



**Carolina Pontes Chieza**

**Diagnósticos de problemas operacionais durante a  
perfuração de poços de petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga  
Co-orientador: Prof. João Carlos Ribeiro Plácido

Rio de Janeiro  
Outubro de 2011



**Carolina Pontes Chieza**

**Diagnósticos de problemas operacionais durante a  
perfuração de poços de petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Arthur Martins Barbosa Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. João Carlos Ribeiro Plácido**

Co-Orientador

PETROBRAS

**Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Sebastião de Andrade Loureiro**

PETROBRAS

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de outubro de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

## Carolina Pontes Chieza

Graduou-se em Engenharia de Produção na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ (2004). Pós-graduada em Engenharia de Petróleo na PUC-RJ (2006). Mestre em Engenharia Mecânica com ênfase em Petróleo e Energia pela PUC-RJ (2011). Trabalhou como consultora de perfuração na Landmark/Halliburton (2006-2011). Atua como engenheira de petróleo na Statoil desde 2011.

### Ficha Catalográfica

Chieza, Carolina Pontes

Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo /, Carolina Pontes Chieza; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga; co-orientador: João Carlos Ribeiro Plácido. – 201.

151 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Perfuração. 3. Torque. 4. Arraste. 5. Hidráulica. 6. Problemas operacionais. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Plácido, João Carlos Ribeiro. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho as pessoas mais importantes da minha vida: minha mãe Elza e meu pai Wanderley. Obrigada pelo enorme apoio, compreensão, carinho e amor.

## Agradecimentos

A Deus por me permitir desfrutar desta vida com muita saúde, alegria, proteção e bênção.

Aos meus pais por serem pessoas tão especiais e maravilhosas, sempre presentes em todas as horas, me dando muita força, incentivo e amor para superar todos os obstáculos, além de serem um exemplo de vida de grandes conquistas e realizações.

Ao meu noivo pela enorme compreensão, companheirismo, amizade, paciência, carinho, amor e pelas conquistas alcançadas nestes oito anos de relacionamento, fundamentais para me dar força neste momento tão importante.

Ao eterno professor e amigo Luiz Alberto Rocha pelo constante apoio e estímulo ao longo de minha vida acadêmica e profissional e pela inestimável ajuda na elaboração deste trabalho, sendo um dos grandes idealizadores e responsáveis pela conclusão do mesmo.

Ao professor e orientador Arthur Braga pelo apoio e orientação ao longo do mestrado e, principalmente, na elaboração do trabalho.

Ao professor e coorientador João Carlos Plácido pela compreensão, ajuda, disponibilidade, confiança, orientação e experiência que colaboraram muito para o término do trabalho.

Ao grande amigo Marcelo Carvalho pela eterna amizade, compreensão, paciência e ajuda em todos os momentos, sempre.

Aos companheiros de trabalho e amigos Luis Nieto, Sebastião Loureiro, Thais José e Juan Acosta pelo enorme apoio e ajuda na elaboração deste trabalho.

Ao Renato Amaro e Luis Felipe Carneiro pela credibilidade, ajuda e troca de experiência e conhecimento.

A Silvana Sobral por todo o cuidado, a paciência e o suporte, fundamentais para me deixar tranquila e forte o suficiente para correr atrás dos meus objetivos.

Aos demais amigos e familiares que direta ou indiretamente ajudaram nesta importante conquista em minha vida.

Muito obrigada a todos!

## Resumo

Chieza, Carolina Pontes; Braga, Arthur Martins Barbosa (Orientador); Plácido, João Carlos Ribeiro (Co-orientador). **Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo**. Rio de Janeiro, 2011. 151p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A perfuração de poços de petróleo é uma operação complexa e de elevado risco e custo financeiro. Com o passar dos anos o número de poços horizontais e de longo alcance perfurados aumentou consideravelmente devido à existência de reservatórios mais profundos e de difícil acesso, além da necessidade de se obter uma melhor eficiência na extração do petróleo. Juntamente com este aumento na complexidade da perfuração surgiram problemas operacionais que, por muitas vezes, não são identificados e acabam sendo responsáveis pela maior parte do tempo não produtivo da operação elevando, assim, seus custos diários. Logo, o estudo destes problemas é de extrema importância para se garantir condições seguras de operação, além de contribuir para a otimização da mesma, mitigação dos efeitos causados e uma maior rapidez e eficácia nas tomadas de decisões. O presente trabalho apresenta uma metodologia de identificação de problemas operacionais a fim de otimizar a perfuração de poços, através da utilização de recursos computacionais, para gerar análises de previsão de torque, arraste e hidráulica e, posterior, comparação com os dados de perfuração obtidos, em tempo real, dos sensores de *mudlogging* e da ferramenta de PWD. A caracterização dos problemas foi realizada com base nos dados reais de poços horizontais, perfurados na Bacia de Campos, mediante a identificação de possíveis desvios importantes, que não estavam previstos, nos parâmetros de perfuração. Através da retro-análise dos dados de perfuração dos poços foi possível diagnosticar alguns problemas operacionais ocorridos durante esta operação, tais como: perda de circulação, prisão da coluna de perfuração, *washout* no tubo de perfuração e dificuldade de avanço causada por uma limpeza deficiente, pelo encrramento da broca e pela vibração na coluna de perfuração. Além disso, foram destacados também alguns exemplos que mostraram variações na tendência do torque em função de mudança na litologia do poço.

