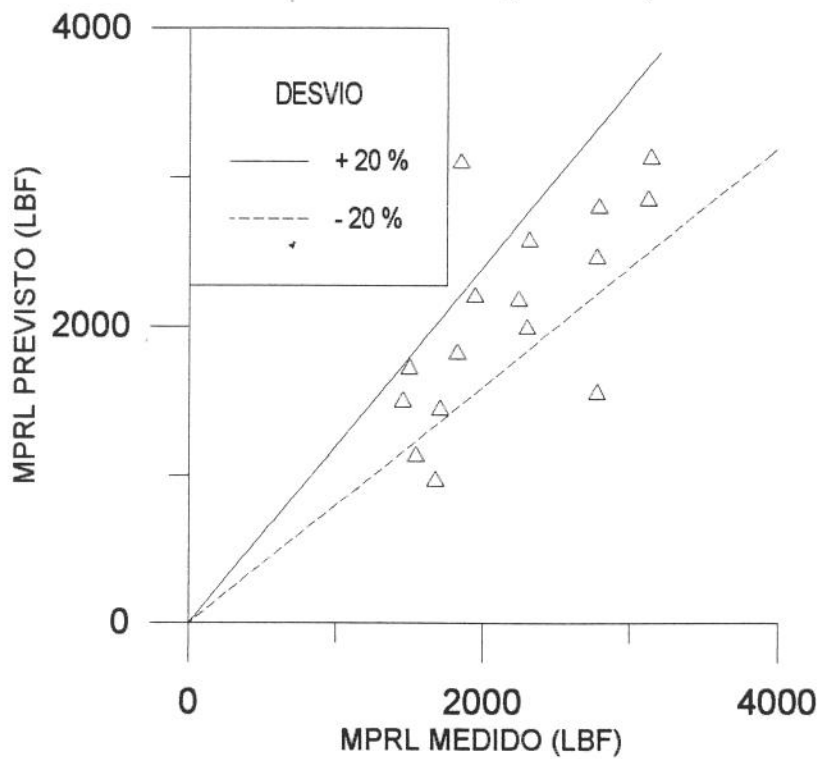


Fig. 6.19. MPRL Medido vs. MPRL Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea

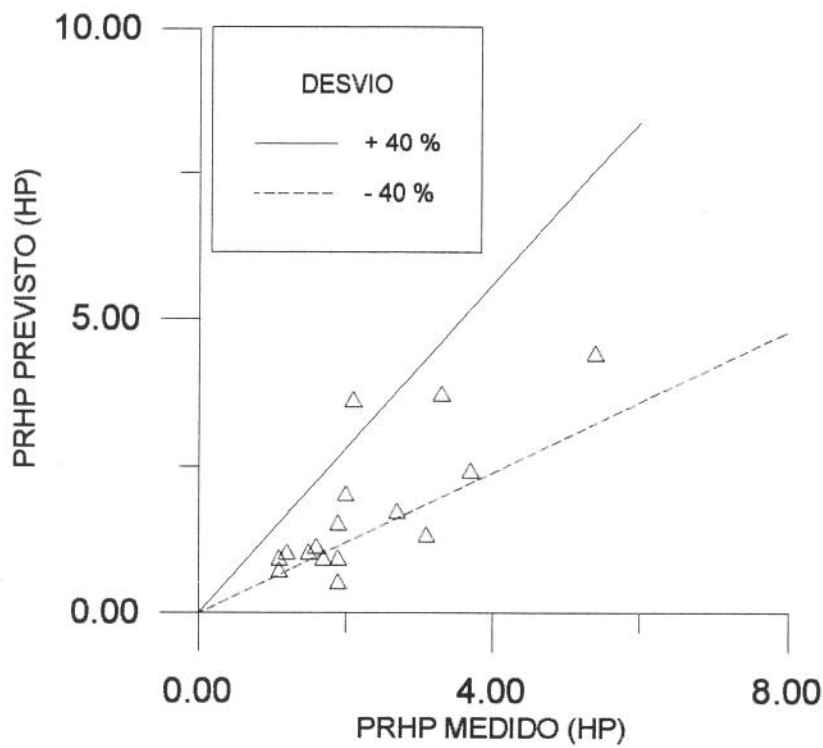


Fig. 6.20. PRHP Medido vs. PRHP Calculado pelo Modelo 3D com Atrito Viscoso de Lea

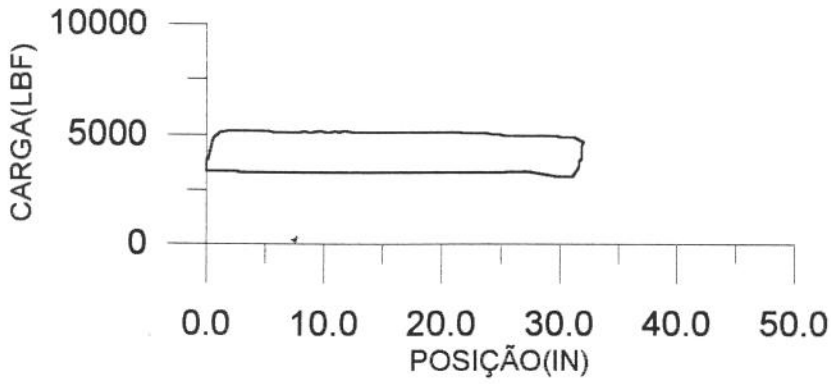


Fig. 6.21 Poço 01 - Carta Medida

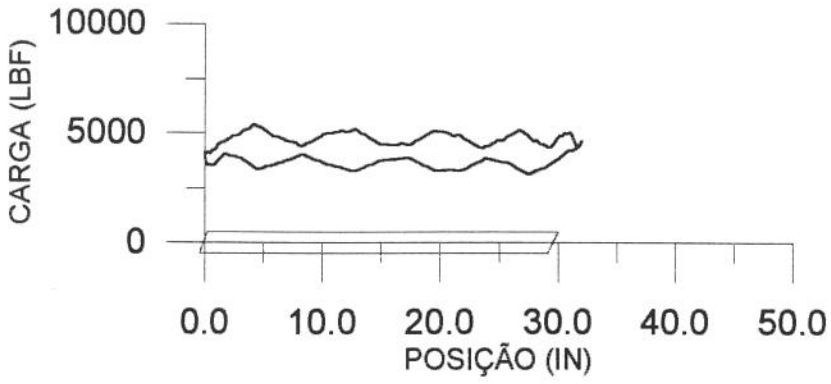


Fig. 6.22. Poço 01 - Carta Prevista

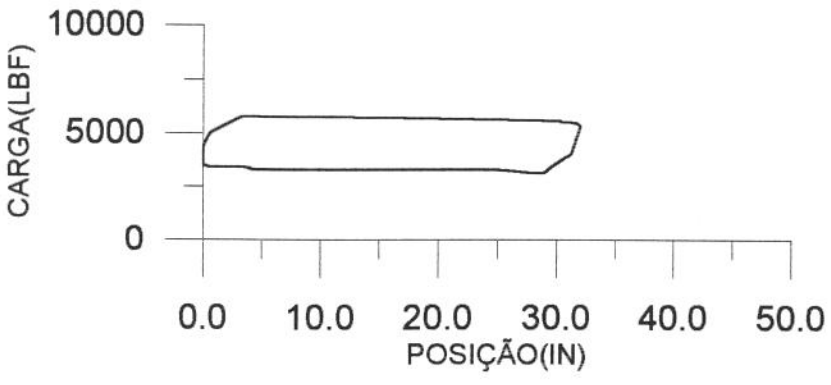


Fig. 6.23. Poço 03 - Carta Medida

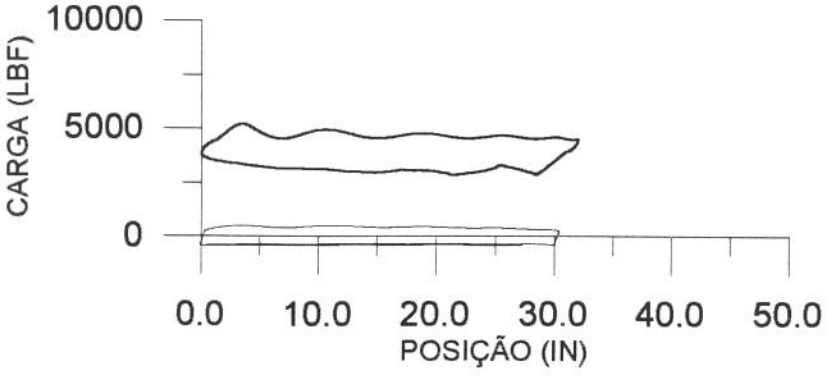


Fig. 6.24. Poço 03 - Carta Prevista

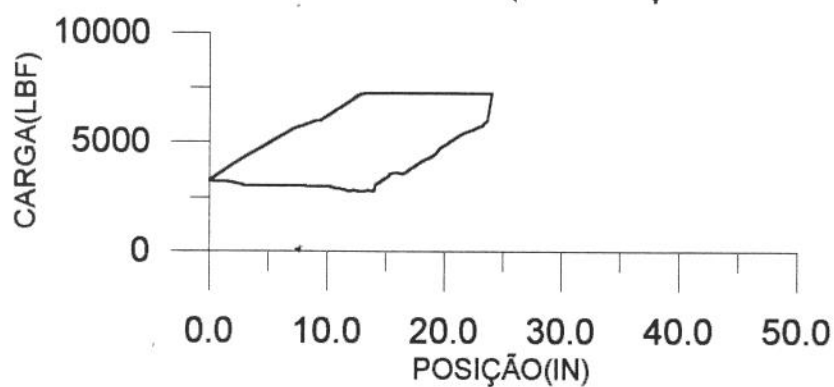


Fig. 6.25. Poço 04 - Carta Medida

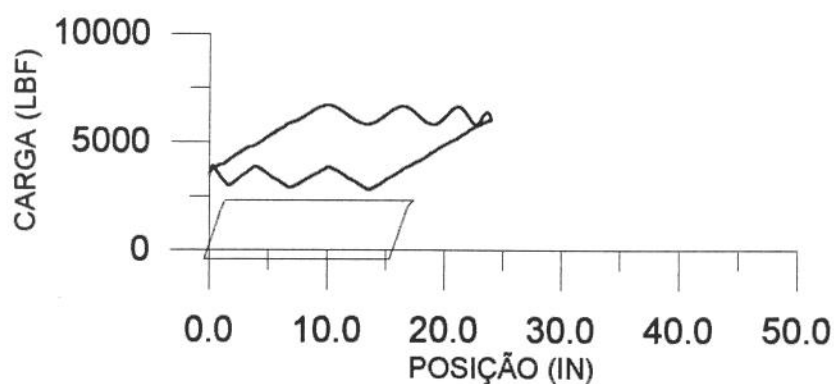


Fig. 6.26. Poço 04 - Carta Prevista

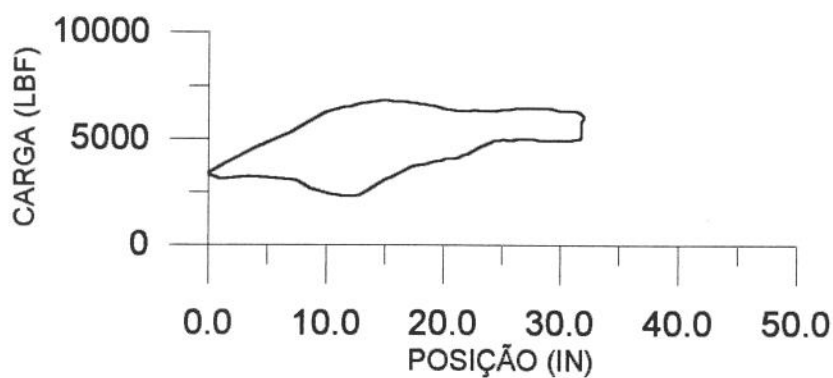


Fig. 6.27. Poço 05 - Carta Medida

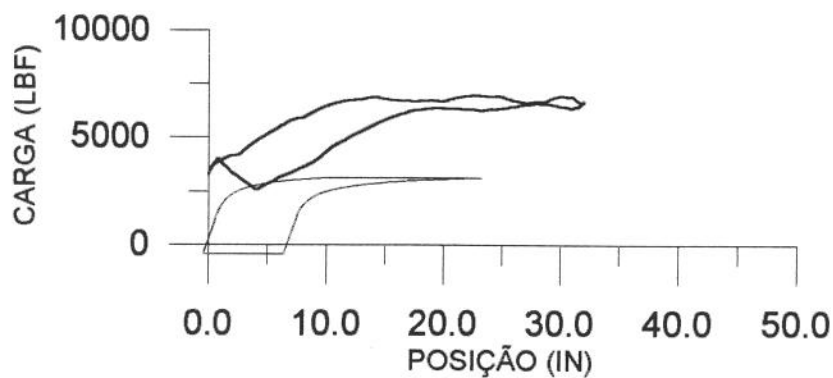


Fig. 6.28. Poço 05 - Carta Prevista

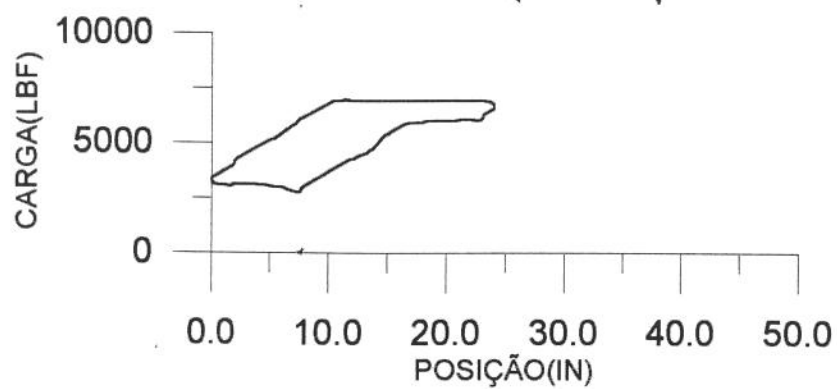


Fig. 6.29. Poço 06 - Carta Medida

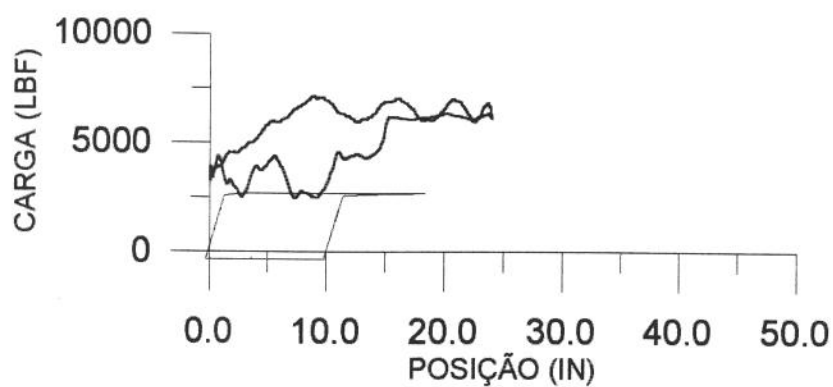


Fig. 6.30. Poço 06 - Carta Prevista

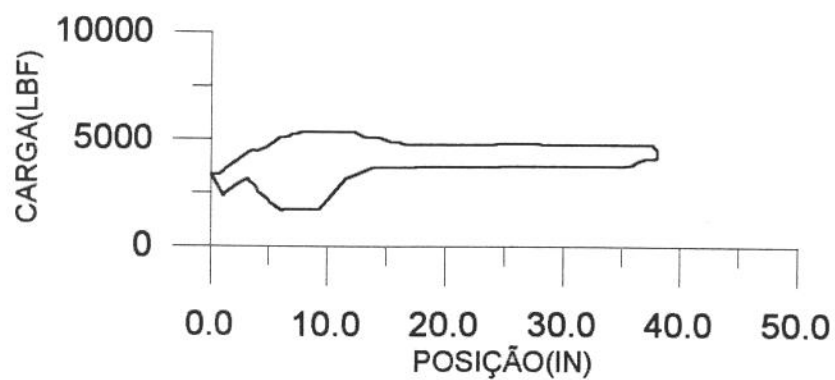


Fig. 6.31. Poço 07 - Carta Medida

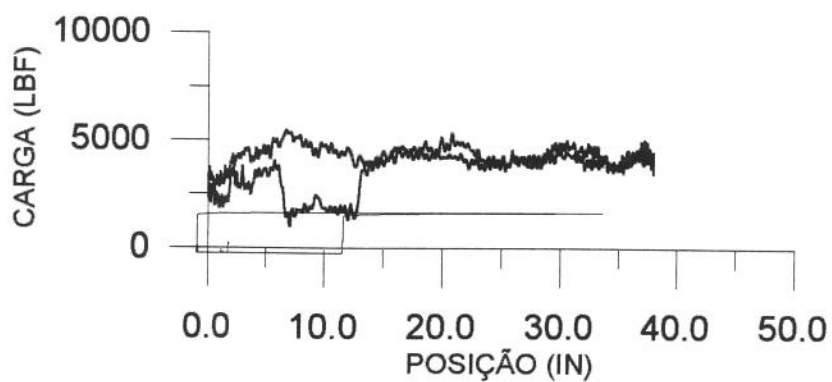


Fig. 6.32. Poço 07 - Carta Prevista

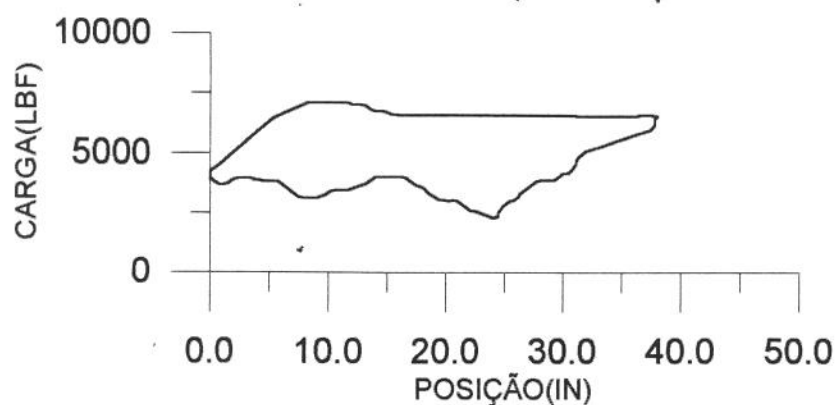


Fig. 6.33. Poço 09 - Carta Medida

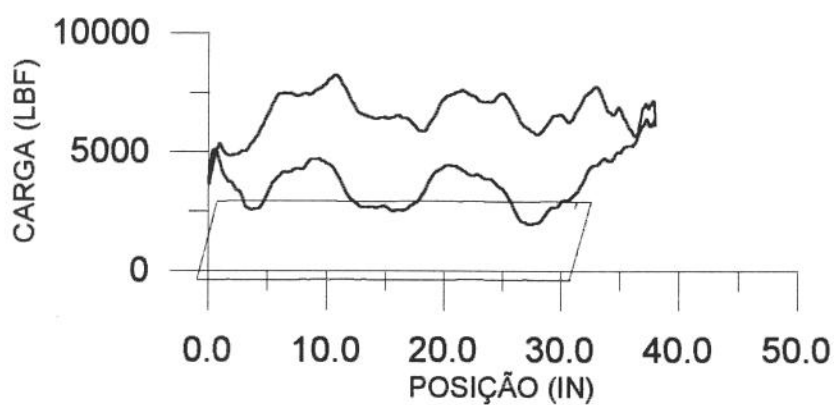


Fig. 6.34. Poço 09 - Carta Prevista

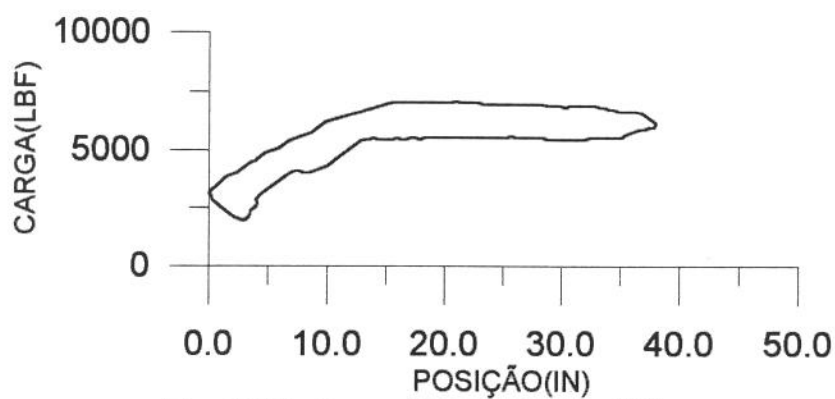


Fig. 6.35. Poço 12 - Carta Medida

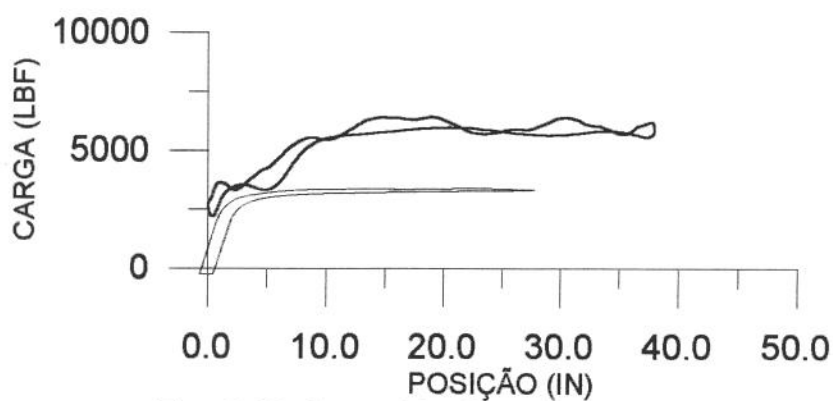


Fig. 6.36. Poço 12 - Carta Prevista

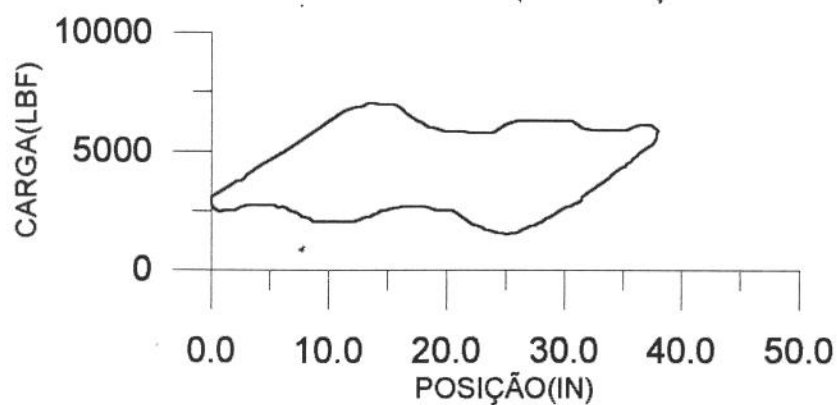


Fig. 6.37. Poço 13 - Carta Medida

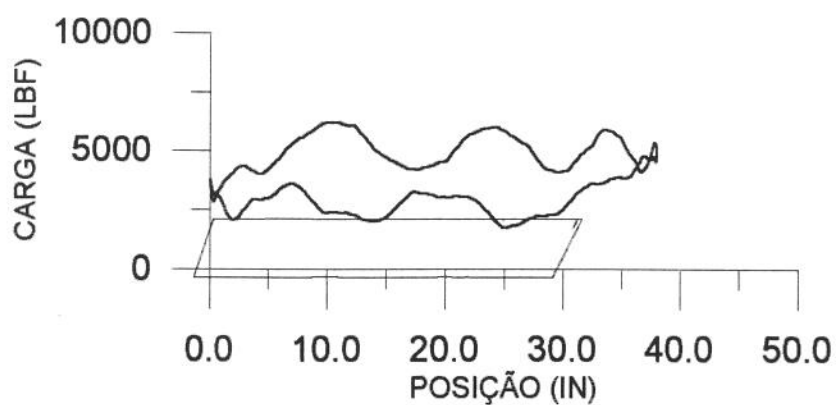


Fig. 6.38. Poço 13 - Carta Prevista

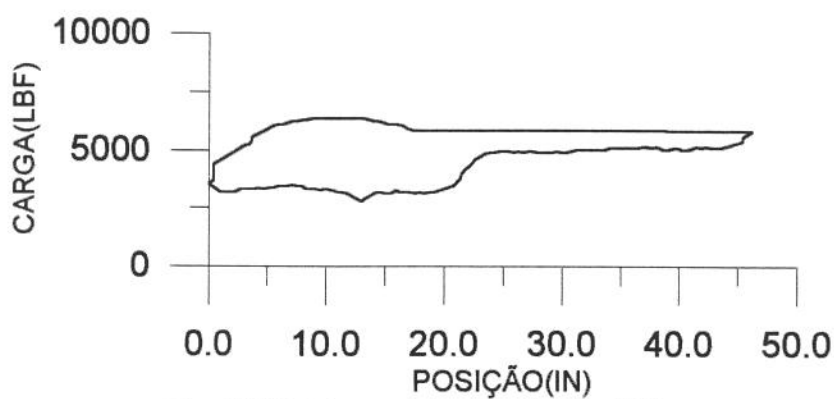


Fig. 6.39. Poço 14 - Carta Medida

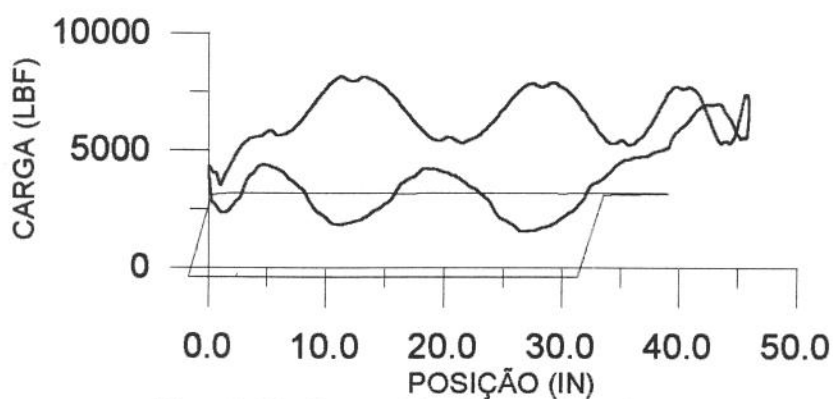


Fig. 6.40. Poço 14 - Carta Prevista

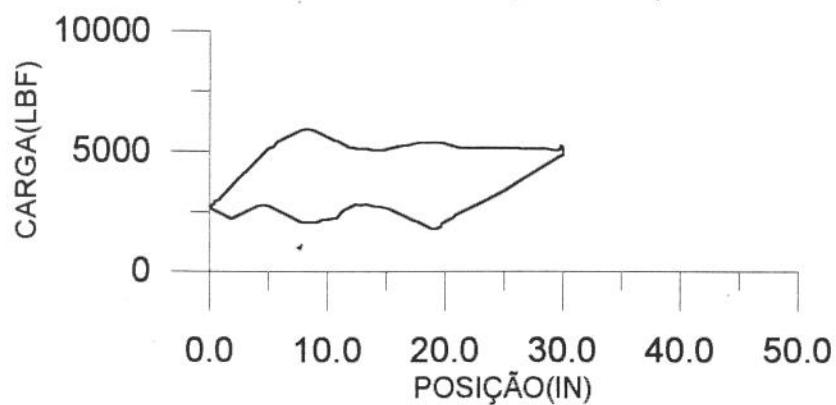


Fig. 6.41. Poço 16 - Carta Medida

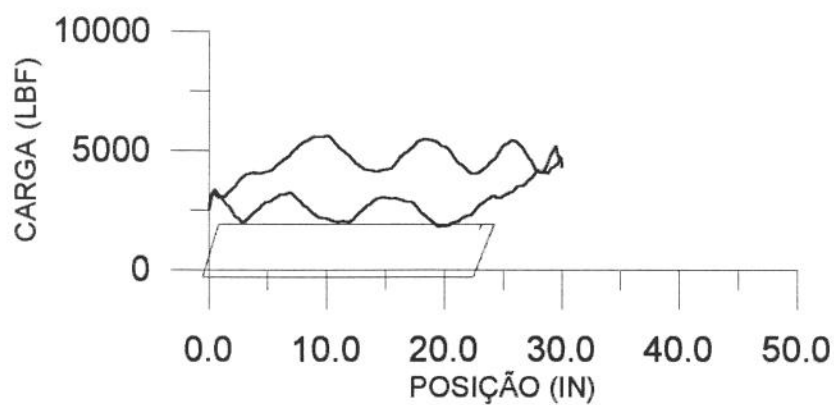


Fig. 6.42. Poço 16 - Carta Prevista

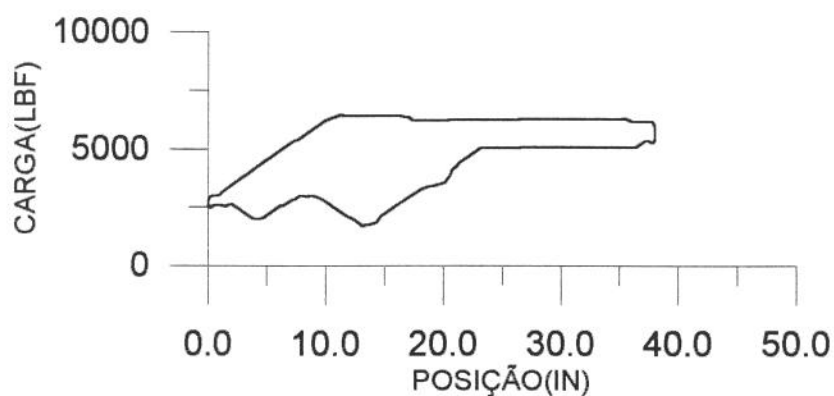


Fig. 6.43. Poço 18 - Carta Medida

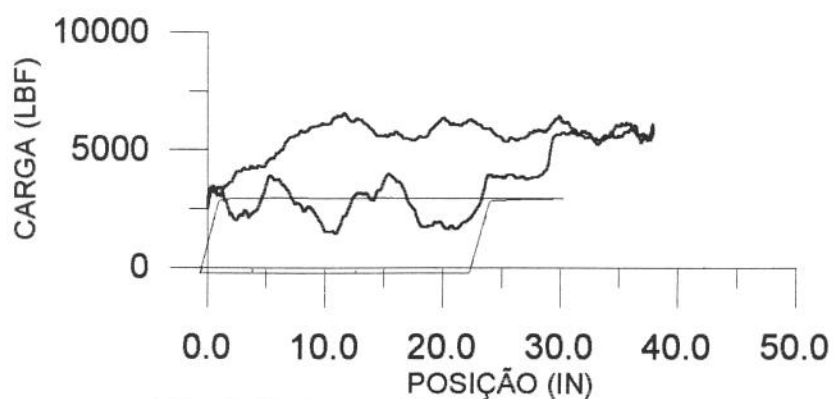


Fig. 6.44. Poço 18 - Carta Prevista

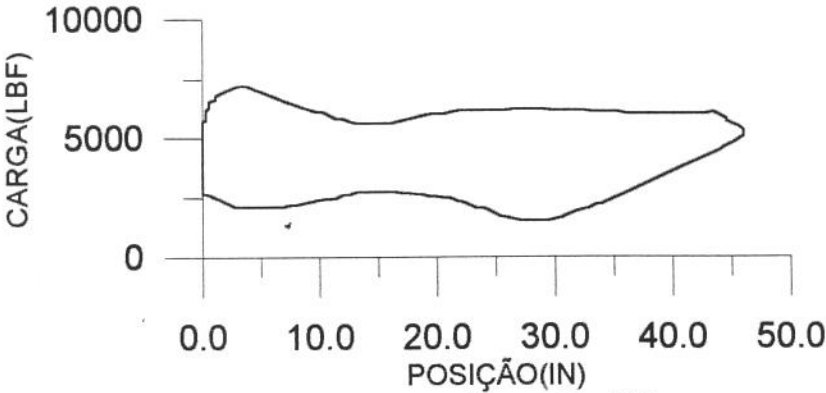


Fig. 6.45. Poço 19 - Carta Medida

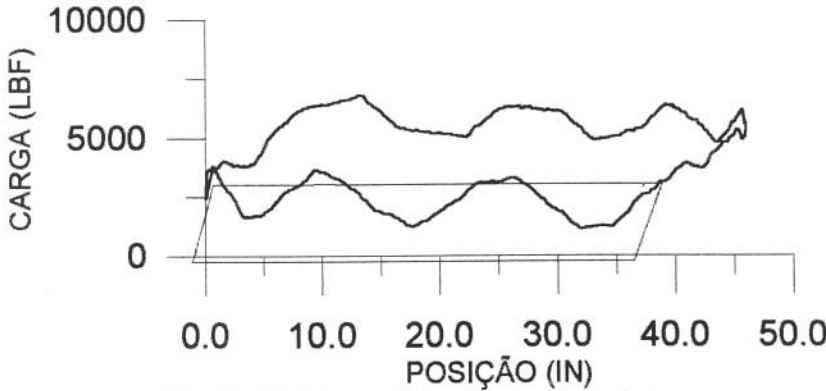


Fig. 6.46. Poço 19 - Carta Prevista

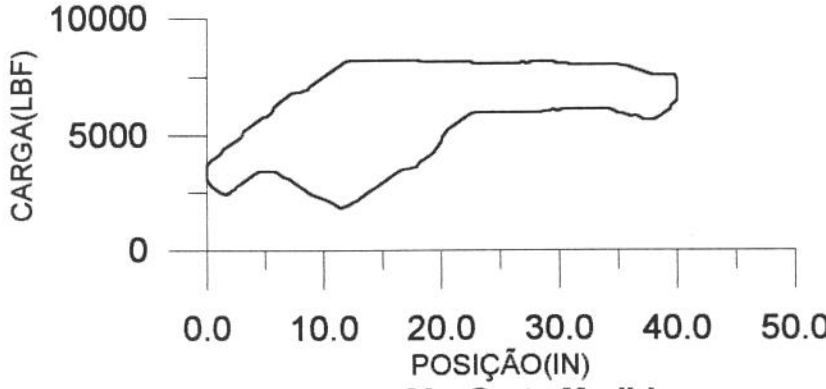


Fig. 6.47. Poço 20 - Carta Medida

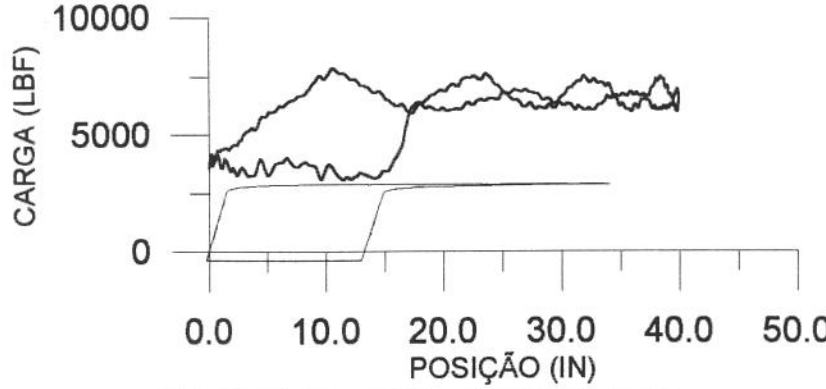


Fig. 6.48. Poço 20 - Carta Prevista

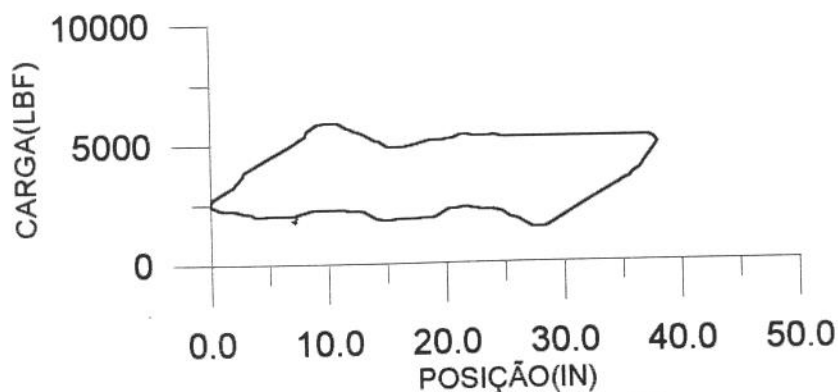


Fig. 6.49. Poço 21 - Carta Medida

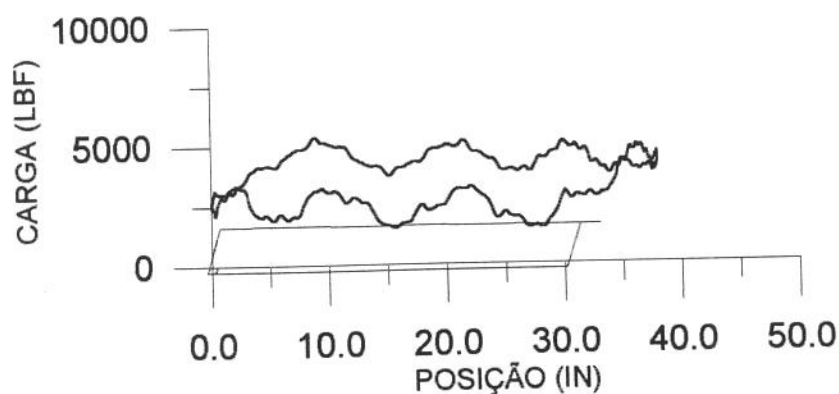


Fig. 6.50. Poço 21 - Carta Prevista

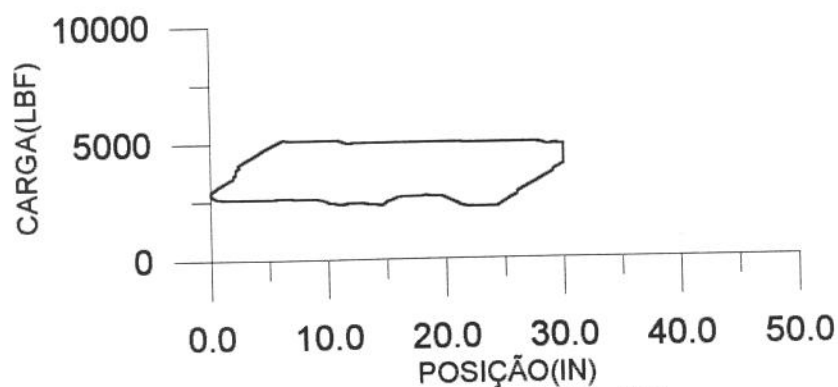


Fig. 6.51. Poço 22 - Carta Medida

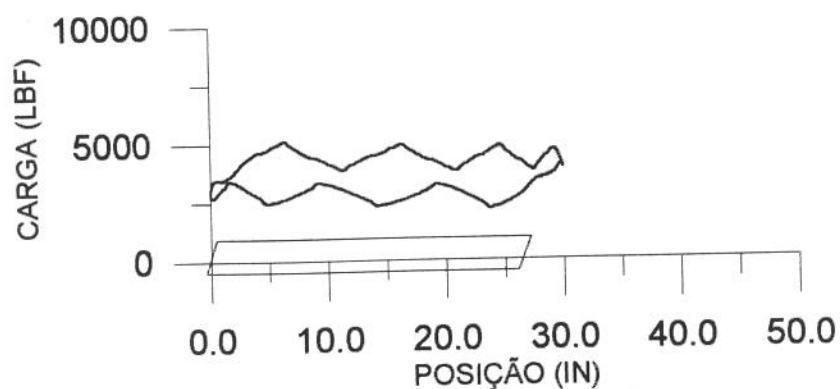


Fig. 6.52. Poço 22 - Carta Prevista

As oscilações de alta e baixa frequência podem ser reduzidas se aumentarmos o valor do fator de amortecimento adimensional (c_D). As oscilações de alta frequência também podem ser atenuadas se aumentarmos o valor do coeficiente de atrito (μ).

Como exemplo, vejamos o caso do poço 07. A Fig. 6.53 foi gerada pelo modelo 3D com $c_D = 0.25$ e $\mu = 0.05$. A Fig. 6.54 foi gerada pelo modelo 3D com $c_D = 0.05$ e $\mu = 0.25$. Já a Fig. 6.55 foi obtida pelo mesmo procedimento mas com $c_D = 0.25$ e $\mu = 0.25$. Comparando estas cartas vemos que o melhor resultado visual é obtido pelo aumento do coeficiente de amortecimento adimensional (c_D) na Fig. 6.53.

A Fig. 6.53 é uma melhor aproximação da forma da Fig. 6.31. A satisfação visual, porém, tem um preço. Ao utilizarmos um fator de amortecimento muito grande estamos introduzindo erros no cálculo dos parâmetros de projeto (com exceção do PRHP), o que pode implicar em aumento nos custos do sistema a ser projetado.

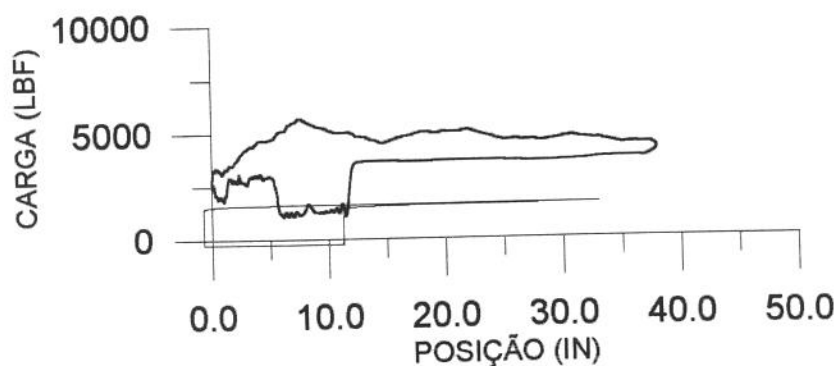


Fig. 6.53. Poço 07 - Carta Prevista com $c_D = 0.25$ e $\mu = 0.05$

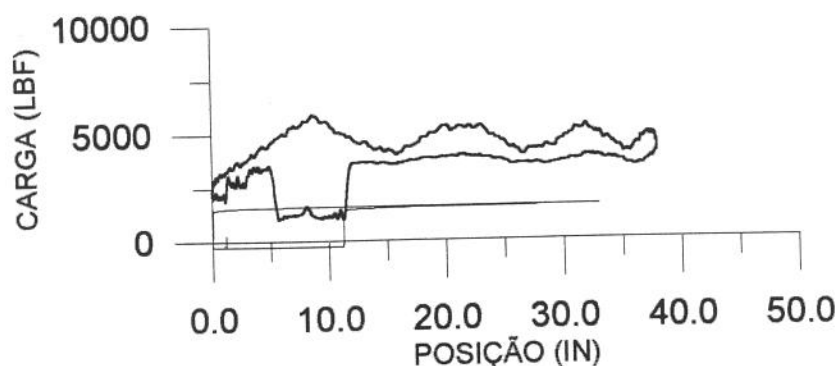


Fig. 6.54. Poço 07 - Carta Prevista com $c_D = 0.05$ e $\mu = 0.25$

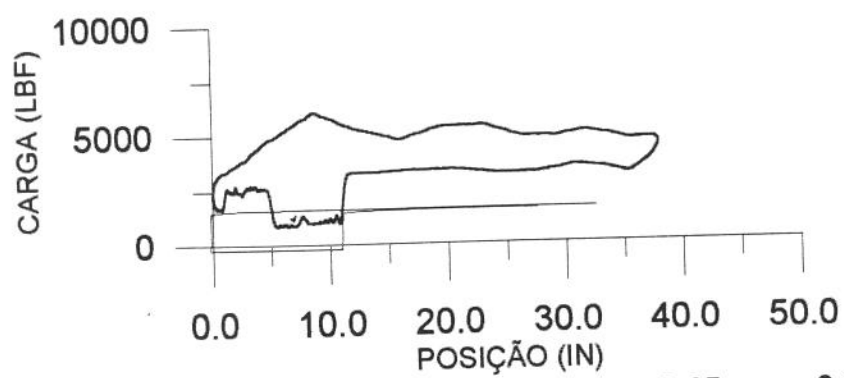


Fig. 6.55. Poço 07 - Carta Prevista com $c_D = 0.25$ e $\mu = 0.25$

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusões

O modelo proposto revelou-se o mais preciso quando comparado com uma amostra de 16 poços direcionais da Bacia Potiguar. Este modelo, no entanto, tem tempo de processamento consideravelmente superior aos demais.

O modelo 3D com atrito viscoso de Lea foi apenas um pouco melhor que o modelo 3D com atrito viscoso de Gibbs. Provavelmente, para poços com características semelhantes, o termo de atrito viscoso é pouco importante na presença do termo de atrito de Coulomb.

Entre os métodos de menor tempo de processamento, o método de Evchenko e Zakharchenko e o método de Alhanati, tiveram o melhor desempenho no cálculo dos parâmetros básicos de projeto da amostra.

Os métodos convencional, API, Gibbs (1963) e Lea modificado (1990), em geral, não apresentaram bons resultados quando comparados com os dados da amostra de campo.

O coeficiente de atrito de Coulomb mais adequado aos poços da amostra foi de 0.05.

O aumento do coeficiente de amortecimento adimensional não apresentou evidências de simular o atrito de Coulomb em poços direcionais, quando se utiliza os modelos para poço vertical.

O coeficiente de amortecimento adimensional utilizado no modelo 3D com atrito viscoso de Gibbs fica na faixa de 0.05 a 0.15. O extremo inferior fornece resultados um pouco mais precisos do PT e PPRL, porém, o extremo superior da

faixa tem a vantagem de fornecer cartas de superfície mais semelhantes às cartas medidas e valores mais precisos de PRHP.

Recomendações

O modelo proposto deve ter preferência para o cálculo dos parâmetros de projeto de poços direcionais na Bacia Potiguar. Com este modelo, a princípio, deve ser utilizado um coeficiente de atrito de 0.05 e, para o caso de se utilizar o termo de atrito viscoso de Gibbs, um fator de amortecimento adimensional de 0.10. Estes valores, no entanto, devem ser ajustados campo a campo, na medida das possibilidades.

Para análises rápidas de um número muito grande de opções, no entanto, o método API com as modificações propostas por Alhanati (1989) ou o método de Evchenko & Zakharchenko devem ser os preferidos, reduzindo-se, desta forma, o número de alternativas a serem verificadas com o modelo proposto. O método de Alhanati tem como principal vantagem o reduzido erro no cálculo do MPRL, importante variável na definição da viabilidade operacional do poço. Já o método de Evchenko & Zakharchenko apresentou bom desempenho no cálculo do PT e do PPRL, principais variáveis utilizadas nas comparações.

O modelo proposto tem como subproduto o cálculo das forças laterais atuando na coluna de hastes ao longo do poço, as quais, segundo Ko et al (1989), estão relacionadas diretamente com as taxas de desgaste das luvas. Recomendamos que isto seja verificado na prática, determinando-se cargas laterais máximas que resultem em taxas de falhas aceitáveis.

O modelo proposto deve ser utilizado ainda na fase do projeto direcional do poço, evitando-se trajetórias que venham trazer problemas operacionais futuros.

NOMENCLATURA

Variáveis Principais

A_i	Coeficientes de Fourier, adimensionais.
a_{max}	Aceleração máxima das hastes no método convencional, m/s^2 (ft/s^2).
A_p	Área do pistão, m^2 (in^2).
API	Grau API do óleo.
A_r	Área da seção transversal da haste, m^2 (in^2).
A_{r1}	Área da seção transversal da haste mais próxima à bomba, m^2 (in^2).
A_{rp}	Área da seção transversal da haste polida, m^2 (in^2).
A_t	Área da seção transversal, em aço, da tubulação, m^2 (in^2).
$\bar{B}(s)$	Vetor binormal unitário.
B_i	Coeficientes de Fourier, adimensionais.
B_g	Fator volume de formação do gás.
B_L	Fator volume de formação da fase líquida.
BSW	Percentual de água e sedimentos do fluido produzido, adimensional.
c	Fator de amortecimento, s^{-1} .
c_D	Coeficiente de amortecimento adimensional.
D_d	Profundidade medida do nível dinâmico, m (ft).
D_b	Profundidade medida de instalação da bomba de fundo, m (ft).
d_p	Diâmetro do pistão, m (in).
E_f	Empuxo na coluna de hastes devido ao fluido, N (lbf).
E_r	Módulo de elasticidade do material da haste, Pa (psi).
E_s	Eficiência de separação de gás no fundo, adimensional.
E_t	Módulo de elasticidade do material do tubo, Pa (psi).
e_m	Espaço morto da bomba de fundo, m (ft).
e_{ra}	Elongação da coluna de hastes devido a aceleração, m (ft).

e_{rf}	Elongação da coluna de hastes devido à carga de fluido, m (ft).
e_t	Elongação do tubing, m (ft).
F_{cs}	Função que define o efeito da força axial no atrito de Coulomb (modelo de Gibbs, 1992), m/s^2 (ft/s ²).
F_o	Carga no pistão devido ao peso do fluido, N (lbf).
F_s	Força axial na coluna de hastes, N (lbf).
F_{SV}	Carga na haste polida durante o teste da válvula de pé, N (lbf).
F_{TV}	Carga na haste polida durante o teste da válvula de passeio, N (lbf).
f_v	Força de atrito viscoso por unidade de comprimento, N/m (lbf/ft).
f_c	Força de atrito de Coulomb por unidade de comprimento, N/m (lbf).
f_L	Força lateral por unidade de comprimento, N/m (lbf/ft).
f_T	Fator de torque, m (ft).
f_{da}	Fator de distorção para o curso ascendente, adimensional.
f_{dd}	Fator de distorção para o curso descendente, adimensional.
f_{dT}	Fator de distorção do torque máximo, adimensional.
g	Aceleração da gravidade, m/s^2 (ft/s ²).
$g(s)$	Componente da aceleração da gravidade na direção tangencial (modelo de Gibbs, 1992), m/s^2 (ft/s ²).
g_T	Gradiente de temperatura, °C/m (°F/m)
h_b	Profundidade vertical de instalação da bomba de fundo, m (ft).
h_d	Profundidade vertical do nível dinâmico, m (ft).
h_k	Profundidade vertical da estação k, m (ft).
i_{anc}	Indicador da ancoragem da coluna de tubos, adimensional.
$\bar{K}$	Vetor curvatura.
k_L	Compressibilidade média da fase líquida, Pa ⁻¹ (psi ⁻¹)
L_b	Distância entre a válvula de passeio e a válvula de pé, m (ft).
L_k	Comprimento da seção k, m (ft).
L_m	Profundidade medida ao longo da trajetória do poço.
M	Momento máximo dos contrapesos, Nm (lbf).
$MPRL$	Carga mínima na haste polida, N (lbf).
$\vec{N}$	Vetor normal unitário.