## Palavras-chave

Perfuração; Torque; Arraste; Hidráulica; Problemas Operacionais.

## Abstract

Chieza, Carolina Pontes; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor); Plácido, João Carlos Ribeiro (Co-Advisor). **Diagnostics of operational problems during oil well drilling**. Rio de Janeiro, 2011. 151p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Drilling is a complex and a high risk process which involves high financial cost. Over the years the number of horizontal wells and extended reach wells increased, due to the existence of deeper reservoirs, which are more difficult to access, in addition to the need of having an improvement in the oil production efficiency. Along with this increased complexity of drilling, unidentified operational problems end up being responsible for most of the non-productive time and daily cost increase. Thus, analyzing such problems it is very important to ensure safe operating conditions, optimize drilling operation, control causes/effects and have a faster and efficient decision-making capability. This paper presents a methodology to identify operational problems in order to optimize drilling operation using computer resources to predict torque, drag and hydraulic effects and later on to compare with the drilling data obtained in real time from mudlogging sensors and PWD (Pressure While Drilling). Cases were based on real time data from horizontal wells drilled in Campos Basis, Rio de Janeiro, and the problems were identified with unforeseen changes in drilling parameters trend. After studying the available well data, it was possible to diagnose several operational problems occurred during drilling, such as: lost circulation, stuck pipe, drill pipe washout and difficulty in drilling due to a poor hole cleaning, bit balling and drill string stick-slip vibration. In addition, it was also highlighted some examples that showed variations in the torque trend due to lithology changes.

## Keywords

Drilling; Torque; Drag; Hydraulics; Operational Problems.

## Sumário

1. Introdução	16
1.1. Panorama Geral	16
1.2. Objetivo	18
1.3. Estrutura do Trabalho	18
2. Revisão Bibliográfica	20
2.1 Perfuração de Poços	20
2.2. Perfuração Direcional	21
2.3. Acompanhamento da perfuração em tempo real	24
2.3.1. Centros de Suporte à Decisão (CSD)	24
2.3.2. Fluxo da Informação e Confiabilidade dos Dados	26
2.4. Benefícios do Monitoramento de Torque e Arraste	28
2.5. Benefícios do Monitoramento de Hidráulica	31
2.6. Previsão de problemas operacionais baseados nos dados de campo	39
3. Modelo de Torque e Arraste	43
3.1. Conceitos Básicos de Torque e Arraste	45
3.1.1. Torque	45
3.1.2. Arraste	47
3.1.3. Força Normal ou Força Lateral	47
3.1.4. Fator de Fricção ou Atrito	48
3.1.5. Flambagem	49
4. Descrição do Modelo de Hidráulica	50
4.1. Conceitos Básicos de Hidráulica	50
4.1.1. Hidráulica	50
4.1.2. Limpeza de poço	52
4.1.3. Fluido de Perfuração e Reologia	54
5. Problemas Operacionais e suas causas	58
5.1. Influxos de Fluidos Indesejados ( <i>Kicks</i> )	58
5.2. Perda de Circulação	60
5.3. Prisão da Coluna de Perfuração	60
5.4. Dificuldade de Manobra	61
5.5. Dificuldade de Avanço da Perfuração	64
6. Metodologia para Identificação de Problemas Operacionais	67
6.1. Dados de Perfuração de Poço	67
6.2. Manuseio dos Dados	70
6.2.1. Programas Computacionais Utilizados	71
6.2.2. Etapa de Planejamento	74
6.2.3. Etapa de Acompanhamento da Perfuração	80



7. Resultados e Discussões	84
7.1. Dados de Campo	84
7.2. Descrição dos Poços Utilizados no Estudo	86
7.3. Identificação de Problemas Operacionais	92
7.3.1. Perda de Circulação	92
7.3.2. Prisão da Coluna de Perfuração	95
7.3.3. Dificuldade de Avanço	98
7.3.3.1. Limpeza Deficiente	98
7.3.3.2. Entupimento de jatos	102
7.3.3.3. Vibração Stick-Slip	104
7.3.4. Washout	107
7.3.5. Dificuldade de Manobra	108
7.4. Perfuração sem Anormalidades	110
7.5. Relação Causa-Efeito dos Problemas Operacionais	115
8. Conclusão	118
8.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	120
9. Referências bibliográficas	121
Apêndice A – Modelagem de Torque e Arraste	127
Apêndice B – Modelagem de Hidráulica	140
Apêndice C – Tabelas de Dados de Entrada	151