N	Frequência de bombeamento, s^{-1} (cpm).
n	Número de seções da coluna de hastes.
n_k	Número de elementos no qual a seção k foi dividida.
n_p	Número de poços da amostra.
PD	Deslocamento volumétrico da bomba de fundo, m^3/dia .
$PPRL$	Carga máxima na haste polida, N (lbf).
$PRHP$	Potência requerida na haste polida, w (hp).
PT	Torque máximo no eixo do redutor, N.m (lbf.in).
p_b	Pressão no interior da bomba.
p_{cf}	Pressão no revestimento, medida na cabeça do poço, Pa (psi).
p_d	Pressão na descarga da bomba, Pa (psi).
p_s	Pressão na sucção da bomba, Pa (psi).
p_{wh}	Pressão no tubing medida na cabeça do poço, Pa (psi).
$Q(s)$	Função que caracteriza o efeito do peso da coluna de hastes na força de atrito de Coulomb (mod. Gibbs, 1992), m/s^2 (ft/s^2).
q_L	Vazão de líquidos na superfície, m^3/d (bbl/d).
$\bar{R}$	Vetor posição.
R	Razão gás/óleo de produção, m^3/m^3 (ft^3/bbl)
R_s	Razão de solubilidade do gás no óleo, m^3/m^3 (ft^3/bbl).
r	Posição radial, m (ft).
r_c	Raio de curvatura do poço, m (ft).
r_r	Raio da seção da haste, m (in).
r_t	Raio interno do tubing, m (in).
S	Curso da haste polida, m (in).
S_p	Curso do pistão, m (in).
s	Comprimento medido à partir da bomba, ao longo da coluna de tubos, m (ft).
$\bar{T}$	Vetor tangente unitário.
T_{cw}	Torque devido aos contrapesos, Nm (lbf.in)
T_N	Torque líquido no redutor, Nm (lbf.in)
T_w	Torque devido à carga na haste polida, Nm (lbf.in)

t	Tempo à partir do início do movimento, s.
U_r	Perímetro da seção circular das hastes, m (ft).
u	Deslocamento, a partir da posição inicial, de determinado ponto da coluna de hastes, m (ft).
$\bar{v}_f$	Velocidade média do fluido no anular haste/tubo, m/s (ft/s).
v_f	Velocidade local do fluido, m/s (ft/s).
v_r	Velocidade longitudinal da coluna de hastes, m/s (ft/s).
W_r	Peso da coluna de hastes no ar, N (lbf).
x	Coordenada na direção leste, a partir da bomba, m (ft).
y	Coordenada na direção norte, a partir da bomba, m (ft).
z	Coordenada vertical, a partir da bomba, m (ft).
α	Fração volumétrica de gás no interior da bomba de fundo
δ	Valor absoluto do erro relativo.
ε	Erro relativo no cálculo de uma variável.
ζ	Posição ocupada por um ponto arbitrário da coluna de hastes ao longo da trajetória do poço, m (ft).
η	Viscosidade do fluido, Pa.s (cp).
θ	Ângulo da manivela, graus.
μ	Coeficiente de atrito de Coulomb, adimensional.
v	Velocidade do som nas hastes, m/s (ft/s).
ξ_c	Valor calculado de uma variável.
ξ_m	Valor medido de uma variável.
ρ_f	Massa específica do fluido, kg/m ³ (lb/ft ³).
ρ_r	Massa específica das hastes, kg/m ³ (lb/ft ³).
τ	Tensão de cisalhamento, Pa (psi).
ϕ	Ângulo de inclinação, rad.
ψ	Ângulo de azimute relativo ao norte, rad.
ω	Velocidade angular, rad/s.

Subscritos

<i>A</i>	Curso ascendente.
<i>b</i>	No interior da bomba de fundo
<i>D</i>	Curso descendente
<i>d</i>	@ pressão e temperatura de descarga.
<i>i</i>	Índice de posição no esquema de diferenças finitas.
<i>k</i>	Índice da seção da coluna de hastes combinada.
<i>max</i>	Máximo.
<i>min</i>	Mínimo.
<i>s</i>	@ pressão e temperatura de sucção.

Sobrescritos

<i>j</i>	Índice de tempo no esquema de diferenças finitas.
----------	---

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alhanati, F.J.S. (1988). *Modelo de previsão de comportamento de bombeio mecânico*. Rio de Janeiro: Petrobrás.
- Alhanati, F.J.S. (1989). *Estimativa de parâmetros de funcionamento de sistemas de bombeio mecânico em poços desviados*. Rio de Janeiro: Petrobrás.
- American Petroleum Institute (1988). *Recommended practice for design calculations for sucker rod pumping systems* (4th Ed.). Dallas. (API RP 11L)
- 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.
- Bastian, M., Keating, J. & Jennings, J.W. (1990). A method to find the viscous damping coefficient and a faster diagnostic model. In: *Southwestern Petroleum Short Course*, 37, 255-271. Lubbock.
- Brown, K.E. (1980). *The technology of artificial lift methods*. Tulsa: Pennwell Publishing Company.
- Chacin, J.E. & Purcupile, J.C. (1987) *A new model for studying oilwell pumping installations*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 16918)
- Chacin, J.E. (1989). *A numerical approach of the diagnosis of sucker rod pumping installations and its verification with downhole pump field measurements*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 18829)
- Clegg, J.D., Bucaram, S.M. & Hein, N.W. (1992). *New recommendations and comparisons for artificial lift method selection*. Richardson, Tx.: Society of Petroleum Engineers. (SPE 24834)
- Doty, D. R., & Schmidt, Z. An improved model for sucker rod pumping. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1983, (2) 33-41.
- Evchenko, V.S. & Zakharchenko, N.P. (1984). Cálculo de cargas em poços inclinados quando da produção com bombas de fundo. *Neftyanoe Khozyaistvo*, 8, 34-37 (original em russo).
- Everitt, T.A. & Jennings, J.W. (1992). An improved finite-difference calculation of downhole dynamometer cards for sucker-rod pumps. *Production Engineer*, (2) 121-127.

- Frech Oil and Gas Industry Association (1990). *Directional drilling and deviation control technology*. Houston: Gulf Publishing Company.
- Gibbs, S. G. (1963). Predicting the behavior of sucker rod pumping systems. *Journal of Petroleum Technology*, (6), 769-778.
- Gibbs, S.G. (1977). *A general method for predicting rod pumping system performance*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 6850)
- Gibbs, S.G. (1992) Design and diagnosis of deviated rod-pumped wells. *Journal of Petroleum Technology*, (6), 774-781.
- Gibbs, S.G. (1994) *Assumptions of the API rod pumping design method as related to practical applications and wave equation techniques*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 27988)
- Jennings, J.W. (1989). *The design of sucker rod pump systems*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (NMT 890012)
- Ko, P.L., Humphreys, K. & Matthews, C. (1989). *Reciprocating-sliding wear of sucker rods and production tubing in deviated oil wells*. 7th Biannual Wear of Material International Conference, Denver.
- Laine, R.E., Cole, D.G. & Jennings, J.W. (1989). Harmonic polished rod motion. In: Milliken, J., et al. *Production technology*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 19724)
- Laine, R.E., Keating, J.F. & Jennings, J.W. (1990). Shallow sucker rod wells and fluid inertia. In: *Southwestern Petroleum Short Course*, 37, 316-340. Lubbock.
- Lea, J.F. (1990) *Modeling forces on a beam pump system when pumping highly viscous crude*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 20672)
- Lekia, S.D.L. (1989) *Composite models for combined rod and fluid dynamics in sucker-rod pumping well systems* (Tese de Doutorado). Norman: University of Oklahoma
- Lopes, D. et al. (1994) *Sistema computacional de bombeio mecânico*. Rio de Janeiro: Petrobrás.
- Lukaziewicz, S. A. (1991) *Dynamic behavior of the sucker rod string in the inclined well*. Richardson, Tx.: Society of Petroleum Engineers. (SPE 21665)
- Pavlick, N. (1981) *Modelo de vibração para o movimento de hastes em UB's e sua aplicação na análise de diagramas de dinamômetro*. (Tese de Doutorado). Clausthal: Universidade Técnica de Clausthal, (original em alemão).
- Presber, T.C. (1990). *Predicting rod wear in conventional and screw pump installations*. International Technical Meeting of CIM/SPE, Calgary.

- Schafer, D.J. & Jennings, J.W. (1987). *An investigation of analytical and numerical sucker rod pumping mathematical models*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 16919)
- Tripp, H.A. & Kilgore, J.J. (1990). *A comparison between predicted and measured walking beam pump parameters*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 20671)
- Xu, J. & Hu, Y.R. (1993). *A method for designing and predicting the sucker rod string in deviated pumping wells*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 26929).
- Xu, J. (1994) *A method for diagnosing the performance of sucker rod string in straight inclined wells*. Richardson: Society of Petroleum Engineers. (SPE 26970)

ANEXOS

ANEXO 1
O MÉTODO DO RAIO DE CURVATURA

Consideremos que se conhece as coordenadas de um ponto (x_i, y_i, z_i) , e se deseja calcular as coordenadas de um outro ponto $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$.

A distância ao longo da trajetória entre os dois pontos é dada por:

$$\Delta L_m = L_{mi+1} - L_{mi} \quad (A.1)$$

A projeção horizontal do comprimento de arco é dada por:

$$d = \frac{\Delta L_m}{\phi_{i+1} - \phi_i} (\cos \phi_i - \cos \phi_{i+1}) \quad (A.2)$$

enquanto que a projeção vertical por:

$$\Delta z = \frac{\Delta L_m}{\phi_{i+1} - \phi_i} (\sin \phi_{i+1} - \sin \phi_i) \quad (A.3)$$

As diferenças entre as coordenadas x e y são dadas por:

$$\Delta y = \frac{d}{\psi_{i+1} - \psi_i} (\sin \psi_{i+1} - \sin \psi_i) \quad (A.4)$$

$$\Delta x = \frac{d}{\psi_{i+1} - \psi_i} (\cos \psi_i - \cos \psi_{i+1}) \quad (A.5)$$

Finalmente as coordenadas do ponto desejado são:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x \quad (A.6)$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y \quad (A.7)$$

$$z_{i+1} = z_i + \Delta z \quad (A.8)$$

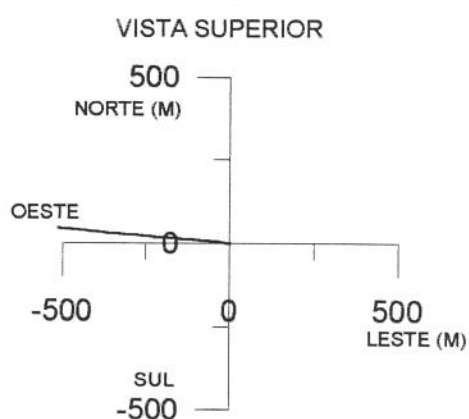
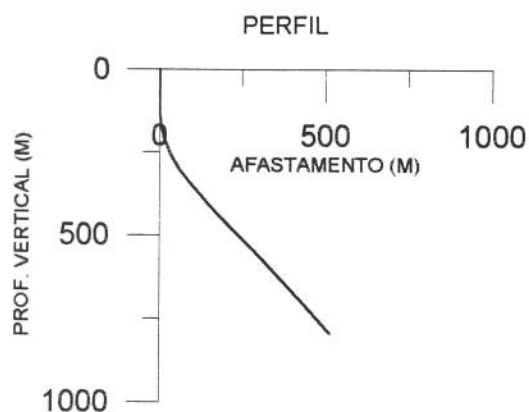
Nos métodos de cálculo para poços direcionais, muitas vezes necessita-se determinar as coordenadas de pontos onde não existem medições. Neste caso, os parâmetros ϕ e ψ do referido ponto são calculados por interpolação entre os valores medidos. Dai, os valores de x, y e z são obtidos pelo procedimento acima descrito.

ANEXO 2

TRAJETÓRIAS DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS

TRAJETÓRIA DO POÇO 01

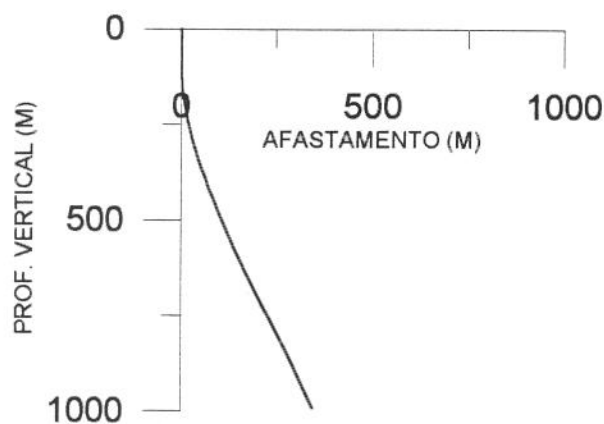
L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
117.00	0.75	168.00	117.00	-0.75	0.16
126.00	2.50	244.00	125.99	-0.96	0.06
134.00	3.75	267.00	133.98	-1.07	-0.36
143.00	5.25	264.00	142.95	-1.13	-1.07
152.00	7.00	266.00	151.90	-1.21	-2.02
161.00	8.75	273.00	160.82	-1.22	-3.26
170.00	10.00	278.00	169.70	-1.08	-4.72
178.00	11.50	281.00	177.55	-0.83	-6.19
187.00	13.25	282.00	186.35	-0.45	-8.08
196.00	14.75	282.00	195.08	0.00	-10.21
205.00	16.25	281.00	203.75	0.48	-12.56
214.00	18.00	283.00	212.35	1.03	-15.16
223.00	19.50	283.00	220.87	1.69	-17.97
231.00	21.25	282.00	228.37	2.29	-20.69
240.00	22.75	280.00	236.72	2.93	-24.00
249.00	24.50	280.00	244.96	3.56	-27.55
258.00	26.00	282.00	253.10	4.29	-31.32
267.00	27.75	283.00	261.13	5.17	-35.29
275.00	29.00	282.00	268.17	5.99	-39.01
284.00	30.00	279.00	276.00	6.80	-43.36
315.00	34.75	274.00	302.17	8.68	-59.85
363.00	41.25	272.00	339.98	10.22	-89.34
390.00	41.50	274.00	360.24	11.16	-107.16
447.00	43.25	274.00	402.35	13.84	-145.48
504.00	44.00	274.00	443.61	16.58	-184.71
560.00	45.00	275.00	483.55	19.66	-223.84
614.00	44.75	275.00	521.81	22.98	-261.80
691.00	43.75	274.00	576.97	27.20	-315.36
765.00	43.25	275.00	630.65	31.19	-366.15
839.00	42.75	276.00	684.76	36.03	-416.38
971.00	42.25	276.00	782.09	45.35	-505.07
984.00	42.25	276.00	791.71	46.27	-513.76



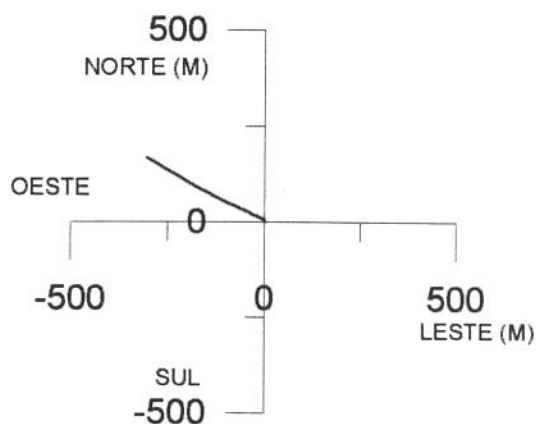
TRAJETÓRIA DO POÇO 02

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
119.00	2.25	19.00	118.97	2.21	0.76
129.00	3.00	349.00	128.96	2.66	0.79
138.00	3.75	334.00	137.94	3.16	0.62
146.00	5.50	331.00	145.92	3.73	0.33
156.00	7.00	326.00	155.86	4.66	-0.24
165.00	8.25	318.00	164.78	5.60	-0.98
175.00	9.00	308.00	174.66	6.62	-2.07
189.00	9.50	297.00	188.48	7.83	-3.97
216.00	10.50	296.00	215.07	9.92	-8.16
244.00	12.00	295.00	242.53	12.27	-13.09
273.00	14.00	295.00	270.79	15.03	-19.00
311.00	16.50	295.00	307.45	19.25	-28.06
339.00	18.00	295.50	334.19	22.80	-35.57
367.00	21.00	295.50	360.58	26.82	-44.01
398.00	21.25	295.00	389.49	31.59	-54.11
427.00	21.25	295.00	416.52	36.03	-63.64
455.00	23.00	295.00	442.46	40.48	-73.19
501.00	23.00	295.00	484.80	48.08	-89.48
548.00	24.25	296.00	527.86	56.19	-106.48
575.00	24.75	297.00	552.43	61.18	-116.50
607.00	24.25	297.00	581.55	67.21	-128.33
655.00	25.50	297.00	625.09	76.38	-146.32
702.00	26.50	298.00	667.34	85.89	-164.59
749.00	28.00	300.00	709.12	96.32	-183.41
800.00	28.00	300.00	754.15	108.29	-204.15
857.00	27.00	300.00	804.71	121.45	-226.94
953.00	26.50	301.00	890.44	143.38	-264.17
1047.00	23.50	302.00	975.62	164.14	-298.04
1064.00	23.50	302.00	991.21	167.73	-303.79

PERFIL



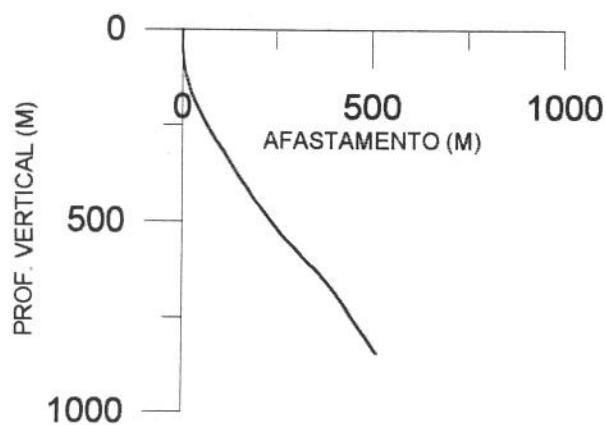
VISTA SUPERIOR



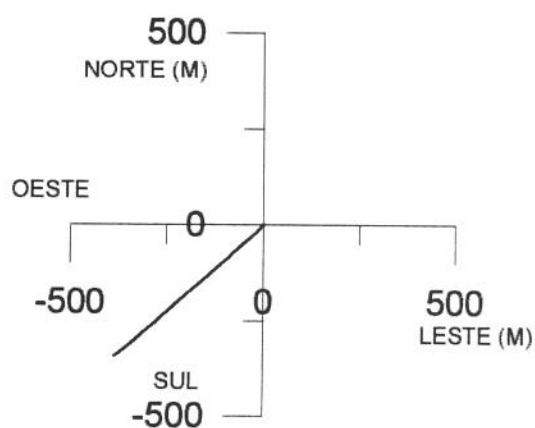
TRAJETÓRIA DO POÇO 03

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.00	0.00	180.00	28.00	0.00	0.00
37.00	2.00	208.00	37.00	-0.14	-0.07
46.00	2.50	221.00	45.99	-0.43	-0.27
55.00	3.25	233.00	54.98	-0.74	-0.60
65.00	4.00	223.00	64.96	-1.16	-1.07
73.00	5.00	226.00	72.93	-1.61	-1.51
78.00	6.50	225.00	77.91	-1.96	-1.87
90.00	8.00	226.00	89.81	-3.02	-2.95
100.00	9.25	224.00	99.70	-4.08	-4.01
109.00	10.75	227.00	108.56	-5.17	-5.12
117.00	12.75	227.00	116.39	-6.29	-6.32
126.00	14.50	226.00	125.14	-7.75	-7.85
135.00	16.00	226.00	133.82	-9.39	-9.56
144.00	16.75	217.00	142.46	-11.29	-11.24
152.00	18.50	217.00	150.08	-13.22	-12.69
161.00	20.00	220.00	158.58	-15.54	-14.54
170.00	21.00	223.00	167.01	-17.90	-16.63
200.00	25.00	228.00	194.62	-26.12	-24.99
235.00	28.00	227.00	225.94	-36.67	-36.50
253.00	30.00	229.00	241.68	-42.50	-42.98
280.00	33.00	229.00	264.70	-51.76	-53.63
308.00	33.00	229.00	288.18	-61.76	-65.14
337.00	33.00	229.00	312.50	-72.13	-77.06
370.00	33.25	227.00	340.14	-84.19	-90.46
418.00	32.50	227.00	380.45	-101.96	-109.51
448.00	33.50	229.00	405.61	-112.89	-121.66
484.00	35.00	229.00	435.37	-126.19	-136.95
532.00	38.00	229.00	473.95	-144.92	-158.49
579.00	40.00	228.00	510.47	-164.51	-180.64
626.00	43.00	229.00	545.67	-185.15	-203.97
657.00	44.00	228.00	568.16	-199.29	-219.95
705.00	45.00	228.00	602.39	-221.80	-244.95
742.00	44.50	227.00	628.67	-239.40	-264.15
769.00	41.75	228.00	648.37	-251.86	-277.76
816.00	36.00	228.00	684.95	-271.59	-299.67
890.00	33.00	230.00	745.93	-299.09	-331.30
1001.00	36.00	232.00	837.39	-338.65	-380.15
1009.00	36.00	232.00	843.86	-341.54	-383.86

PERFIL



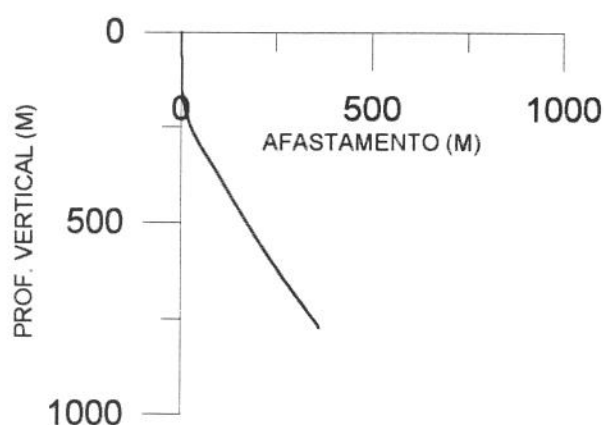
VISTA SUPERIOR



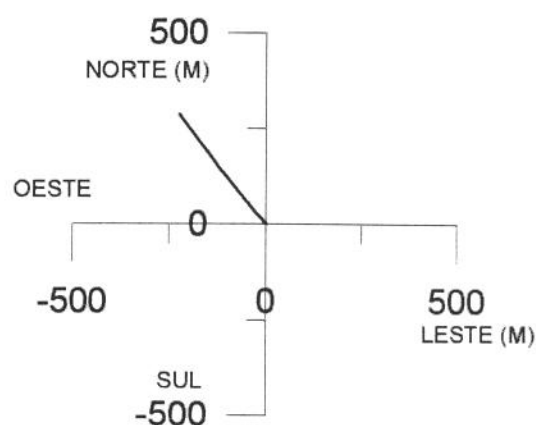
TRAJETÓRIA DO POÇO 04

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
126.00	1.25	348.00	125.99	1.34	-0.29
135.00	2.25	321.00	134.99	1.59	-0.40
144.00	3.50	321.00	143.97	1.94	-0.69
153.00	5.00	318.00	152.95	2.45	-1.12
161.00	6.50	316.00	160.91	3.03	-1.67
170.00	8.00	318.00	169.84	3.86	-2.44
179.00	9.00	323.00	178.74	4.89	-3.29
187.00	10.75	323.00	186.62	5.99	-4.11
196.00	12.50	323.00	195.43	7.44	-5.20
205.00	14.25	324.00	204.19	9.11	-6.44
214.00	15.75	322.00	212.88	10.97	-7.84
223.00	17.00	319.00	221.52	12.93	-9.46
231.00	18.75	316.00	229.13	14.74	-11.12
240.00	20.50	315.00	237.61	16.89	-13.24
249.00	22.25	315.00	245.99	19.21	-15.55
258.00	23.75	315.00	254.27	21.70	-18.04
266.00	25.50	317.00	261.54	24.10	-20.36
275.00	26.75	318.00	269.62	27.02	-23.03
284.00	28.50	320.00	277.60	30.17	-25.77
292.00	30.25	320.00	284.57	33.17	-28.29
333.00	31.25	321.00	319.80	49.35	-41.63
379.00	31.25	321.00	359.13	67.89	-56.65
426.00	30.75	320.00	399.42	86.57	-72.04
474.00	30.25	322.00	440.77	105.50	-87.37
526.00	31.25	321.00	485.46	126.31	-103.92
584.00	32.75	324.00	534.65	150.69	-122.63
640.00	34.75	323.00	581.21	175.70	-141.14
709.00	35.75	323.00	637.55	207.50	-165.10
784.00	36.00	323.00	698.33	242.60	-191.55
866.00	36.75	324.00	764.35	281.69	-220.48
877.00	36.75	324.00	773.16	287.02	-224.35

PERFIL

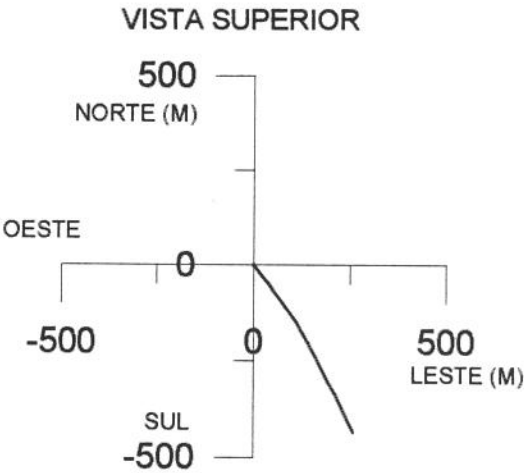
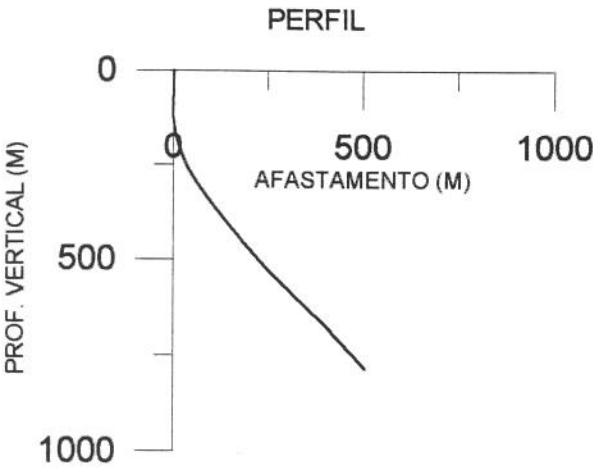


VISTA SUPERIOR



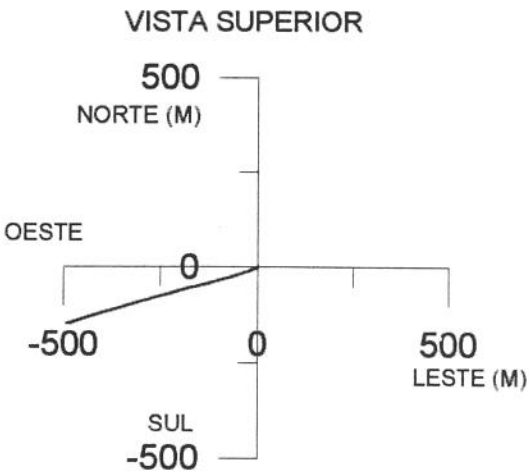
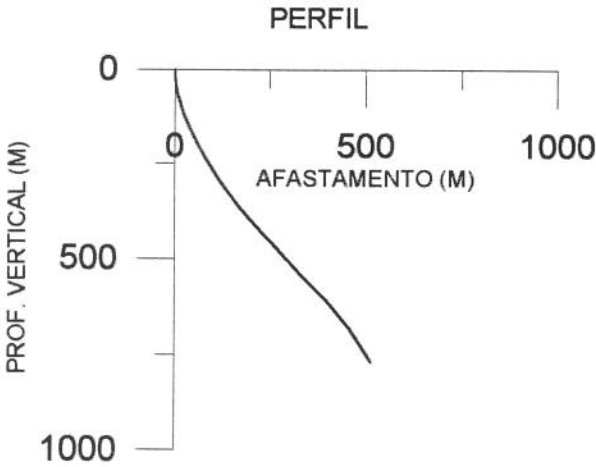
TRAJETÓRIA DO POÇO 05

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.00	0.50	20.00	25.00	0.10	0.04
55.00	1.00	309.00	55.00	0.46	-0.06
85.00	1.50	289.00	84.99	0.77	-0.63
115.00	2.00	152.00	114.98	0.23	-1.09
145.00	8.00	136.00	144.85	-1.88	0.44
175.00	13.50	137.00	174.31	-5.93	4.29
205.00	19.00	138.00	203.10	-12.12	9.96
235.00	22.50	147.00	231.15	-20.54	16.42
265.00	27.00	143.00	258.39	-30.83	23.62
295.00	32.00	140.00	284.49	-42.38	32.81
325.00	37.00	144.00	309.21	-55.77	43.27
355.00	37.75	144.00	333.05	-70.50	53.97
402.00	38.25	145.00	370.08	-94.06	70.78
449.00	39.00	145.00	406.80	-118.09	87.60
496.00	39.75	144.00	443.13	-142.36	104.92
510.00	40.25	147.00	453.86	-149.78	110.01
552.00	41.75	152.00	485.55	-173.51	123.99
599.00	43.25	153.00	520.20	-201.67	138.66
655.00	45.50	151.00	560.23	-236.25	157.04
693.00	47.25	153.00	586.44	-260.54	169.95
750.00	46.75	152.00	625.32	-297.51	189.20
807.00	45.25	152.00	664.91	-333.71	208.45
873.00	43.75	154.00	711.99	-374.93	229.45
955.00	43.00	156.00	771.59	-425.96	253.25
972.00	43.00	156.00	784.02	-436.56	257.96



TRAJETÓRIA DO POÇO 06

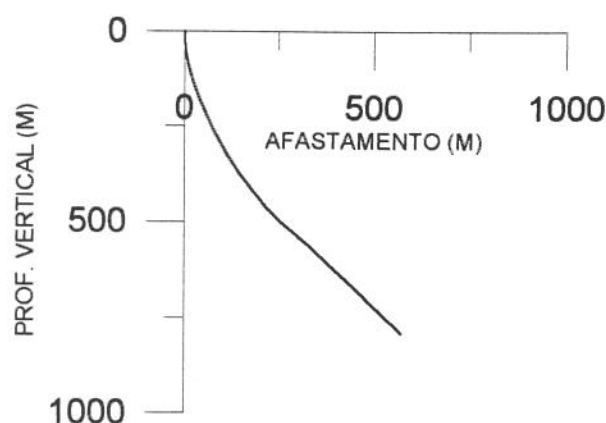
L _m (M)	φ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.00	2.75	237.00	18.99	-0.25	-0.38
37.00	7.25	235.00	36.92	-1.13	-1.68
46.00	9.75	234.00	45.82	-1.90	-2.77
55.00	11.25	241.00	54.67	-2.78	-4.15
65.00	13.75	244.00	64.43	-3.78	-6.07
74.00	15.75	248.00	73.13	-4.71	-8.16
83.00	17.00	245.00	81.77	-5.72	-10.49
123.00	21.50	252.00	119.52	-10.55	-22.75
178.00	25.00	253.00	170.05	-17.08	-43.45
242.00	29.00	254.00	227.06	-25.33	-71.30
307.00	33.50	255.00	282.62	-34.34	-103.79
345.00	36.50	254.00	313.74	-40.16	-124.79
402.00	39.25	256.00	358.73	-49.22	-158.58
450.00	42.00	256.00	395.16	-56.78	-188.91
500.00	43.00	254.00	432.02	-65.52	-221.53
510.00	44.00	254.00	439.27	-67.42	-228.15
519.00	43.00	253.00	445.80	-69.18	-234.09
529.00	42.00	251.00	453.17	-71.26	-240.51
588.00	43.00	254.00	496.67	-83.25	-278.52
655.00	43.00	254.00	545.67	-95.84	-322.45
738.00	45.00	254.00	605.37	-111.73	-377.87
833.00	36.50	253.00	677.28	-129.33	-437.27
935.00	28.00	252.00	763.46	-145.68	-489.13
942.00	28.00	252.00	769.64	-146.70	-492.26



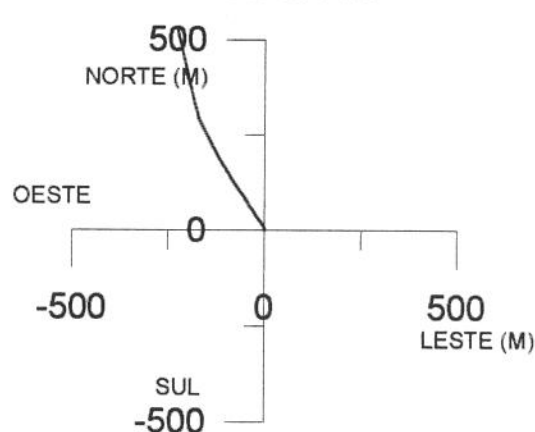
TRAJETÓRIA DO POÇO 07

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.00	4.25	18.00	27.97	0.99	0.32
37.00	6.25	22.00	36.94	1.76	0.60
46.00	7.50	4.00	45.87	2.81	0.84
55.00	9.00	353.00	54.78	4.10	0.81
64.00	11.00	350.00	63.64	5.64	0.58
73.00	13.00	342.00	72.44	7.45	0.13
83.00	13.25	332.00	82.18	9.54	-0.76
92.00	15.25	330.00	90.90	11.48	-1.83
128.00	18.00	324.00	125.40	20.11	-7.44
155.00	20.00	324.00	150.92	27.22	-12.61
193.00	22.25	325.00	186.37	38.37	-20.56
231.00	24.25	327.00	221.28	50.81	-28.95
269.00	26.50	328.00	255.61	64.54	-37.69
307.00	30.00	328.00	289.08	79.79	-47.22
343.00	32.00	324.00	319.94	95.16	-57.59
396.00	35.50	327.00	364.00	119.42	-74.26
434.00	37.50	328.00	394.54	138.48	-86.41
468.00	40.50	326.00	420.96	156.42	-98.06
494.00	40.00	329.00	440.81	170.59	-107.08
524.00	42.00	332.00	463.45	187.72	-116.77
572.00	47.00	332.00	497.67	217.41	-132.56
619.00	52.00	332.00	528.19	248.96	-149.34
653.00	50.00	334.00	549.58	272.50	-161.33
663.00	49.50	337.00	556.04	279.44	-164.50
672.00	48.50	338.00	561.95	285.72	-167.10
691.00	46.50	342.00	574.78	298.88	-171.89
742.00	46.50	347.00	609.89	334.52	-181.77
837.00	50.00	348.00	673.14	403.70	-197.11
1000.00	43.50	345.00	784.76	519.07	-224.80
1009.00	43.50	345.00	791.29	525.05	-226.41

PERFIL

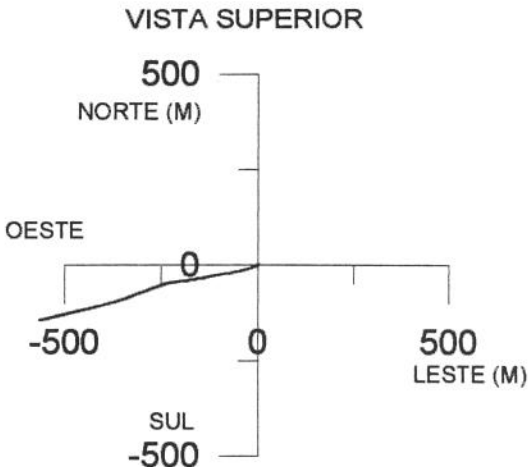
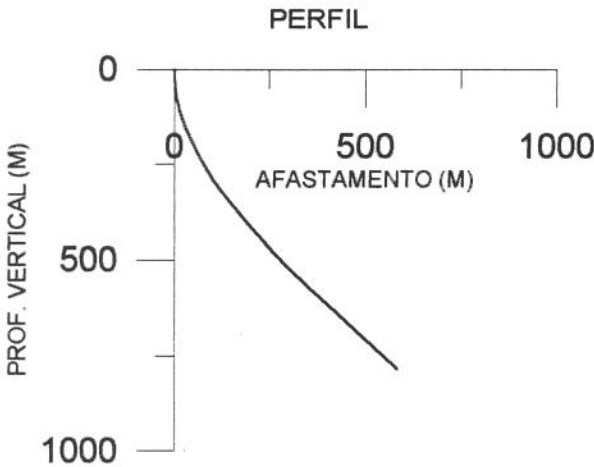


VISTA SUPERIOR



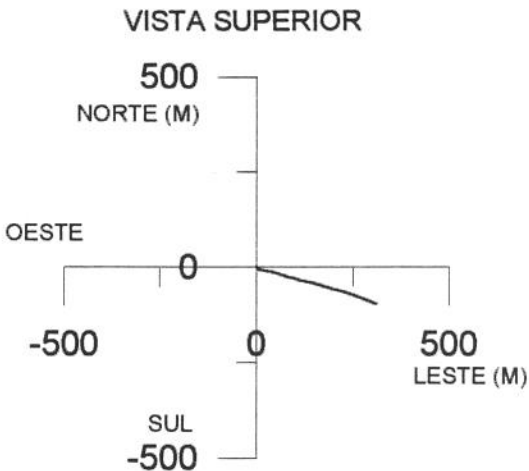
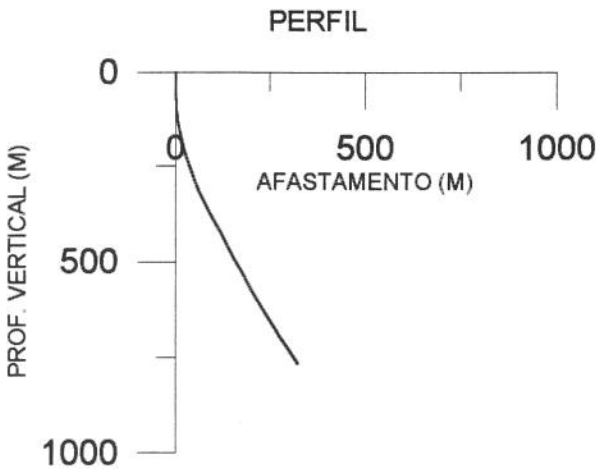
TRAJETÓRIA DO POÇO 08

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.00	3.25	265.00	27.98	-0.07	-0.79
38.00	5.00	258.00	37.96	-0.18	-1.50
47.00	6.25	247.00	46.92	-0.44	-2.34
56.00	7.50	244.00	55.85	-0.89	-3.32
74.00	10.25	244.00	73.63	-2.10	-5.82
83.00	12.25	243.00	82.46	-2.89	-7.39
92.00	14.00	245.00	91.22	-3.78	-9.23
102.00	15.00	245.00	100.91	-4.84	-11.49
111.00	16.25	248.00	109.57	-5.81	-13.72
120.00	17.75	251.00	118.18	-6.73	-16.18
156.00	21.75	256.00	152.05	-10.18	-27.84
202.00	25.00	256.00	194.27	-14.60	-45.55
257.00	29.75	259.00	243.10	-20.07	-70.23
314.00	34.25	259.00	291.43	-25.83	-99.87
381.00	40.00	258.00	344.82	-33.89	-139.48
418.00	40.00	263.00	373.17	-37.81	-162.93
447.00	41.00	263.00	395.22	-40.11	-181.62
475.00	42.25	264.00	416.15	-42.21	-200.10
494.00	42.50	261.00	430.19	-43.89	-212.79
504.00	41.25	259.00	437.63	-45.04	-219.37
514.00	42.00	257.00	445.11	-46.43	-225.86
560.00	42.25	250.00	479.22	-55.18	-255.43
616.00	45.00	249.00	519.76	-68.71	-291.61
691.00	47.50	252.00	571.62	-86.79	-342.67
729.00	48.50	252.00	597.04	-95.52	-369.53
823.00	47.25	256.00	660.09	-114.73	-436.53
917.00	46.25	258.00	724.50	-130.13	-503.24
999.00	47.00	258.00	780.81	-142.53	-561.54
1005.00	47.00	258.00	784.90	-143.44	-565.83



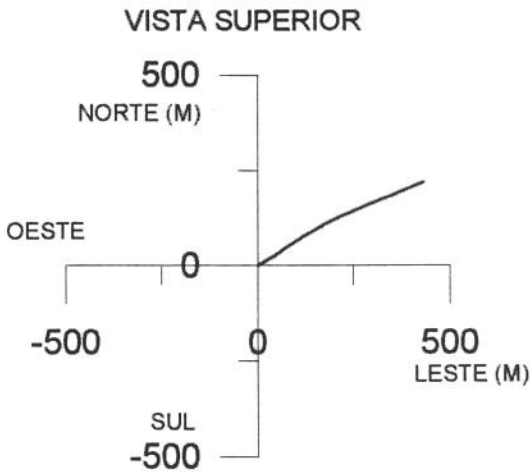
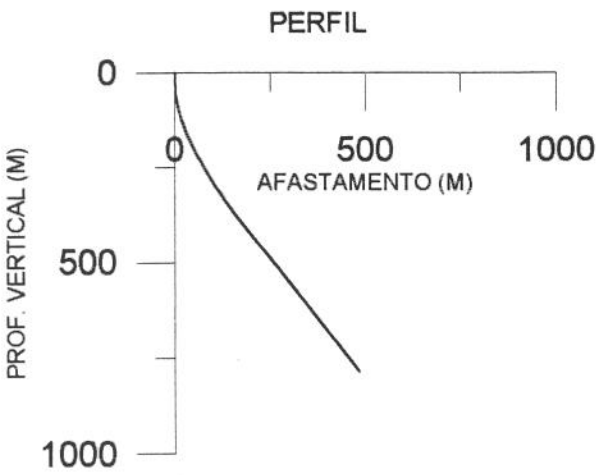
TRAJETÓRIA DO POÇO 09

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42.00	0.00	153.00	42.00	0.00	0.00
61.00	2.25	153.00	61.00	-0.33	0.17
80.00	4.00	133.00	79.97	-1.16	0.79
102.00	5.00	133.00	101.90	-2.33	2.05
111.00	6.00	132.00	110.86	-2.92	2.69
120.00	7.00	127.00	119.80	-3.56	3.47
129.00	7.00	120.00	128.73	-4.17	4.39
138.00	9.00	117.00	137.64	-4.77	5.49
147.00	10.50	117.00	146.51	-5.46	6.85
156.00	11.75	112.00	155.34	-6.18	8.43
165.00	12.50	107.00	164.14	-6.81	10.21
201.00	15.50	101.00	199.07	-8.91	18.65
237.00	18.00	102.00	233.54	-10.98	28.82
282.00	21.00	104.00	275.95	-14.36	43.45
329.00	24.50	105.00	319.29	-18.91	61.05
376.00	29.00	108.00	361.25	-24.92	81.32
424.00	28.50	103.00	403.33	-31.08	103.56
442.00	28.00	104.00	419.19	-33.07	111.85
480.00	28.00	105.00	452.74	-37.54	129.12
527.00	28.75	105.00	494.09	-43.32	150.69
574.00	29.25	105.00	535.20	-49.22	172.70
621.00	30.25	107.00	576.00	-55.65	195.12
686.00	32.00	107.00	631.64	-65.47	227.25
762.00	33.00	110.00	695.74	-78.43	265.97
836.00	33.75	112.00	757.54	-93.01	303.97
846.00	33.75	112.00	765.85	-95.09	309.12



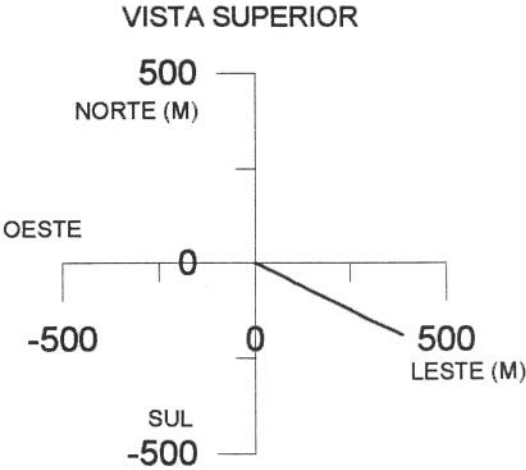
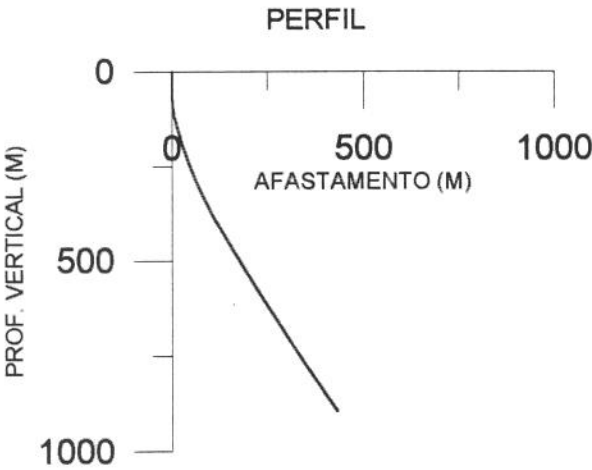
TRAJETÓRIA DO POÇO 10

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.00	2.50	68.00	26.99	0.22	0.55
36.00	4.00	71.00	35.98	0.40	1.02
45.00	5.50	65.00	44.95	0.68	1.71
54.00	7.00	56.00	53.89	1.16	2.57
63.00	8.50	54.00	62.81	1.86	3.56
72.00	10.25	61.00	71.69	2.64	4.80
81.00	12.00	57.00	80.52	3.54	6.28
118.00	17.00	58.00	116.33	8.51	14.09
163.00	21.00	60.00	158.87	16.06	26.65
216.00	27.75	63.00	207.12	26.49	45.86
225.00	28.00	53.00	215.07	28.71	49.42
245.00	28.75	54.00	232.67	34.37	57.06
265.00	29.75	55.00	250.12	40.04	65.02
285.00	31.50	55.00	267.33	45.89	73.36
305.00	32.75	54.00	284.27	52.06	82.02
325.00	32.75	56.00	301.09	58.27	90.88
345.00	33.75	57.00	317.81	64.32	100.03
365.00	34.75	57.00	334.34	70.45	109.47
385.00	36.00	58.00	350.65	76.67	119.23
405.00	37.00	58.00	366.73	82.97	129.32
481.00	39.00	62.00	426.61	106.36	169.83
557.00	38.75	65.00	485.78	127.64	212.52
613.00	39.00	65.00	529.38	142.50	244.37
726.00	38.00	71.00	617.81	168.84	309.56
796.00	38.00	67.00	672.97	184.28	349.79
924.00	38.00	68.00	773.83	214.44	422.59
939.00	38.00	68.00	785.65	217.89	431.15
940.00	38.00	68.00	786.44	218.13	431.72



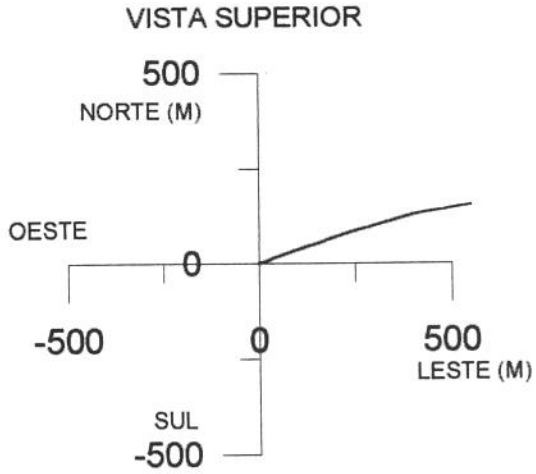
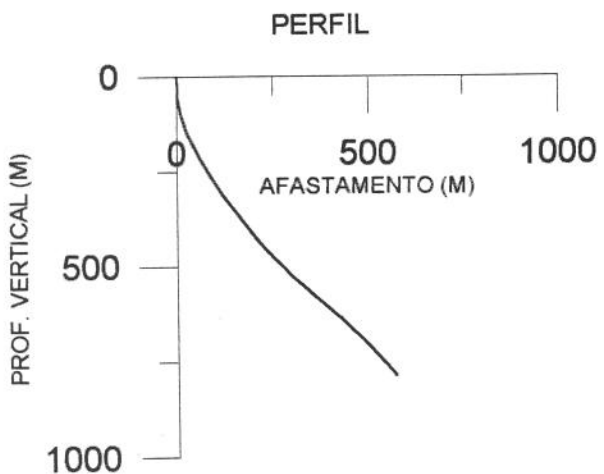
TRAJETÓRIA DO POÇO 11

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55.00	0.00	123.00	55.00	0.00	0.00
73.00	3.25	123.00	72.99	-0.28	0.43
83.00	5.00	124.00	82.96	-0.67	1.03
92.00	6.75	116.00	91.92	-1.14	1.82
101.00	8.50	106.00	100.84	-1.56	2.94
110.00	9.50	105.00	109.73	-1.94	4.30
119.00	11.25	98.00	118.58	-2.26	5.88
128.00	13.00	116.00	127.38	-2.81	7.68
137.00	15.00	111.00	136.11	-3.68	9.68
187.00	18.00	117.00	184.04	-9.45	22.64
245.00	20.00	116.00	238.88	-17.88	39.54
292.00	23.00	116.00	282.61	-25.43	55.02
358.00	26.00	118.00	342.66	-37.85	79.40
414.00	29.00	119.00	392.32	-50.19	102.13
457.00	31.00	118.00	429.56	-60.45	121.02
506.00	30.00	115.00	471.78	-71.54	143.27
552.00	31.00	115.00	511.41	-81.41	164.43
627.00	32.00	116.00	575.36	-98.28	199.80
703.00	32.25	117.00	639.72	-116.31	235.97
823.00	33.00	118.00	740.79	-146.18	293.35
995.00	34.00	112.00	884.22	-186.29	379.35
1009.00	34.00	112.00	895.82	-189.22	386.61



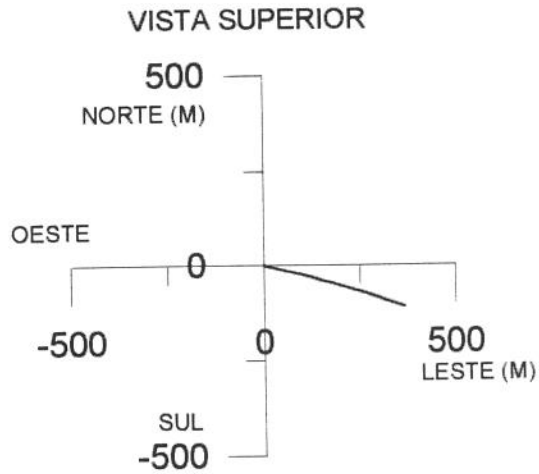
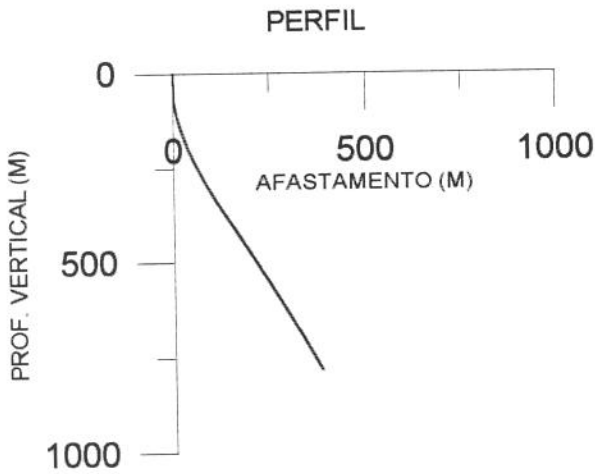
TRAJETÓRIA DO POÇO 12