## Lista de figuras

Figura 1: Esquema de uma sonda de perfuração rotativa	21
Figura 2: Esquema do fluxo da informação em tempo real	27
Figura 3: Gráfico da variação de velocidade de quedas das partículas em função da densidade	33
Figura 4: Tipos de excentricidade da coluna de perfuração	34
Figura 5: Velocidades de fluxo do fluido de perfuração no anular	34
Figura 6: Esforços atuantes na coluna ao longo da trajetória	44
Figura 7: Forças agindo em um pequeno segmento da coluna de perfuração	47
Figura 8: Flambagem senoidal	49
Figura 9: Flambagem helicoidal	49
Figura 10: Dificuldade de limpeza x inclinação	53
Figura 11: Movimento dos cascalhos de acordo com a inclinação do poço	54
Figura 12: Organograma da metodologia da etapa de planejamento	80
Figura 13: Organograma da metodologia da etapa de acompanhamento	83
Figura 14: Vista lateral do poço A	87
Figura 15: Vista superior do poço A	87
Figura 16 - Vista lateral dos poços B e B.1	89
Figura 17: Vista superior dos poços B e B.1	89
Figura 18 - Vista lateral dos poços C, C.1 e C.2	90
Figura 19 - Vista superior dos poços C, C.1 e C.2	91
Figura 20: Esquema do poço A (4894-5236 m)	93
Figura 21: BHA detalhado do poço A (4894-5236 m)	93
Figura 22: Gráficos dos valores medido x previsto de pressão, vazão e ECD do poço A (4894-5236 m)	94
Figura 23: Esquema do poço C (4347-4486 m)	96
Figura 24: BHA detalhado do poço C (4347-4486 m)	96
Figura 25: Gráfico de torque x profundidade medida do poço C (4347-4486 m)	97
Figura 26: Gráficos de ROP, torque, RPM, WOB e pressão do poço C (4347-4486 m)	97
Figura 27: Esquema do poço B.1 (4232-5084 m)	99
Figura 28: BHA detalhado do poço B.1 (4232-5084 m)	99
Figura 29: Gráfico do torque x profundidade medida do poço B.1 (4232-5084 m)	100
Figura 30: Gráficos de ROP, torque, RPM e WOB do poço B.1 (4232-5084 m)	100

Figura 31: Gráficos dos valores previsto x medido de pressão, vazão e ECD, além dos valores de inclinação e <i>dogleg</i> medidos do poço B.1 (4232-5084 m)	101
Figura 32: Esquema do poço B.1 (5084-5700 m)	103
Figura 33: BHA detalhado do poço B.1 (5084-5700 m)	103
Figura 34: Esquema do poço B.1 (3489-4198 m)	104
Figura 35: BHA detalhado do poço B.1 (3489-4198 m)	105
Figura 36: Gráfico de torque x profundidade medida do poço B.1 (3489-4198 m)	105
Figura 37: Gráficos de ROP, torque, RPM e WOB do poço B.1 (3489-4198 m)	106
Figura 38: Gráficos dos valores previsto x medido de pressão, vazão e ECD, além dos valores medidos de inclinação e <i>dogleg</i> do poço A (3465-4222 m)	107
Figura 39: Esquema do poço B (3507-4956 m)	111
Figura 40: BHA detalhado do poço B (3507-4956 m)	111
Figura 41: Gráfico de torque x profundidade medida do poço B (3507-4956 m)	112
Figura 42: Esquema do poço C (2137-2905 m)	114
Figura 43: BHA detalhado do poço C (2137-2905 m)	114
Figura 44: Gráfico de torque x profundidade medida do poço C (2137-2905 m)	114
Figura 45: Cenários <i>loading</i> x <i>unloading</i>	132
Figura 46: Direção das forças de arraste para cada operação	134
Figura 47: Vetores de velocidade do segmento de coluna de perfuração	135
Figura 48: Componentes de velocidade do segmento da coluna de perfuração	135
Figura 49: Fluxo laminar x turbulento no anular	146