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37.00	3.75	55.00	36.97	0.69	0.99
46.00	5.50	50.00	45.94	1.14	1.57
55.00	7.00	50.00	54.89	1.77	2.32
64.00	8.25	63.00	63.81	2.42	3.31
73.00	9.50	72.00	72.70	2.95	4.59
82.00	11.00	73.00	81.56	3.44	6.12
91.00	12.75	74.00	90.37	3.96	7.90
100.00	14.75	78.00	99.11	4.48	9.97
109.00	16.25	78.00	107.78	4.98	12.32
118.00	18.00	73.00	116.38	5.64	14.89
127.00	19.00	69.00	124.92	6.57	17.59
136.00	20.25	68.00	133.39	7.68	20.40
145.00	22.25	69.00	141.78	8.88	23.43
153.00	24.00	69.00	149.14	10.00	26.37
162.00	25.25	69.00	157.32	11.34	29.87
215.00	27.75	68.00	204.75	20.01	51.87
267.00	29.75	70.00	250.33	28.97	75.22
339.00	35.25	72.00	311.03	41.56	111.78
415.00	36.25	73.00	372.71	54.91	154.13
467.00	39.00	71.00	413.89	64.72	184.31
514.00	42.25	74.00	449.56	73.92	213.49
571.00	44.75	73.00	490.90	85.07	251.11
627.00	46.00	75.00	530.24	96.05	289.42
660.00	49.00	73.00	552.53	102.76	312.80
700.00	50.00	73.00	578.51	111.65	341.89
792.00	47.25	77.00	639.32	129.51	408.55
895.00	45.00	83.00	710.70	142.40	481.63
980.00	41.50	78.00	772.60	152.01	539.05
998.00	41.50	78.00	786.08	154.49	550.71



TRAJETÓRIA DO POÇO 13

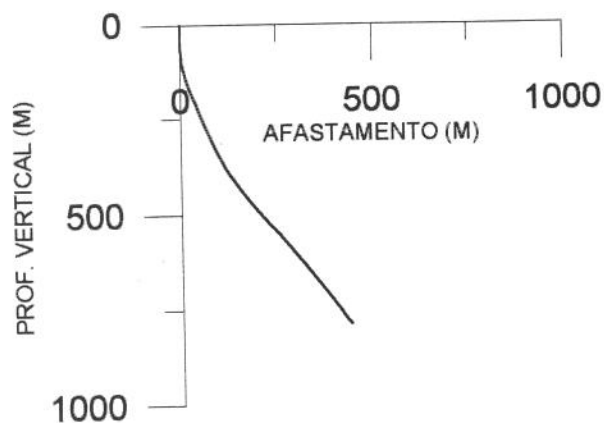
L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
56.00	3.00	124.00	55.97	-0.82	1.22
65.00	4.75	113.00	64.95	-1.11	1.75
74.00	6.50	111.00	73.91	-1.44	2.57
83.00	8.00	108.00	82.84	-1.82	3.64
92.00	10.00	103.00	91.73	-2.20	4.99
100.00	11.75	103.00	99.58	-2.53	6.46
109.00	13.00	108.00	108.37	-3.05	8.32
118.00	14.00	107.00	117.12	-3.68	10.33
127.00	15.50	106.00	125.83	-4.33	12.52
136.00	17.25	105.00	134.46	-5.01	14.97
145.00	19.00	104.00	143.01	-5.71	17.68
202.00	22.00	103.00	196.40	-10.37	37.09
255.00	25.25	103.00	244.95	-15.15	57.78
309.00	29.00	104.00	293.00	-20.89	81.71
364.00	32.50	104.00	340.26	-27.70	109.00
398.00	33.25	106.00	368.82	-32.47	126.82
435.00	32.75	106.00	399.85	-38.03	146.19
510.00	32.50	107.00	463.01	-49.51	184.96
605.00	32.00	108.00	543.36	-64.75	233.31
682.00	31.50	108.00	608.83	-77.28	271.84
782.00	30.00	108.00	694.77	-93.07	320.47
870.00	28.75	111.00	771.46	-107.48	361.15
883.00	28.75	111.00	782.85	-109.72	366.99



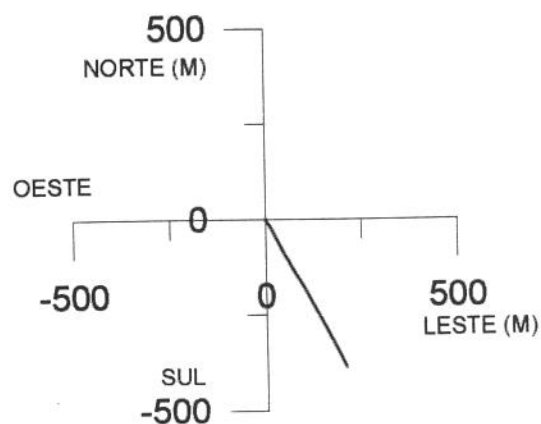
TRAJETÓRIA DO POÇO 14

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
47.00	0.25	261.00	47.00	-0.02	-0.10
56.00	2.00	133.00	56.00	-0.15	-0.14
65.00	3.50	139.00	64.99	-0.46	0.16
74.00	5.00	150.00	73.96	-1.00	0.54
82.00	6.25	161.00	81.92	-1.72	0.87
91.00	7.75	149.00	90.86	-2.71	1.33
100.00	9.25	149.00	99.76	-3.85	2.02
109.00	10.75	154.00	108.62	-5.22	2.76
118.00	12.50	153.00	117.43	-6.85	3.57
127.00	14.00	148.00	126.20	-8.64	4.59
135.00	15.75	146.00	133.93	-10.36	5.70
144.00	17.25	144.00	142.56	-12.46	7.17
182.00	20.00	152.00	178.56	-22.74	13.60
217.00	21.00	153.00	211.35	-33.61	19.26
252.00	22.00	151.00	243.91	-44.94	25.28
279.00	23.75	154.00	268.78	-54.24	30.12
316.00	24.75	153.00	302.52	-67.84	36.90
354.00	25.75	152.00	336.89	-82.22	44.39
383.00	27.50	150.00	362.81	-93.59	50.69
389.00	29.00	148.00	368.10	-96.02	52.15
398.00	30.00	150.00	375.93	-99.82	54.43
408.00	31.00	151.00	384.55	-104.24	56.93
417.00	32.50	153.00	392.20	-108.42	59.16
457.00	36.25	151.00	425.21	-128.36	69.76
494.00	39.00	149.00	454.51	-147.91	81.05
540.00	41.50	151.00	489.62	-173.65	95.91
586.00	42.00	152.00	523.93	-200.57	110.52
624.00	40.75	152.00	552.45	-222.75	122.31
720.00	38.50	152.00	626.39	-276.80	151.06
785.00	37.75	153.00	677.52	-312.40	169.59
852.00	36.25	153.00	731.03	-348.32	187.89
907.00	37.25	153.00	775.09	-377.64	202.83
925.00	37.25	153.00	789.42	-387.35	207.78

PERFIL

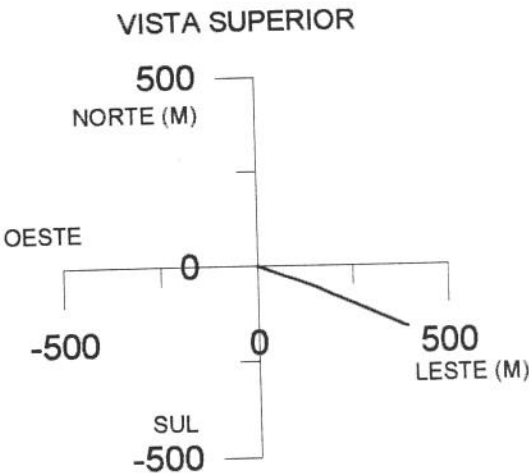
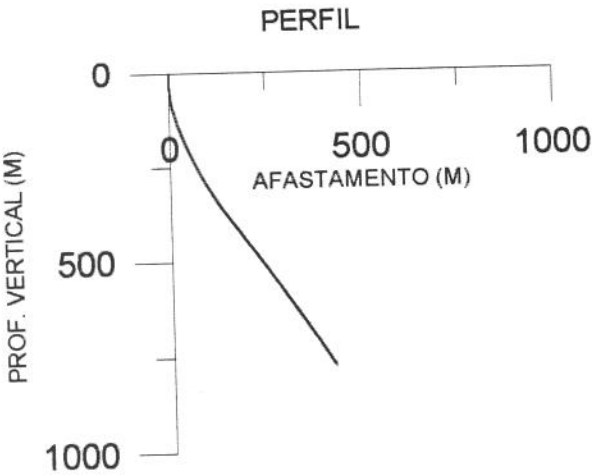


VISTA SUPERIOR



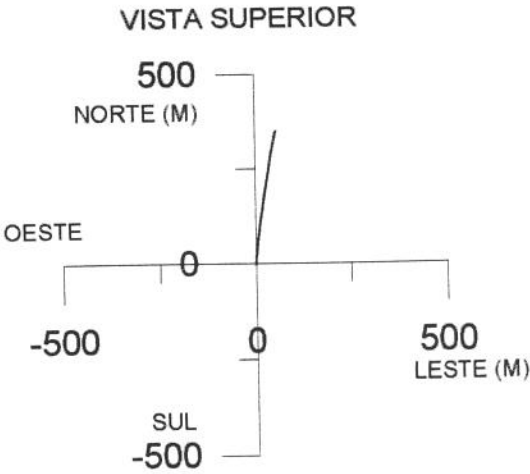
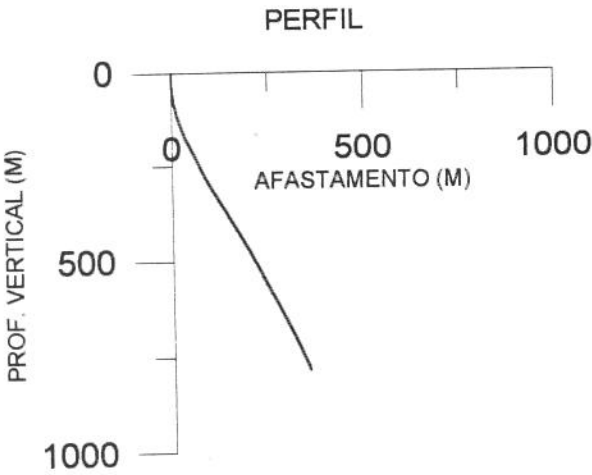
TRAJETÓRIA DO POÇO 15

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.00	1.50	103.00	28.00	-0.08	0.36
37.00	3.25	118.00	36.99	-0.21	0.71
45.00	4.00	118.00	44.97	-0.45	1.15
53.00	6.25	118.00	52.94	-0.79	1.78
62.00	7.50	116.00	61.88	-1.27	2.74
71.00	8.75	108.00	70.78	-1.75	3.92
80.00	10.50	103.00	79.66	-2.15	5.37
89.00	12.25	104.00	88.48	-2.57	7.10
98.00	13.25	110.00	97.26	-3.15	9.00
107.00	14.75	112.00	105.99	-3.93	11.03
116.00	16.25	114.00	114.66	-4.87	13.24
125.00	18.00	116.00	123.26	-5.99	15.64
134.00	19.50	114.00	131.79	-7.21	18.26
183.00	21.00	108.00	177.76	-13.28	34.09
236.00	24.75	110.00	226.58	-19.99	53.57
281.00	27.75	110.00	266.93	-26.80	72.27
326.00	30.75	110.00	306.19	-34.32	92.93
372.00	34.25	111.00	344.98	-42.97	116.07
399.00	36.50	110.00	367.00	-48.44	130.71
444.00	36.25	113.00	403.23	-58.22	155.54
520.00	35.75	114.00	464.71	-76.04	196.51
595.00	35.25	114.00	525.77	-93.75	236.30
670.00	35.75	113.00	586.83	-111.12	276.24
764.00	34.00	114.00	663.94	-132.55	325.53
877.00	32.25	114.00	758.57	-157.67	381.94
897.00	32.25	114.00	775.49	-162.01	391.69



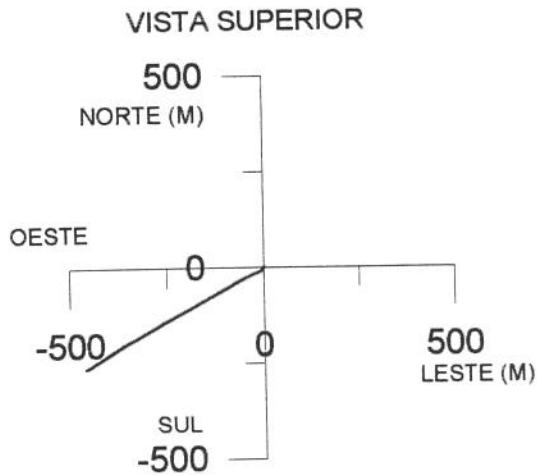
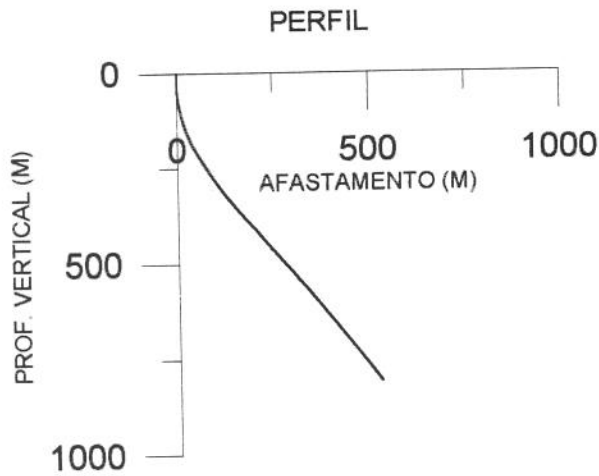
TRAJETÓRIA DO POÇO 16

L _m (M)	φ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36.00	3.00	3.00	35.98	0.94	0.05
45.00	4.50	6.00	44.96	1.53	0.10
54.00	6.00	3.00	53.93	2.35	0.16
63.00	8.00	3.00	62.86	3.44	0.22
72.00	9.50	13.00	71.75	4.80	0.41
81.00	10.75	11.00	80.61	6.35	0.74
90.00	12.25	3.00	89.43	8.12	0.96
99.00	13.75	11.00	98.20	10.13	1.20
107.00	15.25	1.00	105.95	12.12	1.41
116.00	17.00	5.00	114.59	14.62	1.54
125.00	18.75	8.00	123.16	17.36	1.85
176.00	22.00	7.00	170.96	34.96	4.17
237.00	25.00	5.00	226.89	59.15	6.71
292.00	28.25	7.00	276.05	83.66	9.29
347.00	31.25	8.00	323.80	110.71	12.85
402.00	32.00	10.00	370.63	139.20	17.36
457.00	30.00	8.00	417.77	167.17	21.79
514.00	29.00	10.00	467.38	194.89	26.18
599.00	28.00	9.00	542.08	234.89	32.88
646.00	27.25	9.00	583.72	256.42	36.29
721.00	26.75	8.00	650.55	290.09	41.32
786.00	25.00	17.00	709.03	317.76	47.45
861.00	24.00	9.00	777.28	348.04	54.44
870.00	24.00	9.00	785.50	351.65	55.02



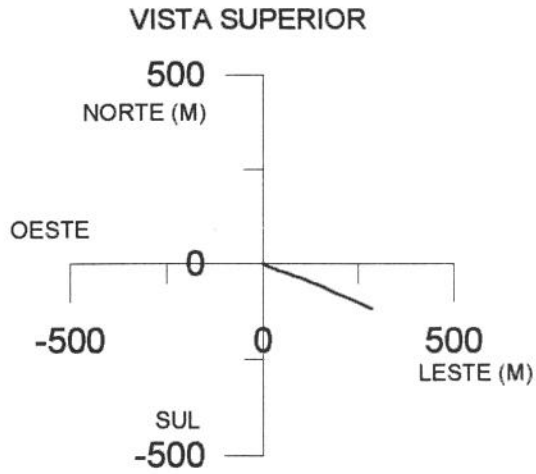
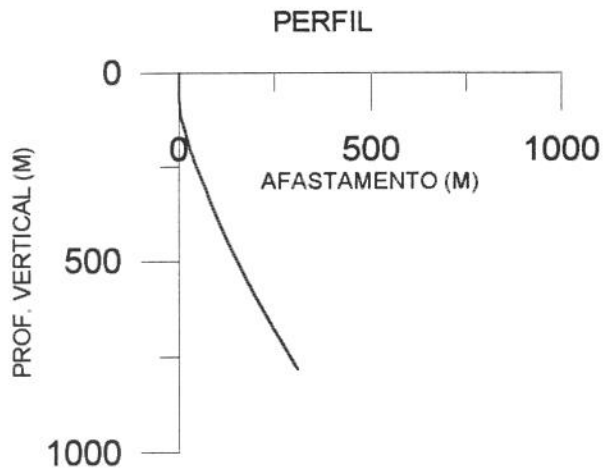
TRAJETÓRIA DO POÇO 17

L _m (M)	φ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26.00	1.50	182.00	26.00	-0.34	-0.01
36.00	2.75	213.00	35.99	-0.69	-0.12
46.00	4.75	220.00	45.97	-1.21	-0.51
54.00	6.25	224.00	53.93	-1.78	-1.02
63.00	8.00	213.00	62.86	-2.66	-1.72
72.00	9.50	215.00	71.76	-3.79	-2.48
81.00	11.00	222.00	80.61	-5.04	-3.48
90.00	12.25	228.00	89.43	-6.33	-4.76
98.00	13.25	238.00	97.23	-7.39	-6.17
107.00	14.00	244.00	105.98	-8.41	-8.02
116.00	15.00	248.00	114.69	-9.33	-10.08
125.00	15.00	244.00	123.38	-10.28	-12.21
134.00	16.50	243.00	132.05	-11.37	-14.39
143.00	18.00	245.00	140.64	-12.54	-16.79
151.00	19.00	247.00	148.23	-13.57	-19.11
160.00	21.00	250.00	156.68	-14.70	-21.98
169.00	22.00	249.00	165.06	-15.85	-25.07
178.00	23.00	244.00	173.37	-17.23	-28.22
186.00	24.50	243.00	180.69	-18.66	-31.11
196.00	26.00	241.00	189.74	-20.67	-34.87
205.00	28.00	240.00	197.76	-22.68	-38.43
232.00	31.00	243.00	221.25	-29.02	-50.11
296.00	35.00	242.00	274.92	-45.11	-81.02
353.00	38.25	241.00	320.66	-61.34	-110.90
409.00	42.00	240.00	363.47	-79.10	-142.31
465.00	42.00	241.00	405.09	-97.55	-174.92
521.00	41.00	242.00	447.03	-115.26	-207.53
615.00	40.50	241.00	518.24	-144.54	-261.45
680.00	40.50	240.00	567.66	-165.32	-298.19
783.00	39.00	240.00	646.85	-198.25	-355.23
877.00	38.00	238.00	720.42	-228.39	-405.38
959.00	37.00	238.00	785.47	-254.84	-447.71
986.00	37.00	238.00	807.03	-263.45	-461.49



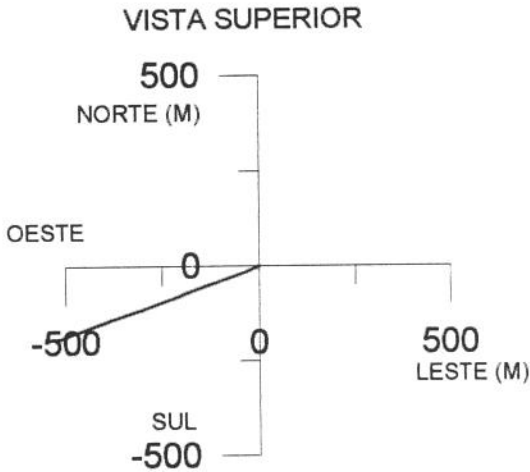
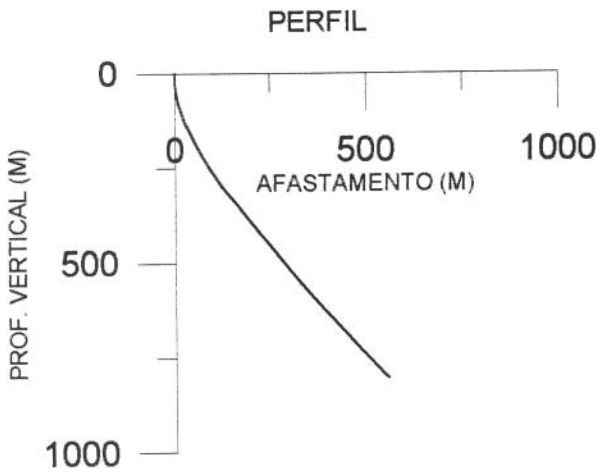
TRAJETÓRIA DO POÇO 18

L _m (M)	φ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
64.00	1.50	173.00	63.99	-0.83	0.10
73.00	3.00	128.00	72.99	-1.13	0.27
82.00	4.50	122.00	81.97	-1.47	0.75
91.00	6.00	118.00	90.93	-1.88	1.47
100.00	8.00	115.00	99.86	-2.37	2.45
108.00	9.50	103.00	107.77	-2.77	3.60
117.00	11.25	100.00	116.62	-3.09	5.18
126.00	12.75	105.00	125.42	-3.49	7.01
135.00	14.75	108.00	134.16	-4.10	9.06
212.00	18.25	118.00	207.98	-12.63	29.16
224.00	19.00	118.00	219.35	-14.43	32.55
233.00	18.75	113.00	227.87	-15.69	35.17
243.00	19.50	108.00	237.32	-16.83	38.24
258.00	21.25	106.00	251.38	-18.36	43.24
315.00	21.25	108.00	304.50	-24.40	62.99
361.00	21.50	108.00	347.34	-29.58	78.94
423.00	23.00	110.00	404.72	-37.22	101.13
489.00	25.00	113.00	465.01	-47.06	126.10
555.00	26.75	113.00	524.39	-58.31	152.62
640.00	29.00	114.00	599.52	-74.16	189.06
728.00	30.00	114.00	676.11	-91.78	228.65
842.00	30.25	114.00	774.72	-115.06	280.92
845.00	30.25	114.00	777.31	-115.67	282.30
852.00	30.25	114.00	783.36	-117.11	285.52



TRAJETÓRIA DO POÇO 19

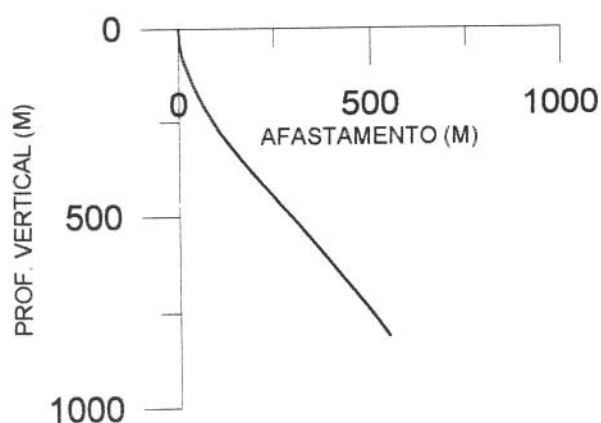
L _m (M)	φ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.00	3.25	253.00	26.99	-0.22	-0.73
46.00	7.25	245.00	45.90	-0.85	-2.35
55.00	9.00	240.00	54.81	-1.43	-3.48
72.00	13.25	243.00	71.49	-3.00	-6.36
81.00	15.25	246.00	80.21	-3.95	-8.36
90.00	17.25	247.00	88.85	-4.96	-10.67
128.00	22.25	247.00	124.60	-9.97	-22.49
164.00	25.00	249.00	157.58	-15.38	-35.86
209.00	28.50	249.00	197.76	-22.63	-54.77
263.00	33.25	249.00	244.10	-32.56	-80.63
310.00	37.00	251.00	282.53	-41.81	-106.04
348.00	39.25	251.00	312.42	-49.44	-128.22
388.00	38.25	250.00	343.62	-57.80	-151.82
444.00	38.25	248.00	387.59	-70.23	-184.18
510.00	38.75	249.00	439.25	-85.28	-222.41
576.00	39.00	251.00	490.63	-99.45	-261.33
642.00	40.00	250.00	541.55	-113.46	-300.90
726.00	41.50	251.00	605.19	-131.76	-352.59
801.00	42.00	251.00	661.14	-148.02	-399.81
894.00	42.50	250.00	729.98	-168.90	-458.75
980.00	41.75	251.00	793.76	-188.15	-513.12
994.00	41.75	251.00	804.21	-191.19	-521.94



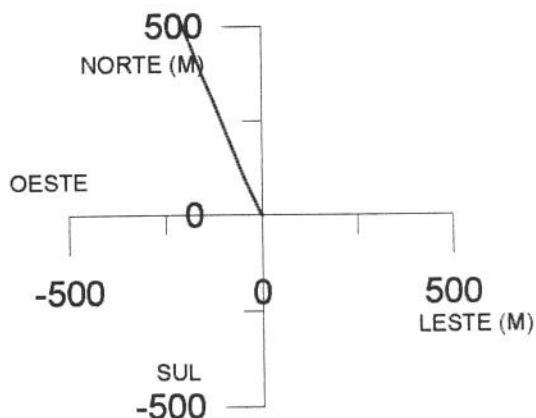
TRAJETÓRIA DO POÇO 20

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.00	4.75	326.00	27.97	0.96	-0.65
37.00	6.75	325.00	36.92	1.70	-1.16
46.00	8.75	333.00	45.84	2.74	-1.78
55.00	10.75	337.00	54.71	4.13	-2.43
64.00	12.75	333.00	63.52	5.79	-3.20
73.00	14.75	336.00	72.26	7.72	-4.12
82.00	16.75	336.00	80.92	9.95	-5.12
110.00	20.50	335.00	107.45	18.08	-8.82
155.00	24.25	335.00	149.06	33.61	-16.06
209.00	27.75	335.00	197.58	55.06	-26.07
255.00	31.00	337.00	237.66	75.67	-35.24
301.00	35.00	338.00	276.24	98.81	-44.83
356.00	39.00	338.00	320.15	129.49	-57.22
395.00	39.25	338.00	350.41	152.31	-66.44
451.00	40.00	339.00	393.54	185.54	-79.53
508.00	40.50	339.00	437.04	219.92	-92.73
565.00	41.50	339.00	480.06	254.83	-106.13
611.00	41.00	339.00	514.65	283.15	-117.00
668.00	39.00	338.00	558.31	317.23	-130.43
743.00	40.00	337.00	616.18	361.31	-148.68
827.00	39.75	339.00	680.64	411.23	-168.86
902.00	37.50	340.00	739.23	455.08	-185.25
978.00	37.25	339.00	799.63	498.29	-201.41
994.00	37.25	339.00	812.37	507.34	-204.88

PERFIL

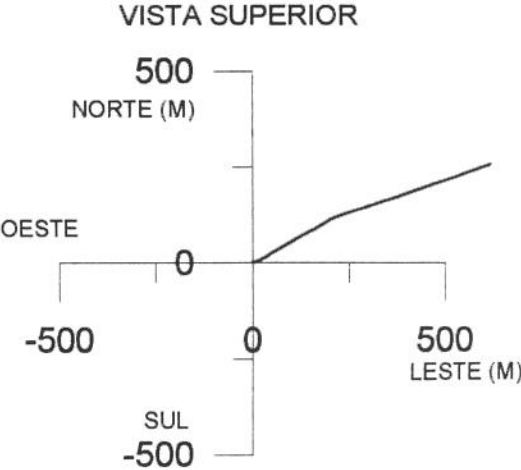
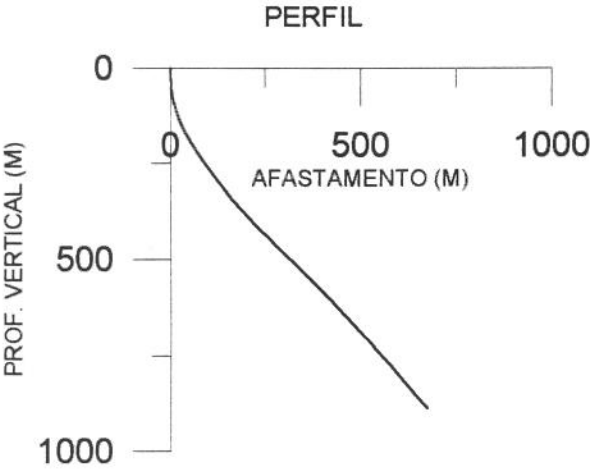


VISTA SUPERIOR



TRAJETÓRIA DO POÇO 21

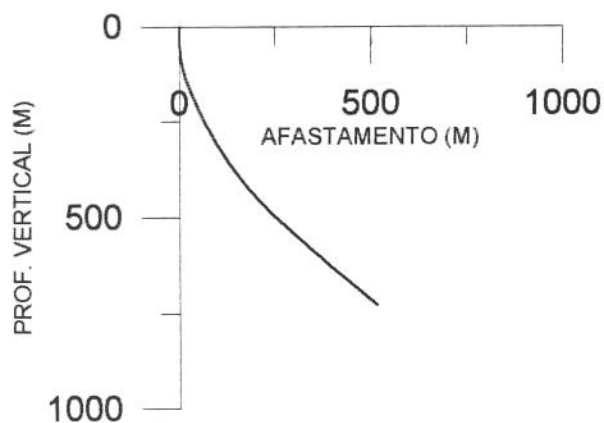
L _m (M)	φ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.00	2.50	45.00	26.99	0.42	0.42
36.00	3.75	62.00	35.98	0.71	0.81
45.00	5.25	68.00	44.95	1.01	1.45
54.00	7.00	65.00	53.90	1.39	2.33
63.00	8.25	63.00	62.82	1.91	3.40
72.00	10.00	70.00	71.70	2.48	4.71
82.00	12.25	73.00	81.52	3.09	6.54
90.00	13.75	72.00	89.31	3.63	8.26
100.00	15.75	72.00	98.98	4.42	10.68
109.00	17.00	71.00	107.61	5.23	13.08
118.00	18.00	68.00	116.20	6.17	15.62
126.00	19.50	64.00	123.77	7.22	17.97
135.00	21.00	62.00	132.22	8.63	20.74
144.00	23.25	61.00	140.55	10.25	23.72
153.00	24.50	61.00	148.78	12.02	26.91
161.00	25.50	61.00	156.03	13.66	29.86
170.00	26.75	59.00	164.11	15.64	33.30
179.00	28.50	57.00	172.09	17.85	36.83
207.00	32.50	59.00	196.21	25.38	48.88
243.00	34.00	59.00	226.31	35.54	65.80
278.00	35.50	60.00	255.07	45.67	82.99
331.00	38.00	60.00	297.53	61.52	110.45
387.00	40.00	61.00	341.05	78.87	141.12
425.00	42.50	60.00	369.62	91.21	162.93
483.00	44.50	59.00	411.69	111.47	197.32
489.00	45.00	63.00	415.95	113.52	201.02
498.00	46.00	65.00	422.26	116.33	206.79
507.00	46.00	68.00	428.51	118.92	212.72
516.00	45.50	71.00	434.79	121.17	218.76
565.00	46.75	71.00	468.75	132.67	252.16
657.00	45.25	72.00	532.66	153.67	314.91
751.00	43.75	72.00	599.70	174.03	377.57
845.00	42.75	72.00	668.17	193.93	438.83
985.00	41.75	70.00	771.79	224.58	527.82
1121.00	39.75	70.00	874.82	254.94	611.24
1138.00	39.75	70.00	887.89	258.66	621.46



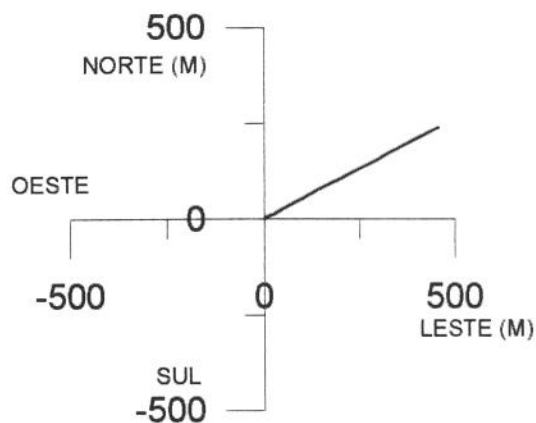
TRAJETÓRIA DO POÇO 22

L_m (M)	ϕ (GRAU)	ψ (GRAU)	z (M)	y (M)	x (M)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
46.00	2.00	63.00	45.99	0.36	0.72
73.00	7.75	42.00	72.88	1.75	2.52
83.00	9.00	44.00	82.77	2.82	3.52
92.00	10.00	54.00	91.65	3.79	4.64
101.00	11.00	59.00	100.50	4.70	6.00
110.00	12.75	64.00	109.31	5.58	7.63
119.00	14.00	60.00	118.06	6.56	9.47
128.00	15.75	65.00	126.76	7.62	11.52
137.00	17.00	68.00	135.40	8.63	13.84
146.00	19.00	70.00	143.96	9.63	16.44
155.00	20.00	65.00	152.44	10.78	19.22
188.00	23.25	60.00	183.11	16.39	30.00
226.00	25.25	62.00	217.76	23.96	43.65
263.00	27.50	63.00	250.90	31.55	58.23
301.00	29.50	60.00	284.30	40.20	74.16
329.00	31.50	61.00	308.42	47.20	86.53
360.00	32.25	60.00	334.75	55.26	100.77
389.00	35.00	62.00	358.89	63.04	114.82
416.00	36.50	62.00	380.80	70.45	128.74
444.00	39.00	62.00	402.94	78.49	143.88
472.00	40.25	63.00	424.51	86.74	159.72
520.00	43.50	63.00	460.24	101.28	188.26
558.00	46.50	63.00	487.11	113.48	212.20
592.00	47.00	64.00	510.41	124.53	234.36
649.00	48.00	63.00	548.91	143.28	271.97
696.00	48.75	62.00	580.13	159.50	303.13
733.00	49.25	60.00	604.41	173.04	327.55
771.00	50.00	63.00	629.02	186.85	352.99
913.00	49.50	64.00	720.77	235.21	449.98
925.00	49.50	64.00	728.57	239.21	458.18

PERFIL



VISTA SUPERIOR



ANEXO 3

CARTAS DINAMOMÉTRICAS DIGITALIZADAS

Carta Dinamométrica do Poço 01

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
0.00	3625.14	29.78	4977.80
0.00	3841.56	30.15	4923.69
0.18	3949.78	31.26	4923.69
0.55	4869.59	32.00	4707.27
1.11	5140.12	31.82	4599.05
1.29	5140.12	31.82	3949.78
1.66	5194.22	31.63	3841.56
5.36	5194.22	31.63	3571.03
5.73	5140.12	31.08	3138.18
7.95	5140.12	29.78	3138.18
8.32	5194.22	27.01	3354.60
8.69	5140.12	24.79	3300.50
9.06	5140.12	20.35	3300.50
9.43	5194.22	2.96	3300.50
9.80	5194.22	2.59	3354.60
10.17	5140.12	0.00	3354.60
10.54	5140.12	0.00	3625.14
10.91	5194.22		
11.28	5140.12		
11.65	5194.22		
12.02	5194.22		
12.39	5140.12		
21.64	5140.12		
22.01	5086.01		
23.86	5086.01		
24.23	5031.91		
24.97	5031.91		
25.34	4977.80		

Carta Dinamométrica do Poço 02

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
3.37	4942.63	0.45	2556.53
3.82	5056.25	0.00	2442.91
4.04	5169.88	0.90	3749.58
4.94	5397.12	2.02	4374.51
5.39	5624.37	3.37	4942.63
40.63	5567.56		
44.00	5567.56		
41.98	5283.50		
41.76	5226.69		
41.31	5226.69		
36.82	4090.45		
36.59	3976.83		
32.10	2840.59		
31.88	2726.97		
30.53	2386.10		
30.76	2272.47		
30.31	2158.85		
30.31	2045.23		
28.96	1704.36		
28.51	1817.98		
27.61	1988.41		
27.16	2045.23		
26.71	1988.41		
25.82	1988.41		
25.37	2045.23		
23.12	2045.23		
2.47	2102.04		
2.02	2158.85		

Carta Dinamométrica do Poço 03

Posição (in)	Carga (lbf)
0.57	5040.02
3.26	5806.98
4.79	5806.98
5.17	5752.20
12.84	5752.20
30.28	5587.85
30.47	5533.07
31.23	5533.07
31.62	5478.28
32.00	5368.72
31.23	3999.15
29.51	3396.54
28.93	3122.62
27.78	3122.62
25.10	3286.97
4.41	3286.97
3.64	3396.54
0.57	3396.54
0.00	3506.10
0.00	4382.63
0.57	5040.02

Carta Dinamométrica do Poço 04

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
6.35	5363.98	13.88	2786.49
7.14	5642.63	13.49	2856.15
7.93	5781.96	13.09	2786.49
8.53	5921.28	12.69	2786.49
8.93	5990.94	12.30	2856.15
9.32	5990.94	11.90	2786.49
12.69	7175.20	11.11	2925.81
13.09	7244.86	10.71	2925.81
13.49	7244.86	10.31	2995.47
24.00	7244.86	9.92	2995.47
23.60	5990.94	2.98	3065.13
23.40	5921.28	1.59	3204.46
23.21	5781.96	0.40	3204.46
22.81	5712.29	0.00	3274.12
22.41	5572.97	1.98	3970.74
21.62	5433.65	6.35	5363.98
19.64	4737.02		
19.24	4458.38		
18.84	4319.05		
18.05	4110.07		
16.46	3552.77		
16.07	3622.43		
15.67	3622.43		
15.27	3552.77		
15.27	3483.11		
14.08	3065.13		
14.08	2925.81		

Carta Dinamométrica do Poço 05

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
6.90	5295.67	29.13	6452.20	18.20	3773.93
9.96	6269.59	29.89	6330.46	17.82	3773.93
11.50	6513.07	31.43	6330.46	17.05	3652.19
11.88	6513.07	31.81	6208.72	15.52	3165.23
13.03	6695.68	32.00	6086.98	15.14	3104.36
13.41	6695.68	32.00	5965.24	12.84	2373.92
13.80	6756.55	31.81	5843.50	12.46	2313.05
14.18	6756.55	31.81	5113.07	11.31	2313.05
14.56	6817.42	31.62	5052.20	10.92	2373.92
15.33	6817.42	30.85	4930.46	10.54	2373.92
15.71	6756.55	28.17	4930.46	8.62	2678.27
16.86	6756.55	27.78	4991.33	7.47	3043.49
17.25	6695.68	26.25	4991.33	3.45	3226.10
17.63	6695.68	25.87	4930.46	1.34	3104.36
18.01	6634.81	25.49	4930.46	0.96	3104.36
18.40	6634.81	25.10	4991.33	0.19	3286.97
18.78	6573.94	24.72	4930.46	0.00	3408.71
19.16	6573.94	24.34	4930.46	0.77	3652.19
20.31	6391.33	23.95	4869.59	2.68	4200.02
20.69	6391.33	23.57	4747.85	4.02	4626.11
21.08	6330.46	23.19	4686.98	6.90	5295.67
22.23	6330.46	22.04	4321.76		
22.61	6391.33	21.65	4260.89		
22.99	6330.46	21.27	4139.15		
24.53	6330.46	20.89	4078.28		
24.91	6391.33	20.12	4078.28		
25.68	6391.33	19.74	3956.54		
26.06	6452.20	19.35	3956.54		

Carta Dinamométrica do Poço 06

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
6.63	5656.84	13.25	4547.65
6.81	5767.75	12.54	4436.73
7.16	5878.67	12.18	4325.82
7.52	6100.51	11.82	4270.36
10.39	6987.86	7.88	3050.25
11.10	6987.86	7.70	2939.34
11.46	7043.31	7.70	2828.42
11.82	6987.86	7.34	2772.96
23.28	6987.86	6.63	2883.88
23.64	6932.40	6.09	2994.80
24.00	6821.48	5.37	2994.80
24.00	6599.64	4.66	3105.71
23.10	6322.35	1.97	3161.17
23.10	6211.43	1.61	3050.25
22.93	6100.51	1.25	3105.71
22.57	6045.05	0.54	3105.71
22.21	6100.51	0.18	3161.17
21.13	6100.51	0.00	3272.09
20.78	6045.05	0.00	3383.01
18.27	6045.05	1.79	3937.60
17.91	5934.13	1.97	4048.52
17.55	5989.59	1.97	4159.44
17.19	5934.13	2.15	4270.36
16.84	5934.13	5.01	5157.70
16.48	5878.67	5.37	5213.16
14.69	5324.08	6.63	5656.84
13.79	4769.49		
13.43	4658.57		

Carta Dinamométrica do Poço 07

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
0.00	3347.84	37.65	4753.93
0.70	3347.84	37.65	4686.98
1.05	3481.75	38.00	4553.06
1.23	3615.67	38.00	4151.32
3.33	4419.15	37.65	4084.37
3.68	4486.11	36.95	4084.37
4.03	4419.15	36.25	3950.45
4.20	4486.11	35.90	3816.54
4.73	4620.02	35.55	3749.58
5.95	5088.72	35.20	3749.58
6.30	5088.72	13.83	3682.62
6.65	5155.67	11.56	3146.97
7.00	5289.59	9.28	1740.88
7.35	5289.59	6.30	1740.88
7.71	5356.54	6.13	1673.92
12.26	5356.54	5.08	2075.66
12.61	5289.59	4.90	2209.57
12.96	5155.67	4.03	2544.36
13.31	5088.72	4.03	2678.27
14.36	5088.72	3.68	2879.14
15.41	4887.85	3.33	3013.06
16.11	4887.85	3.15	3146.97
16.29	4820.89	2.63	3013.06
16.64	4753.93	1.23	2477.40
23.99	4753.93	1.05	2343.49
24.34	4820.89	0.00	3347.84
27.84	4820.89		
28.19	4753.93		

Carta Dinamométrica do Poço 08

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
3.47	2580.88	25.14	5015.67	12.83	2240.01
3.82	2629.58	25.49	4918.28	12.14	2045.23
4.51	2775.66	26.18	4918.28	11.79	1996.53
4.86	2824.36	26.53	4869.59	11.45	1899.14
5.55	3019.14	26.88	4869.59	11.10	1850.44
6.24	3019.14	27.23	4820.89	9.71	1850.44
6.76	3116.53	28.96	4820.89	9.36	1801.75
7.11	3165.23	29.31	4869.59	8.15	1801.75
7.80	3360.01	30.00	4674.80	7.80	1850.44
7.80	3457.41	29.65	4577.41	7.11	1850.44
10.23	4480.02	26.71	3554.80	6.76	1947.83
11.10	4723.50	26.36	3506.10	6.42	1947.83
11.45	4723.50	25.84	3360.01	4.68	2191.31
11.79	4820.89	25.66	3262.62	3.64	2191.31
12.14	4869.59	25.66	3165.23	3.29	2142.62
12.49	4966.98	24.97	2775.66	2.95	1266.09
12.83	5015.67	24.62	2726.97	2.77	1217.40
13.18	5210.46	24.28	2629.58	2.43	1168.70
14.91	5697.42	23.93	2580.88	2.08	1168.70
15.26	5648.72	23.58	2580.88	1.56	1266.09
16.65	5259.15	22.20	2191.31	0.52	1266.09
16.99	5210.46	22.02	2093.92	0.00	1412.18
17.34	5113.07	22.02	1996.53	0.35	1606.96
17.69	5113.07	21.68	1899.14	1.73	1996.53
18.38	4918.28	21.68	1801.75	1.73	2093.92
19.08	4820.89	21.50	1753.05	1.91	2191.31
19.42	4723.50	21.16	1801.75	3.47	2580.88
19.77	4674.80	20.81	1801.75		
20.46	4674.80	18.90	1266.09		
20.81	4723.50	18.21	1363.48		
21.16	4723.50	17.51	1558.27		
21.50	4772.19	17.17	1606.96		
21.85	4772.19	16.13	1899.14		
22.89	4918.28	15.43	1996.53		
23.41	5015.67	14.91	2093.92		
23.76	5064.37	14.57	2093.92		
24.45	5064.37	14.22	2191.31		
24.80	5015.67	13.87	2240.01		

Carta Dinamométrica do Poço 09

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
8.21	7105.54	25.40	2995.47	3.82	3901.08
11.65	7105.54	24.82	2786.49	3.44	3970.74
12.03	7035.88	24.44	2507.84	2.29	3970.74
12.79	7035.88	24.44	2368.51	1.91	3901.08
13.18	6966.21	24.06	2298.85	1.53	3761.76
13.56	6826.89	22.53	2577.50	1.15	3692.09
13.94	6757.23	22.15	2577.50	0.76	3692.09
14.70	6757.23	21.01	2995.47	0.00	3970.74
15.47	6617.90	20.62	3065.13	0.00	4249.39
15.85	6617.90	20.24	2995.47	0.76	4528.04
36.28	6548.24	19.86	3065.13	5.35	6478.58
36.47	6617.90	19.48	3065.13	8.21	7105.54
37.62	6617.90	18.71	3274.12		
38.00	6548.24	18.33	3413.44		
37.81	6478.58	18.14	3552.77		
37.81	6199.93	17.38	3692.09		
37.43	5990.94	16.61	3970.74		
31.89	5085.34	16.23	4040.40		
31.32	4876.35	13.94	4040.40		
31.13	4737.02	13.18	3761.76		
31.13	4597.70	11.65	3483.11		
30.74	4319.05	10.50	3483.11		
30.36	4179.73	10.12	3413.44		
29.98	4179.73	9.74	3274.12		
29.22	3901.08	8.97	3134.80		
28.07	3901.08	7.83	3134.80		
27.69	3831.42	7.45	3204.46		
26.35	3343.78	5.73	3831.42		
26.16	3204.46	4.58	3831.42		
25.78	3065.13	4.20	3901.08		

Carta Dinamométrica do Poço 10

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
6.63	7107.57	10.03	3962.63
9.13	7988.15	9.67	4025.52
9.49	8051.05	9.31	4025.52
11.28	8051.05	8.96	3962.63
13.43	7736.55	8.24	3711.03
22.93	7736.55	7.88	3648.13
23.10	7799.45	6.63	3207.84
23.82	7799.45	6.27	3207.84
23.82	7673.66	5.91	3144.94
24.00	7547.86	5.19	3144.94
24.00	7170.47	3.22	3836.83
22.21	6541.48	2.69	3962.63
18.81	4843.21	1.97	3962.63
17.91	4528.71	1.61	3836.83
17.73	4402.92	1.43	3711.03
17.73	4277.12	1.07	3585.23
17.37	4025.52	0.72	3585.23
15.94	3522.33	0.18	3648.13
15.94	3396.54	0.00	3773.93
15.58	3270.74	0.00	3899.73
15.22	3207.84	0.36	4025.52
14.87	3082.04	0.90	4402.92
14.15	2956.24	1.61	4654.51
13.79	2956.24	4.84	6415.68
13.25	3019.14	6.63	7107.57
10.75	3899.73		
10.39	3962.63		

Carta Dinamométrica do Poço 11

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
4.49	6400.80	36.13	5539.15	9.92	3631.22
6.74	7139.35	35.75	5600.70	9.55	3631.22
7.11	7200.90	35.00	5785.34	8.99	3754.32
7.67	7323.99	34.44	5662.25	8.24	4000.50
9.73	8001.00	33.51	5354.52	7.86	4000.50
10.11	8062.55	33.51	4739.05	7.49	4062.05
13.10	8062.55	32.95	4492.87	7.11	4062.05
13.85	7816.36	32.76	4369.78	6.74	4123.59
14.23	7754.82	33.13	4246.68	6.36	4062.05
15.35	7385.54	33.13	4000.50	5.99	4062.05
16.47	7200.90	32.95	3877.41	5.24	3815.86
20.59	7200.90	30.33	3015.76	4.87	3815.86
20.97	7323.99	30.14	2892.67	4.12	3692.77
21.34	7323.99	30.14	2769.58	3.74	3569.68
22.09	7447.08	29.01	2400.30	2.62	3385.04
25.46	7447.08	25.27	2584.94	2.25	3446.58
25.83	7508.63	23.77	3077.31	0.75	3938.95
26.58	7508.63	23.77	3200.40	0.56	4062.05
27.70	7139.35	23.59	3323.49	0.56	4185.14
28.45	7016.26	22.46	3692.77	0.00	4431.32
32.20	7016.26	21.34	3692.77	0.75	4677.51
32.57	7077.81	20.97	3754.32	0.75	4800.60
34.44	7077.81	20.59	3754.32	0.94	4923.69
34.82	7016.26	19.84	3877.41	0.94	5046.78
35.19	7016.26	19.47	3877.41	1.12	5169.88
35.57	6954.72	19.09	3815.86	1.12	5416.06
36.32	6708.53	18.34	3815.86	1.31	5539.15
36.69	6646.98	17.03	3385.04	2.62	5969.98
37.44	6646.98	16.66	3323.49	3.37	5846.88
37.81	6708.53	16.29	3200.40	4.49	6400.80
37.81	6585.44	15.91	3138.85		
38.00	6462.35	15.16	3138.85		
37.81	6339.25	14.79	3015.76		
37.81	6093.07	14.41	3015.76		
37.63	5969.98	14.04	2892.67		
37.63	5846.88	12.92	2892.67		
37.25	5723.79	12.17	3138.85		
37.25	5600.70	11.79	3200.40		
36.88	5477.61	11.42	3200.40		
36.50	5539.15	10.30	3569.68		

Carta Dinamométrica do Poço 12

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
15.47	7025.05	16.26	5455.63
20.57	7025.05	15.87	5530.36
20.96	7099.79	15.47	5455.63
21.35	7025.05	14.30	5455.63
22.92	7025.05	13.91	5530.36
23.31	6950.32	13.52	5455.63
28.40	6950.32	13.12	5455.63
28.79	6875.58	12.73	5380.89
29.97	6875.58	9.99	4334.61
30.36	6800.85	8.42	4035.67
30.56	6875.58	8.03	4035.67
32.91	6875.58	7.64	4110.40
33.30	6800.85	7.25	4110.40
33.69	6800.85	6.86	4035.67
34.08	6726.12	4.51	3138.85
34.47	6726.12	3.92	2839.92
34.87	6651.38	4.11	2690.45
36.43	6651.38	3.92	2540.98
36.82	6576.65	3.53	2391.51
38.00	6128.24	3.53	2242.04
37.80	5978.77	3.33	2092.57
37.41	5978.77	2.94	1943.10
37.02	5904.03	2.15	2092.57
36.63	5904.03	0.20	2839.92
35.45	5679.83	0.20	2989.38
35.06	5530.36	0.00	3138.85
32.32	5530.36	0.20	3288.32
31.93	5455.63	0.59	3437.79
28.79	5455.63	1.18	3736.73
28.40	5530.36	1.57	3886.20
26.05	5530.36	2.35	4035.67
25.66	5605.10	3.53	4484.08
25.27	5530.36	3.92	4558.81
24.88	5530.36	4.70	4857.75
23.31	5530.36	5.88	5081.95
18.22	5530.36	6.66	5380.89
17.82	5455.63	8.62	5754.57
17.43	5530.36	9.79	6202.97
17.04	5530.36	15.47	7025.05
16.65	5455.63		

Carta Dinamométrica do Poço 13

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
6.22	5001.47	35.14	4369.10	13.45	2242.04
11.27	6726.12	34.81	4311.61	13.12	2242.04
12.27	6898.58	33.96	4024.17	12.11	2069.57
12.61	6898.58	33.80	3909.20	8.74	2069.57
12.95	6956.07	31.44	3104.36	8.41	2184.55
13.28	7071.04	31.44	2989.38	7.73	2299.53
13.96	7071.04	31.11	2874.41	7.40	2414.50
14.29	7013.56	30.77	2816.92	6.73	2529.48
15.64	7013.56	30.43	2701.94	6.39	2644.46
16.31	6783.60	30.10	2701.94	6.05	2701.94
16.48	6668.63	28.75	2242.04	5.72	2644.46
17.49	6323.70	28.42	2184.55	5.38	2759.43
17.82	6266.21	28.08	2069.57	3.03	2759.43
18.50	6036.26	27.74	2012.09	2.35	2644.46
18.83	6036.26	27.41	1897.11	2.02	2529.48
19.84	5863.79	27.07	1897.11	1.01	2529.48
21.52	5863.79	26.73	1782.13	0.67	2471.99
21.86	5806.30	26.40	1724.64	0.17	2644.46
23.88	5806.30	26.06	1609.67	0.00	2759.43
24.88	6151.23	25.73	1552.18	0.00	3104.36
25.89	6323.70	25.39	1552.18	1.68	3621.75
30.60	6323.70	25.05	1494.69	2.19	3794.22
31.61	5978.77	24.72	1552.18	2.52	3794.22
31.95	5978.77	24.38	1552.18	2.86	3909.20
32.28	5921.28	23.71	1667.16	3.03	4024.17
35.31	5921.28	23.20	1724.64	4.37	4484.08
35.65	6036.26	22.87	1839.62	6.22	5001.47
36.32	6151.23	22.19	1954.60		
37.33	6151.23	20.51	2529.48		
38.00	5921.28	19.17	2529.48		
37.83	5806.30	18.16	2701.94		
37.83	5576.35	16.14	2701.94		
37.50	5346.40	15.81	2644.46		
36.32	4943.98	15.47	2644.46		
36.15	4829.01	14.80	2529.48		
35.81	4714.03	14.46	2529.48		
35.65	4599.05	14.12	2414.50		
35.31	4484.08	13.79	2357.01		

Carta Dinamométrica do Poço 14

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
0.41	4414.75	37.25	5171.57	13.03	2774.99
3.05	5234.64	36.84	5171.57	11.81	3153.39
3.46	5297.7	36.43	5108.5	11.4	3216.46
3.66	5423.84	33.99	5108.5	10.99	3216.46
3.66	5549.98	33.58	5045.43	10.18	3342.6
4.27	5739.18	31.14	5045.43	9.77	3342.6
4.68	5802.25	30.33	4919.3	9.57	3279.53
5.5	6054.52	29.92	4919.3	9.16	3342.6
5.9	6117.59	29.51	4982.36	8.35	3342.6
6.31	6117.59	29.11	4919.3	7.94	3468.73
7.12	6243.72	27.88	4919.3	7.53	3468.73
7.53	6243.72	27.48	4982.36	7.12	3531.8
7.94	6306.79	27.07	4982.36	6.72	3468.73
8.35	6306.79	26.66	4919.3	5.9	3468.73
8.75	6369.86	26.26	4982.36	5.5	3405.67
13.23	6369.86	25.85	4919.3	5.09	3405.67
14.04	6243.72	25.44	4982.36	4.68	3342.6
14.45	6243.72	24.63	4982.36	4.27	3405.67
15.27	6117.59	24.22	4919.3	3.87	3342.6
16.08	6117.59	23.81	4919.3	2.65	3342.6
16.49	6054.52	23.41	4856.23	2.24	3216.46
16.89	5928.38	22.59	4603.96	1.02	3216.46
17.3	5865.31	22.19	4351.69	0.2	3468.73
46.2	5802.25	21.78	4225.55	0	3594.87
45.39	5549.98	21.37	3973.28	0.41	3721.01
45.39	5423.84	21.37	3847.14	0.41	4414.75
45.19	5360.77	20.76	3468.73		
43.56	5108.5	19.13	3216.46		
42.74	5108.5	18.73	3216.46		
42.34	5171.57	18.32	3153.39		
41.93	5108.5	17.91	3216.46		
41.52	5171.57	17.5	3153.39		
40.71	5045.43	17.1	3216.46		
40.3	5045.43	16.28	3216.46		
39.89	5108.5	15.88	3279.53		
39.49	5108.5	15.47	3153.39		
39.08	5045.43	15.06	3153.39		
38.67	5045.43	14.65	3216.46		
38.06	5171.57	14.25	3216.46		
37.65	5108.5	13.23	2901.12		

Carta Dinamométrica do Poço 15

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
0.23	3856.10	24.69	2876.78
2.08	4345.77	24.23	2815.57
2.31	4468.18	21.00	1958.66
6.00	5447.51	20.54	1897.45
7.38	5631.13	20.08	1897.45
8.31	5875.97	19.15	2081.07
8.77	5937.17	18.23	2081.07
10.62	5937.17	17.77	2142.28
11.54	5692.34	17.31	2264.70
12.46	5569.93	15.92	2448.32
12.92	5569.93	15.46	2570.74
13.85	5447.51	14.77	2631.94
14.31	5325.09	13.85	2631.94
14.77	5263.89	13.38	2509.53
16.62	5263.89	12.92	2509.53
17.08	5325.09	12.46	2387.11
17.54	5447.51	11.54	2264.70
18.46	5569.93	11.08	2142.28
22.62	5569.93	10.62	2142.28
23.54	5325.09	9.92	2325.90
26.77	5325.09	9.46	2325.90
27.69	5447.51	8.54	2448.32
29.08	5447.51	8.08	2448.32
30.00	5202.68	7.38	2570.74
29.77	5080.26	6.92	2570.74
29.77	4590.60	6.46	2631.94
29.54	4468.18	6.00	2631.94
29.54	4345.77	5.54	2570.74
29.08	4100.94	4.62	2325.90
27.92	3794.90	2.77	2325.90
27.69	3672.48	1.85	2570.74
26.77	3427.65	1.38	2631.94
26.54	3305.23	0.46	2815.57
25.62	3060.40	0.00	3060.40
25.15	2999.19	0.23	3856.10

Carta Dinamométrica do Poço 16

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
4.97	5103.60	20.69	2291.41
5.38	5207.75	19.66	2031.02
5.79	5416.06	19.66	1926.87
7.66	5884.76	19.24	1822.71
8.07	5936.84	18.83	1822.71
8.48	5936.84	17.79	2083.10
8.90	5884.76	17.38	2135.18
10.55	5468.14	15.31	2655.95
10.97	5416.06	14.48	2760.11
11.79	5207.75	14.07	2760.11
12.62	5103.60	13.24	2864.26
13.45	5103.60	12.83	2812.19
13.86	5051.52	12.41	2864.26
14.69	5051.52	11.38	2603.88
16.34	5259.83	10.76	2291.41
16.76	5259.83	9.93	2187.26
17.59	5363.98	9.52	2187.26
19.66	5363.98	9.10	2083.10
21.31	5155.67	7.86	2083.10
26.28	5155.67	5.17	2760.11
26.69	5103.60	4.76	2812.19
27.93	5103.60	4.34	2812.19
28.34	5155.67	3.93	2760.11
29.17	5051.52	1.86	2239.33
29.59	5051.52	0.21	2655.95
29.79	5155.67	0.00	2760.11
29.79	5259.83	0.41	2864.26
30.00	5207.75	0.41	2968.42
30.00	5103.60	0.83	3072.57
30.00	4895.29	1.03	3176.73
29.38	4739.05	4.97	5103.60
25.24	3489.19		
20.90	2395.57		

Carta Dinamométrica do Poço 17

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
10.07	5842.83	18.57	1322.90
12.64	6559.40	18.17	1212.66
13.04	6614.52	17.38	1102.42
15.01	6614.52	16.99	1157.54
15.41	6504.28	16.20	1157.54
15.80	6449.16	15.41	1267.78
16.20	6338.92	15.01	1378.03
17.38	6173.55	14.62	1433.15
17.78	6063.31	13.04	1874.11
18.17	6063.31	12.64	1929.24
18.96	5953.07	12.25	1929.24
19.36	5953.07	11.46	2039.48
19.75	5897.95	8.69	2039.48
23.31	5897.95	7.51	1874.11
23.70	5953.07	7.11	1874.11
24.89	5953.07	6.72	1818.99
25.28	5897.95	6.32	1818.99
28.44	5897.95	5.93	1763.87
28.84	5953.07	5.53	1818.99
29.23	5897.95	5.14	1818.99
30.02	5897.95	4.35	1929.24
30.42	5953.07	3.95	1874.11
31.21	5953.07	3.56	1929.24
31.60	5897.95	1.98	1929.24
32.00	5677.46	1.58	1984.36
32.00	5456.98	0.79	2204.84
31.41	5126.25	0.59	2370.20
31.01	5016.01	0.00	2535.57
26.67	3472.62	0.00	2645.81
26.47	3417.50	0.40	2756.05
26.07	3417.50	0.40	2866.29
25.68	3307.26	0.59	2976.53
24.49	3141.90	2.17	3417.50
20.35	1984.36	2.37	3527.74
20.15	1874.11	7.11	5071.13
19.75	1763.87	10.07	5842.83
19.16	1543.39		
18.77	1433.15		

Carta Dinamométrica do Poço 18

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
2.87	3824.65	13.68	1765.22
7.26	5354.52	13.34	1765.22
7.60	5413.36	13.17	1706.38
9.96	6237.13	12.33	2000.59
11.32	6472.49	11.82	2118.27
11.65	6413.65	9.63	2883.20
16.38	6413.65	8.95	3000.88
16.72	6354.81	8.61	3000.88
17.06	6354.81	8.44	2942.04
17.40	6237.13	8.11	3000.88
35.30	6295.97	7.77	3000.88
35.47	6295.97	7.43	2883.20
36.14	6178.29	7.09	2824.36
37.83	6178.29	6.42	2589.00
37.83	6119.45	6.08	2530.16
38.00	6001.76	4.73	2059.43
38.00	5413.36	4.39	2000.59
37.83	5295.67	3.88	2000.59
37.49	5354.52	2.03	2647.84
37.16	5354.52	1.69	2589.00
36.48	5119.15	1.52	2530.16
23.14	5060.31	1.18	2589.00
21.28	4413.06	0.51	2589.00
21.11	4295.38	0.17	2471.31
20.77	4177.70	0.00	2589.00
20.60	4060.02	0.00	2824.36
20.60	3942.34	0.17	2942.04
20.10	3589.29	0.34	3000.88
19.08	3412.77	0.68	3000.88
18.75	3412.77	1.01	3059.72
18.07	3295.09	1.18	3177.40
14.69	2118.27	2.87	3824.65
14.36	1882.91		

Carta Dinamométrica do Poço 19

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
8.57	6296.64	24.00	2056.05
9.14	6232.39	23.43	2056.05
9.71	6103.89	22.29	2313.05
10.29	6103.89	21.71	2377.30
11.43	5846.88	21.14	2505.81
12.00	5846.88	20.57	2505.81
12.57	5718.38	20.00	2570.06
13.14	5654.13	19.43	2570.06
16.00	5654.13	18.86	2634.31
19.43	6039.64	18.29	2634.31
20.57	6039.64	17.71	2698.56
21.71	6168.14	17.14	2698.56
25.71	6168.14	16.57	2762.81
26.29	6232.39	13.14	2762.81
29.14	6232.39	12.57	2634.31
29.71	6168.14	12.00	2634.31
32.57	6168.14	11.43	2505.81
33.14	6103.89	10.86	2441.56
35.43	6103.89	10.29	2441.56
36.00	6039.64	8.00	2184.55
42.86	6039.64	7.43	2184.55
43.43	6103.89	6.86	2120.30
44.57	5846.88	2.86	2120.30
44.57	5718.38	0.57	2634.31
45.71	5461.38	0.00	2698.56
46.00	5332.87	0.00	5718.38
46.00	5075.87	0.29	5782.63
45.14	4818.86	0.29	6168.14
44.29	4626.11	0.57	6296.64
44.00	4497.60	0.57	6553.65
34.00	2248.80	1.14	6682.15
33.43	2184.55	1.14	6810.66
32.86	2056.05	2.86	7196.17
31.71	1927.54	3.43	7260.42
30.57	1670.54	4.00	7196.17
29.43	1542.04	4.57	7067.66
27.14	1542.04	8.57	6296.64
25.43	1734.79		

Carta Dinamométrica do Poço 20

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
6.82	6675.39	38.34	5721.76	12.17	1970.83
7.19	6802.54	37.97	5658.19	11.43	1843.68
7.56	6866.12	37.24	5658.19	10.69	2097.98
7.93	6866.12	36.87	5721.76	10.32	2161.56
8.66	6993.27	36.50	5848.91	9.77	2288.71
8.85	7120.42	36.13	5785.34	9.03	2415.86
11.80	8137.62	35.39	5912.49	7.00	3115.18
12.17	8201.19	35.02	5912.49	6.64	3178.76
18.06	8201.19	34.65	6039.64	5.90	3433.06
18.43	8137.62	34.29	6103.21	4.42	3433.06
22.49	8137.62	30.23	6103.21	2.58	2797.31
22.86	8074.04	29.86	6039.64	2.40	2670.16
26.54	8074.04	29.49	6103.21	1.66	2415.86
26.91	8137.62	29.12	6039.64	1.11	2543.01
27.28	8074.04	28.76	6039.64	0.37	2797.31
27.65	8137.62	28.39	5976.06	0.00	3051.61
29.49	8137.62	22.86	5976.06	0.00	3687.36
29.86	8074.04	22.49	5912.49	0.37	3941.66
30.60	8074.04	20.65	5276.74	1.11	4195.96
30.97	8010.47	20.09	4895.29	1.47	4450.26
35.02	8010.47	20.09	4768.14	2.95	4958.86
35.39	7946.89	19.35	4259.53	3.13	5086.01
35.76	7946.89	18.25	3878.08	3.13	5213.16
37.97	7565.44	17.88	3623.78	4.79	5785.34
39.82	7565.44	17.14	3496.63	5.16	5848.91
39.82	7501.87	16.77	3496.63	5.53	5976.06
40.00	7374.72	16.41	3433.06	5.71	6103.21
40.00	6484.67	13.09	2288.71	5.71	6230.36
39.45	6230.36	12.90	2161.56	6.82	6675.39
39.45	6103.21	12.53	2097.98		

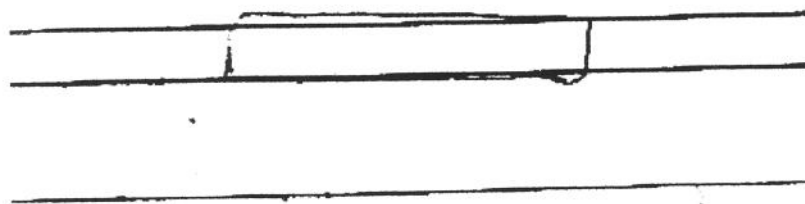
Carta Dinamométrica do Poço 21

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
8.12	5405.24	25.39	1901.84
8.12	5505.34	24.70	2102.04
8.29	5605.43	24.01	2202.13
9.15	5855.68	22.97	2202.13
9.50	5905.73	22.63	2252.18
10.88	5905.73	22.28	2252.18
11.57	5705.53	21.94	2302.23
11.92	5655.48	21.25	2302.23
12.26	5555.39	20.90	2252.18
12.95	5455.29	20.21	2252.18
13.99	5155.00	19.17	1951.89
14.34	5104.95	18.83	1901.84
15.03	4904.76	17.79	1901.84
15.37	4854.71	17.45	1851.80
16.41	4854.71	15.72	1851.80
17.10	4954.80	15.37	1801.75
17.62	5004.85	14.68	1801.75
18.65	5155.00	13.99	1901.84
19.69	5155.00	13.13	2152.09
20.04	5205.05	12.78	2202.13
20.38	5205.05	11.75	2202.13
20.73	5255.09	11.40	2252.18
21.25	5355.19	8.64	2252.18
21.94	5355.19	7.25	2051.99
22.28	5305.14	3.80	2001.94
23.66	5305.14	3.45	2102.04
24.01	5355.19	3.11	2152.09
24.70	5255.09	2.76	2152.09
37.31	5255.09	2.07	2252.18
37.65	5155.00	1.04	2252.18
38.00	4954.80	0.69	2302.23
36.45	3853.74	0.00	2452.38
35.93	3703.59	0.00	2652.57
35.58	3503.40	0.17	2752.67
35.24	3453.35	1.90	3253.15
28.33	1451.41	2.76	3753.64
27.29	1451.41	2.76	3853.74
26.08	1801.75	6.74	4954.80
		8.12	5405.24

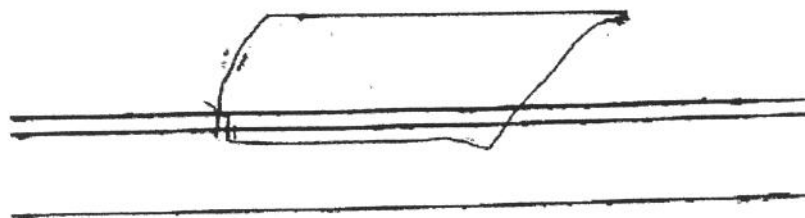
Carta Dinamométrica do Poço 22

Posição (in)	Carga (lbf)	Posição (in)	Carga (lbf)
6.29	5161.76	15.09	2483.49
6.65	5113.07	14.55	2288.71
10.96	5113.07	14.19	2337.40
11.68	4966.98	13.47	2337.40
12.04	5015.67	13.11	2386.10
21.38	5015.67	11.68	2386.10
21.74	4966.98	11.32	2337.40
27.84	4966.98	10.96	2337.40
28.56	4869.59	10.60	2386.10
28.92	4869.59	10.24	2386.10
29.28	4918.28	9.88	2483.49
29.64	4869.59	9.16	2580.88
30.00	4869.59	7.37	2580.88
30.00	4041.76	7.01	2629.58
29.10	3798.28	5.57	2629.58
29.10	3700.89	5.21	2580.88
28.92	3603.49	1.26	2580.88
26.05	2824.36	0.90	2629.58
26.05	2726.97	0.54	2629.58
25.33	2532.18	0.18	2726.97
25.15	2434.79	0.00	2824.36
24.43	2240.01	0.00	2921.75
24.07	2191.31	0.36	3019.14
21.92	2191.31	0.54	3116.53
21.20	2288.71	1.98	3506.10
19.76	2678.27	1.98	3603.49
18.68	2678.27	2.16	3700.89
18.32	2726.97	2.16	3895.67
17.96	2678.27	2.51	3993.06
16.17	2678.27	2.34	4090.45
15.81	2629.58	4.67	4772.19
15.45	2532.18	6.29	5161.76

ANEXO 4
CARTAS DINAMOMÉTRICAS ORIGINAIS



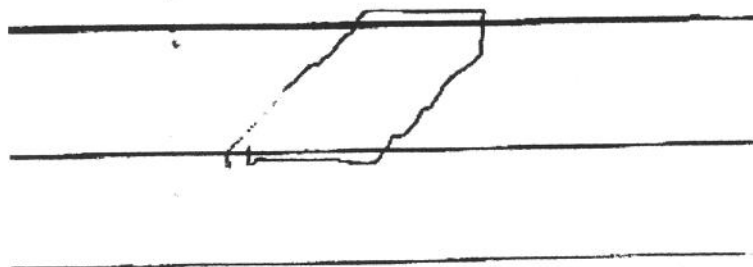
Poço 01



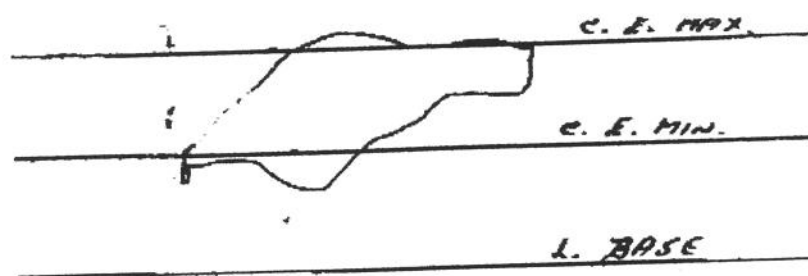
Poço 02



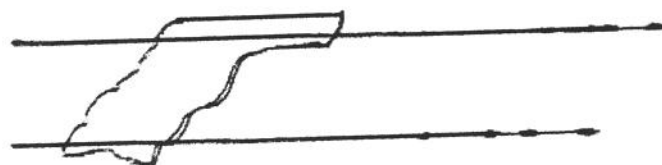
Poço 03



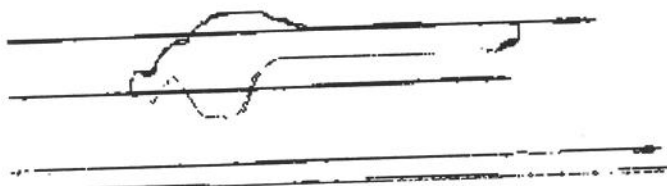
Poço 04



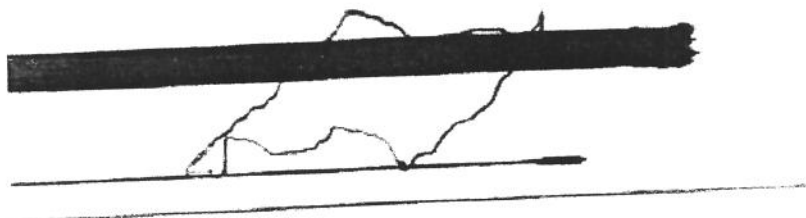
Poço 05



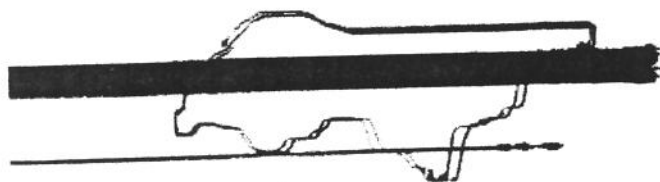
Poço 06



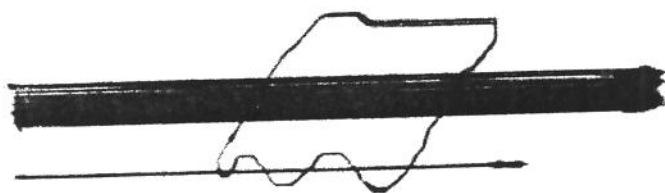
Poço 07



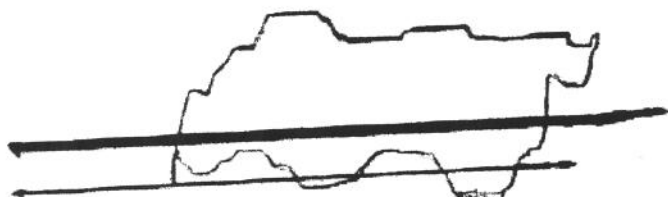
Poço 08



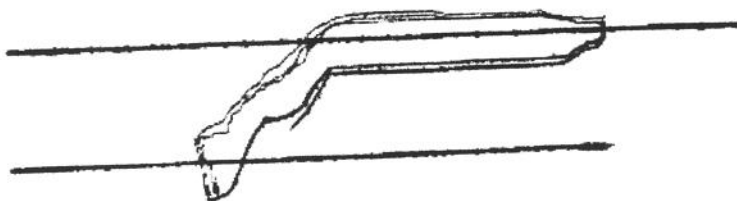
Poço 09



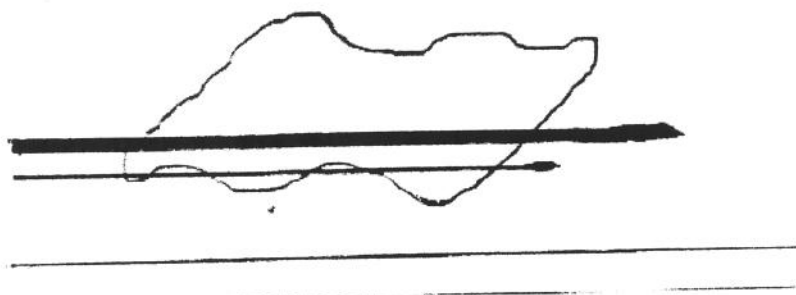
Poço 10



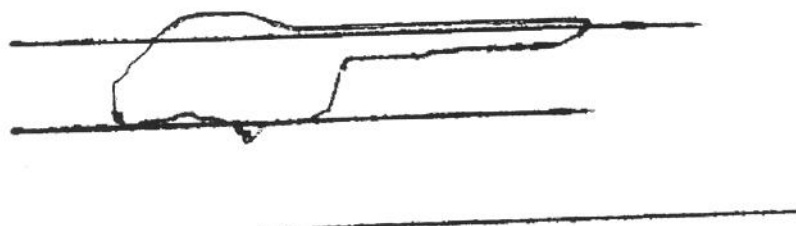
Poço 11



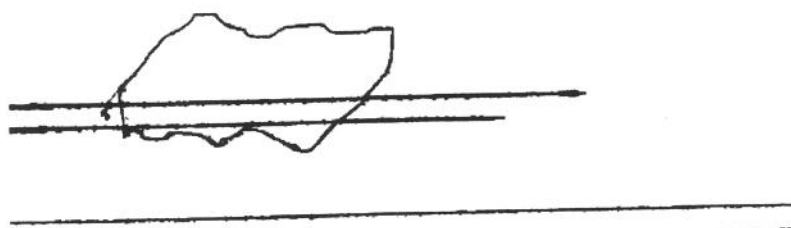
Poço 12



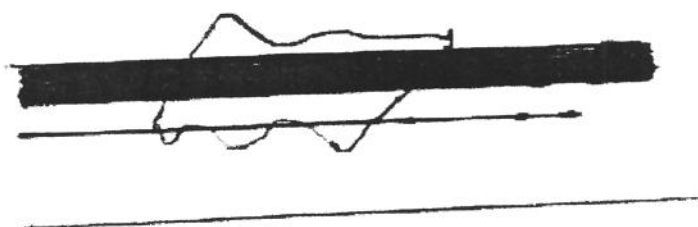
Poço 13



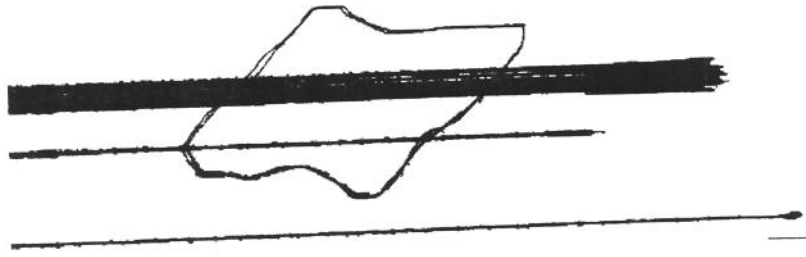
Poço 14



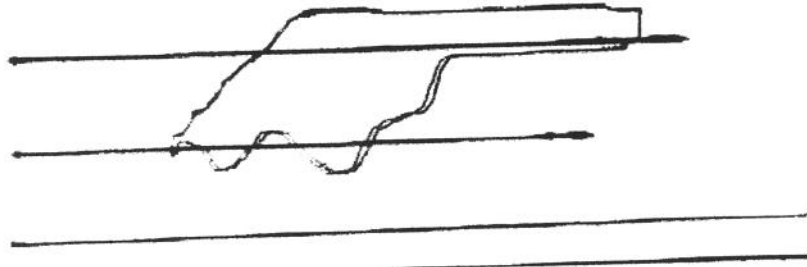
Poço 15



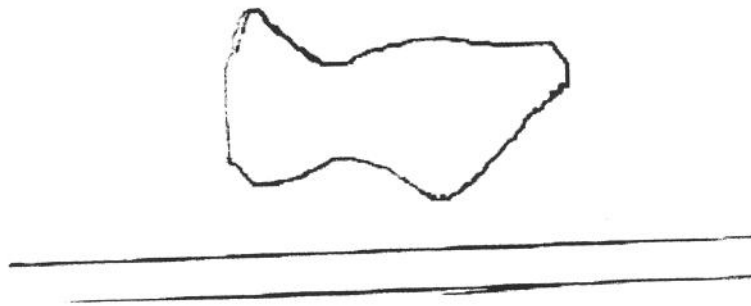
Poço 16



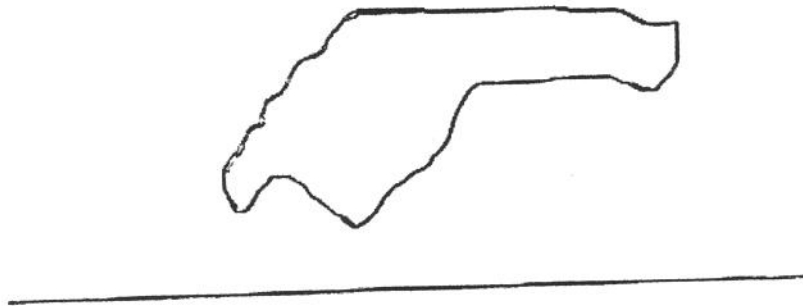
Poço 17



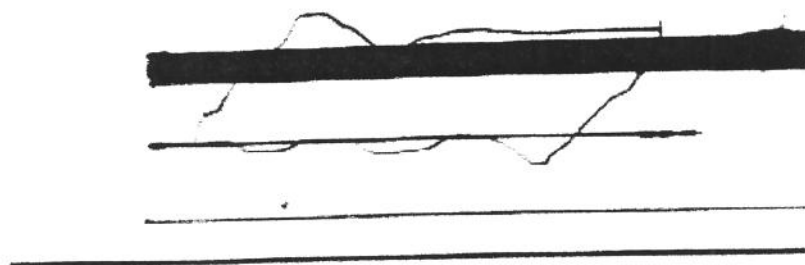
Poço 18



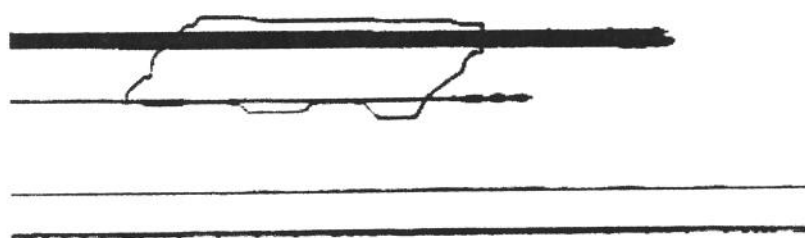
Poço 19



Poço 20



Poço 21



Poço 22

ANEXO 5

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE EVCHENKO E ZAKHARCHENKO

Trecho com Ganho de Inclinação

Neste caso $\phi_i > \phi_{i+1}$ na Figura 3.1.

Suponha-se um elemento da coluna de hastes. Havendo tração suficiente, o contato da mesma com a coluna de tubos se dá na parte interna da curvatura, tanto no curso ascendente quanto no curso descendente. As forças agindo num elemento da coluna durante o curso ascendente estão representadas na Fig. A.1.

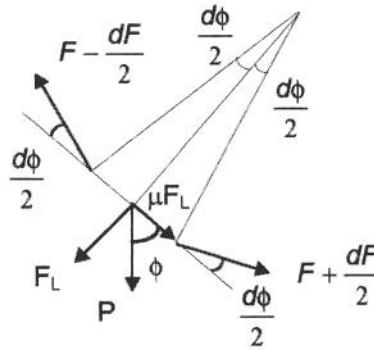


Fig. A.1 Trecho com Ganho de Inclinação

Desprezando-se os efeitos de vibração da coluna, as seguintes equações de equilíbrio podem ser escritas:

$$F_L + P \sin \phi = \left(F - \frac{dF}{2} \right) \sin \frac{d\phi}{2} + \left(F + \frac{dF}{2} \right) \sin \frac{d\phi}{2}$$

$$\mu F_L + P \cos \phi = \left(F - \frac{dF}{2} \right) \cos \frac{d\phi}{2} - \left(F + \frac{dF}{2} \right) \cos \frac{d\phi}{2}$$

Multiplicando-se a primeira equação por μ e subtraindo-se a segunda da primeira, tem-se:

$$P d\phi (\mu \sin \phi - \cos \phi) = 2\mu F \sin \frac{d\phi}{2} + dF \cos \frac{d\phi}{2}$$

Agora fazendo $\sin \frac{d\phi}{2} \approx \frac{d\phi}{2}$ e $\cos \frac{d\phi}{2} \approx 1$, temos:

$$P d\phi (\mu \sin \phi - \cos \phi) = \mu F d\phi + dF \text{ ou}$$

$$P (\mu \sin \phi - \cos \phi) = \mu F + \frac{dF}{d\phi}, \text{ ou ainda:}$$

$$P (\mu \sin \phi - \cos \phi) = \frac{1}{e^{\mu\phi}} \frac{d}{d\phi} (F e^{\mu\phi})$$

Agora integrando-se entre ϕ_{i+1} e ϕ_i , rearrumando-se os termos, e substituindo-se P por $\rho_r A_r \Delta L_m g$, tem-se:

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_i - \phi_{i+1})(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \text{sen} \phi_i - \text{sen} \phi_{i+1} \right] \right. \\ \left. + 2\mu \left[e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \cos \phi_i - \cos \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})}$$

Seguindo procedimento análogo, temos a seguinte expressão para o curso descendente:

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_i - \phi_{i+1})(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \text{sen} \phi_i - \text{sen} \phi_{i+1} \right] \right. \\ \left. - 2\mu \left[e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \cos \phi_i - \cos \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})}$$

Trecho com Perda de Inclinação

Neste caso $\phi_i < \phi_{i+1}$ na Figura 3.1.

Suponha-se um elemento da coluna de hastes. Havendo tração suficiente, o contato da mesma com a coluna de tubos se dá na parte interna da curvatura, tanto no curso ascendente quanto no curso descendente. As forças agindo num elemento da coluna estão representadas na Fig. A.2.

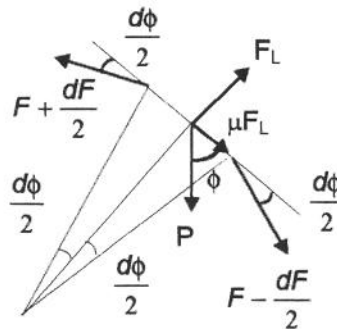


Fig. A.2 Trecho com Perda de Inclinação

Desprezando-se os efeitos de vibração da coluna, as seguintes equações de equilíbrio podem ser escritas:

$$F_L - P \text{sen} \phi = \left(F - \frac{dF}{2} \right) \text{sen} \frac{d\phi}{2} + \left(F + \frac{dF}{2} \right) \text{sen} \frac{d\phi}{2}$$

$$\mu F_L + P \cos \phi = \left(F + \frac{dF}{2} \right) \cos \frac{d\phi}{2} - \left(F - \frac{dF}{2} \right) \cos \frac{d\phi}{2}$$

Multiplicando-se a primeira equação por μ e subtraindo-se a segunda da primeira, tem-se:

$$P d\phi (\mu \sin \phi + \cos \phi) = -2\mu F \sin \frac{d\phi}{2} + dF \cos \frac{d\phi}{2}$$

Agora fazendo $\sin \frac{d\phi}{2} \approx \frac{d\phi}{2}$ e $\cos \frac{d\phi}{2} \approx 1$, temos:

$$P d\phi (\mu \sin \phi + \cos \phi) = -\mu F d\phi + dF \text{ ou}$$

$$P (\mu \sin \phi + \cos \phi) = -\mu F + \frac{dF}{d\phi}, \text{ ou ainda:}$$

$$P (\mu \sin \phi + \cos \phi) = \frac{1}{e^{-\mu\phi}} \frac{d}{d\phi} (F e^{-\mu\phi})$$

Agora integrando-se entre ϕ_{i+1} e ϕ_i , rearrumando-se os termos, e substituindo-se P por $\rho_r A_r \Delta L_m g$, tem-se:

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_{i+1} - \phi_i)(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[-e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \sin \phi_i + \sin \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{-\mu(\phi_i - \phi_{i+1})}$$

Seguindo procedimento análogo, temos a seguinte expressão para o curso descendente:

$$F_{Si+1} = \frac{\rho_r A_r \Delta L_m g}{(\phi_{i+1} - \phi_i)(1 + \mu^2)} \left\{ (1 - \mu^2) \left[-e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})} \sin \phi_i + \sin \phi_{i+1} \right] \right\} + F_{Si} e^{\mu(\phi_i - \phi_{i+1})}$$

ANEXO 6

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO DE LEA MODIFICADO

Dedução do Termo de Atrito Viscoso

A dedução completa pode ser encontrada nos textos de Pavlick, 1981; Alhanati, 1988; Lea, 1990; e Barreto Filho, 1993, porém com nomenclaturas próprias de cada autor.

Consideremos a representação abaixo de um escoamento anular monofásico, incompressível, completamente desenvolvido de um fluido newtoniano:

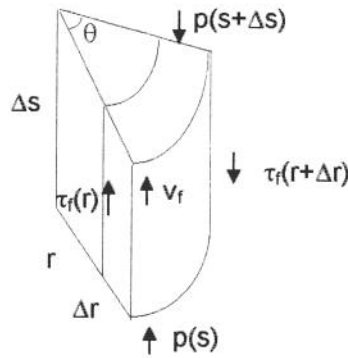


Figura A.3. Escoamento no Anular Haste-tubo

O equilíbrio das forças no elemento nos fornece:

$$\tau_r(r)\theta r\Delta s - \tau_r(r+\Delta r)\theta\Delta s(r+\Delta r) - P(s+\Delta s)r\theta\Delta r + P(s)r\theta\Delta r = 0$$

onde τ_r é a tensão de cisalhamento no fluido.

Dividindo-se por $\Delta s\Delta r$ e tomando-se o limite quando Δs e Δr tendem a zero, vem:

$$r \frac{\partial p}{\partial s} = -\frac{\partial(\tau_r r)}{\partial r}$$

Para o escoamento em análise, temos:

$$\tau_r = -\eta \frac{\partial v_r}{\partial r}$$

Logo:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial s}$$

O valor de v_r será dado pela solução desta equação com as condições de contorno $v_r(r_i) = v_r$ e $v_r(r_t) = 0$. Esta solução é:

$$v_r = Ar^2 + B \ln r + C$$

onde:

$$A = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial s} \quad B = \frac{v_r + A(r_t^2 - r_r^2)}{\ln\left(\frac{r_r}{r_t}\right)} \quad \text{e} \quad C = -Ar_t^2 - B \ln r_t$$

Portanto,

$$\tau_r = -\eta \left(2Ar + \frac{v_r + A(r_r^2 - r_t^2)}{r \ln \frac{r_r}{r_t}} \right) \quad (*)$$

A velocidade média do fluido na seção é:

$$\bar{v}_r = \frac{1}{\pi(r_t^2 - r_r^2)} \int_{r_r}^{r_t} \int_0^{2\pi} v_r r d\theta dr, \text{ ou}$$

$$\bar{v}_r = \frac{(r_t^2 - r_r^2)v_r + (r_t^4 - r_r^4)A \ln \frac{r_r}{r_t} + A(r_t^2 - r_r^2)^2 + 2r_r^2 v_r \ln \frac{r_r}{r_t}}{2(r_t^2 - r_r^2) \ln \frac{r_r}{r_t}}$$

Daí, segue:

$$A = \frac{-2(r_t^2 - r_r^2) \ln \frac{r_r}{r_t} \bar{v}_r - \left[(r_t^2 - r_r^2) + 2r_r^2 \ln \frac{r_r}{r_t} \right] v_r}{(r_t^4 - r_r^4) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2)^2}$$

Substituindo o valor de A em (*) e avaliando $\tau_r(r_r)$, podemos escrever:

$$\tau_r(r_r) = -\eta(K_1 v_r - K_2 \bar{v}_r), \text{ onde:}$$

$$K_1 = \frac{(r_t^4 - r_r^4) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2)^2 - \left[2r_r^2 \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2) \right]^2}{r_r \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) \left[(r_t^4 - r_r^4) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2)^2 \right]} \quad \text{e}$$

$$K_2 = \frac{2(r_t^2 - r_r^2) \left[2r_r^2 \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2) \right]}{r_r \left[(r_t^4 - r_r^4) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2)^2 \right]}$$

A tensão que atua nas hastes (τ) é de mesmo módulo mas de sentido contrário à tensão no fluido $\tau(r_r)$, logo:

$$\tau = \eta(K_1 v_r - K_2 \bar{v}_r)$$

c.q.d.

Cálculo da Perda de Carga por Fricção no Anular Haste-Tubo

$$\text{Como vimos } A = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial s} = \frac{-2(r_t^2 - r_r^2) \ln \frac{r_r}{r_t} \bar{v}_r - \left[(r_t^2 - r_r^2) + 2r_r^2 \ln \frac{r_r}{r_t} \right] v_r}{(r_t^4 - r_r^4) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2)^2}$$

Logo, podemos escrever $\left(\frac{\partial p_r}{\partial s} \right)_k = -4\eta(K_3 \bar{v}_{rk} + K_4 v_r)$, onde:

$$K_3 = \frac{2(r_t^2 - r_r^2) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right)}{(r_t^4 - r_r^4) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2)^2} \text{ e}$$

$$K_4 = \frac{(r_t^2 - r_r^2) + 2r_r^2 \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right)}{(r_t^4 - r_r^4) \ln \left(\frac{r_r}{r_t} \right) + (r_t^2 - r_r^2)^2}$$

c.q.d.

Cálculo da Velocidade Média do Fluido

Consideremos a Fig. A.4. representativa de um escoamento de fluido incompressível no espaço anular haste-tubo para uma coluna de hastes combinadas:

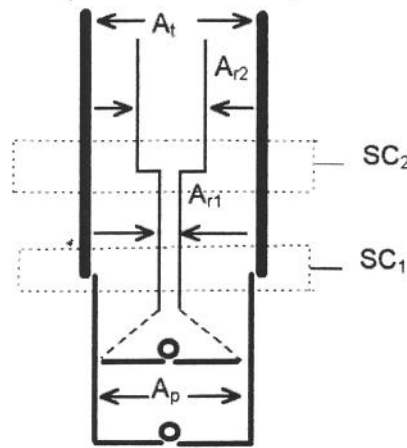


Fig. A4. Escoamento no Anular Haste-Tubo

Consideremos inicialmente que o pistão se desloca para cima. Neste caso, a velocidade do fluido no interior da bomba é a mesma do pistão. Porém, devido a área da camisa da bomba não ser a mesma do tubing, temos uma mudança na velocidade do fluido ao passar do anular haste-camisa para o anular haste-tubo. A conservação da massa de um fluido incompressível é equivalente à conservação de volume. Assim, se aplicarmos a conservação de massa no volume de controle definido pela superfície SC_1 , podemos calcular a velocidade do fluido no anular formado pela primeira seção de hastes e a tubulação de produção por:

$$\bar{v}_{f1} = \frac{v_p (A_p - A_{r1})}{(A_t - A_{r1})}$$

Seguindo o mesmo procedimento para a superfície SC_2 e admitindo o movimento médio da coluna de hastes como aproximadamente igual ao do pistão, teremos:

$$\bar{v}_{f2} = \frac{v_p (A_p - A_{r2})}{(A_t - A_{r2})}$$

Para a seção de índice k teríamos:

$$\bar{v}_{fk} = \frac{v_p (A_p - A_{rk})}{(A_t - A_{rk})}$$

Agora consideremos que o pistão está descendo. Neste caso, a válvula de passeio está aberta e a de pé fechada. O volume de líquido que escoar de baixo

para cima no interior da camisa é simplesmente o volume de haste que penetra na bomba. Assim a velocidade do fluido no interior da bomba será:

$$\bar{v}_{fb} = \frac{-v_p A_{r1}}{(A_p - A_{r1})}$$

Já a velocidade do fluido no anular formado pela primeira seção de hastes e a tubulação pode ser calculada pelo balanço de volume de fluido no interior da superfície de controle SC_1 :

$$\bar{v}_{f2} = \frac{-v_p A_{r2}}{(A_t - A_{r2})}$$

Para a seção de índice k , teríamos:

$$\bar{v}_{fk} = \frac{-v_p A_{rk}}{(A_t - A_{rk})}$$

Em resumo, podemos escrever:

$$\bar{v}_{fk} = \begin{cases} -v_p \frac{A_{rk}}{A_t - A_{rk}}, & \text{se } v_p < 0 \\ v_p \frac{A_p - A_{rk}}{A_t - A_{rk}}, & \text{se } v_p \geq 0 \end{cases}$$

c.q.d.

ANEXO 7

DEDUÇÃO DE EXPRESSÕES UTILIZADAS NO MODELO PROPOSTO

Variação da Pressão no Interior da Bomba de Fundo com o Deslocamento do Pistão

Esta dedução é análoga a apresentada por Alhanati (1988).

Consideremos a Fig. 4.4 que representa a operação da bomba de fundo. Conforme vimos no Capítulo IV, a distância entre as válvulas num instante de tempo qualquer é dada por:

$$L_b(t) = u(0,t) + e_m - e_t(t)$$

onde:

$$e_t(t) = \frac{[p_b(0) - p_b(t)] D_b A_p i_{anc}}{E_t A_t}$$

$$\text{Logo: } dL_b = du + \frac{D_b A_p i_{anc}}{E_t A_t} dp_b \quad (*)$$

Chamemos de V_g , V_l , e V_b os volumes de gás, líquido e volume total da bomba, respectivamente. Então:

$$V_b = V_g + V_l$$

Se as válvulas de passeio e pé estiverem fechadas a massa de fluido no interior da bomba permanece constante:

$$dV_b = dV_g + dV_l$$

Se considerarmos um processo isotérmico ocorrendo durante o deslocamento do pistão, podemos escrever:

$$dV_b = -k_L V_l dp_b - \frac{V_g}{\rho_b} dp_b$$

Se definirmos $\alpha = \frac{V_g}{V_b}$, então:

$$dV_b = -k_L (1 - \alpha) V_b dp_b - \frac{V_b \alpha}{\rho_b} dp_b$$

Mas $V_b = A_p L_b$ e $dV_b = A_p dL_b$. Assim,

$$A_p dL_b = -k_L (1 - \alpha) A_p L_b dp_b - \frac{A_p L_b \alpha}{\rho_b} dp_b \quad (**)$$

Substituindo (*) em (**) vem:

$$du + \frac{D_b A_p i_{anc}}{E_t A_t} dp_b = -k_L (1 - \alpha) L_b dp_b - \frac{L_b \alpha}{\rho_b} dp_b$$

Agora rearrumando os termos, segue:

$$\frac{dp_b}{du} = -\frac{1}{\frac{D_b A_p j_{anc}}{E_t A_t} + k_L L_b (1 - \alpha) + \frac{L_b \alpha}{\rho_b}} \text{ com } p_s < p_b(t) < p_d(t)$$

c.q.d.

Esquema de Diferenças Finitas para Determinação da Força e Velocidade das Hastes

O sistema de equações diferenciais a ser resolvido é:

$$\frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho_r A_r} \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} + \bar{g} \cdot \bar{T}(s) - \mu \frac{v_r(s,t)}{|v_r(s,t)|} \sqrt{[\bar{g} \cdot \bar{B}(\zeta)]^2 + [\bar{g} \cdot \bar{N}(\zeta) + |\bar{K}(\zeta)| \frac{F_s(s,t)}{\rho_r A_r}]^2} + \frac{f_v(s,t)}{\rho_r A_r}$$

$$\frac{\partial v_r(s,t)}{\partial s} = \frac{1}{E_r A_r} \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial t}$$

A discretização da segunda equação é imediata e segue o esquema de Laine et alii (1990):

$$F_{sl}^{j+1} = \frac{E_r A_r}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{n+1}^{j+1} - v_{n-1}^{j+1}) + F_{sl}^j$$

A discretização da segunda equação depende do modelo para o termo de atrito viscoso adotado.

Modelo 3D c/ Termo de Atrito Viscoso de Gibbs

A EDP correspondente é:

$$\frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho_r A_r} \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} + \bar{g} \cdot \bar{T}(s) - \mu \frac{v_r(s,t)}{|v_r(s,t)|} \sqrt{[\bar{g} \cdot \bar{B}(\zeta)]^2 + [\bar{g} \cdot \bar{N}(\zeta) + |\bar{K}(\zeta)| \frac{F_s(s,t)}{\rho_r A_r}]^2} - c v_r(s,t)$$

O esquema de diferenças finitas é:

$$\frac{v_n^{j+1} - v_n^j}{\Delta t} = \frac{1}{\rho_r A_r} \frac{F_{sl+1}^j - F_{sl-1}^j}{2 \Delta s} + \bar{g} \cdot \bar{T}_i + \frac{f_{cl}^j}{\rho_r A_r} - c \frac{v_n^{j+1} + v_n^j}{2}$$

Explicitando v_n^{j+1} , vem:

$$v_n^{j+1} = \frac{\frac{\Delta t}{\rho_r A_r \Delta s} (F_{si+1}^j - F_{si-1}^j) + 2\bar{g} \cdot \bar{T}_i \Delta t + \frac{2f_{ci}^j \Delta t}{\rho_r A_r} + (2 - c\Delta t)v_n^j}{2 + c\Delta t}$$

onde:

$$\frac{f_{ci}^j}{\rho_r A_r} = -\mu \frac{v_n^j}{|v_n^j|} \sqrt{(\bar{g} \cdot \bar{B}_i)^2 + \left(\bar{g} \cdot \bar{N}_i + |\bar{K}_i| \frac{F_{si}^j}{\rho_r A_r} \right)^2}$$

Modelo 3D c/ Termo de Atrito Viscoso de Lea

A EDP correspondente é:

$$\frac{\partial v_r(s,t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho_r A_r} \frac{\partial F_s(s,t)}{\partial s} + \bar{g} \cdot \bar{T}(s) - \mu \frac{v_r(s,t)}{|v_r(s,t)|} \sqrt{[\bar{g} \cdot \bar{B}(s)]^2 + [\bar{g} \cdot \bar{N}(s) + |\bar{K}(s)| \frac{F_s(s,t)}{\rho_r A_r}]^2} - \frac{\eta U_{rk}}{\rho_r A_{rk}} (K_1 v_r - K_2 \bar{v}_{rk})$$

O esquema de diferenças finitas é:

$$\frac{v_n^{j+1} - v_n^j}{\Delta t} = \frac{1}{\rho_r A_r} \frac{F_{si+1}^j - F_{si-1}^j}{2\Delta s} + \bar{g} \cdot \bar{T}_i + \frac{f_{ci}^j}{\rho_r A_r} - \frac{\eta_i U_r K_1}{\rho_r A_r} \frac{v_n^{j+1} + v_n^j}{2} + \frac{\eta_i U_r K_2}{\rho_r A_r} v_r^j$$

Explicitando v_n^{j+1} , vem:

$$v_n^{j+1} = \frac{\frac{\Delta t}{\rho_r A_r \Delta s} (F_{si+1}^j - F_{si-1}^j) + 2\bar{g} \cdot \bar{T}_i \Delta t - \frac{2f_{ci}^j \Delta t}{\rho_r A_r} + \left(2 - \frac{\eta_i U_r K_1}{\rho_r A_r} \Delta t \right) v_n^j + 2 \frac{\eta_i U_r K_2 \Delta t}{\rho_r A_r} v_r^j}{2 + \frac{\eta_i U_r K_1}{\rho_r A_r} \Delta t}$$

ANEXO 8
FATORES DE CONVERSÃO

Para converter	Em	Multiplicar por
cp	Pa.s	1.0E+3
grau Fahrenheit	grau Celsius	$T_C = (T_F - 32) / 1.8$
ft	m	0.3048
hp	W	745.7
in	m	2.54E-2
lbm	kg	0.4535924
lbf	N	4.448222
lbf.in	N.m	1.129848E-1
psi	Pa	6.894757E+3
bbl	m ³	1.589873E-1