## Lista de tabelas

Tabela 1: Fatores de Fricção para o trecho revestido	77
Tabela 2: Informações gerais do poço A	86
Tabela 3: Informações gerais do poço B e B.1	88
Tabela 4: Informações gerais do poço C, C.1 e C.2	90
Tabela 5: Relação causa-efeito de possíveis problemas operacionais que podem ocorrer durante a perfuração de poços	115
Tabela 6: Classe dos tubos e o intervalo de desgaste considerado	128
Tabela 7: Valores da constante B de acordo com o diâmetro do poço	143
Tabela 8: Fatores de correção para os equipamentos de superfície	143
Tabela 9: Números críticos de Reynolds para regime de fluxo laminar e turbulento	147
Tabela 10: Coeficiente de fricção para o trecho revestido	151
Tabela 11: Valores médios considerados de peso na broca e torque na broca	151

## Simbologia e Siglas

$W_{buoy}$	Peso flutuado do segmento
$W_{ar}$	Peso do segmento no ar
$MW_f$	Peso por metro de fluido deslocado
$A_{ext}$	Área externa do tubo
$A_{int}$	Área interna do tubo
$\rho_{an}$	Peso do fluido no anular
$\rho_{int}$	Peso do fluido no interior do tubo
$D_c$	Diâmetro externo do corpo do tubo
$D_{ij}$	Diâmetro externo da conexão
$d_c$	Diâmetro interno do corpo do tubo
$d_{ij}$	Diâmetro interno da conexão
$\theta_c$	Inclinação crítica
$E$	Módulo de Young
$I$	Momento de inércia
$\theta$	Inclinação do poço
$r$	Folga entre a parede do poço e o diâmetro externo da coluna ( <i>clearance</i> )
$\kappa$	Curvatura no plano vertical
$F_s$	Força crítica de flambagem senoidal
$F_h$	Força crítica de flambagem helicoidal
$F_n$	Força lateral ou normal
$F_{ab}$	Força axial no fundo da seção calculada a partir do método <i>Buoyancy</i> Distribuído
$\Delta\alpha$	Variação do azimute ao longo do segmento
$\Delta\theta$	Variação da inclinação do poço ao longo do segmento
$\phi$	Inclinação média do poço no segmento
$L$	Comprimento do segmento
$V_m$	Velocidade de manobra
$\mu$	Coefficiente de fricção
$V$	Velocidade resultante
$V_a$	Velocidade angular
$F_{fundo}$	Força de pressão atuando na base do segmento
$\Delta F_{area}$	Variação na força devido à área de junção de dois componentes com diferentes seções transversais
$F_{BS}$	Força de estabilidade de flambagem
$L_p$	Comprimento do segmento abaixo do ponto neutro
$F_d$	Força de arraste

$F_{adf}$	Força adicional devido à flambagem helicoidal
$\sigma$	Tensão aplicada
$\varepsilon$	Deformação elástica longitudinal do segmento
$F$	Força aplicada
$L_i$	Comprimento inicial do segmento
$\Delta L$	Variação no comprimento do segmento
$m$	Massa do segmento
$r_c$	Raio do segmento da coluna
$A$	Área da seção transversal na qual se exerce a pressão
$r_m$	Raio máximo do corpo do segmento
$\tau_L$	Limite de escoamento
$\mu_p$	Viscosidade plástica
$K$	Fator de consistência
$n$	Índice de comportamento
$\tau_0$	Limite de escoamento real
$P_{sp}$	Pressão de bombeio (no <i>standpipe</i> )
$P_{sup}$	Pressão nos equipamentos de superfície
$P_{dp}$	Pressão no tubo de perfuração
$P_{dc}$	Pressão nos comandos
$P_{dt}$	Pressão nos equipamentos de fundo de poço
$P_b$	Pressão na broca
$P_{an}$	Pressão no anular
$P$	Perda de carga nos equipamentos tubulares, anulares e equipamentos de superfície
$L_{dp}$	Comprimento do tubo de perfuração
$Q$	Vazão de bombeio
$C$	Correção a ser feita de acordo com o tipo de elemento e tipo de anular
$C_{dp}$	Fator de correção para o interior do tubo de perfuração
$d_{dp}$	Diâmetro interno do tubo de perfuração
$d_{idp}$	Diâmetro interno da conexão do tubo de perfuração
$C_{dc}$	Fator de correção para o interior do comando
$d_{dp}$	Diâmetro interno do comando
$C_{anp}$	Fator de correção para o anular dos tubos de perfuração e suas conexões
$D_{OH}$	Diâmetro do poço
$D_{dp}$	Diâmetro externo do corpo do tubo de perfuração
$D_{ij}$	Diâmetro externo da conexão do tubo de perfuração
$B$	Constante
$C_{anc}$	Fator de correção para o anular dos comandos
$D_{dc}$	Diâmetro externo do comando

$\Delta P_b$	Perda de carga na broca
$V_f$	Velocidade do fluido
$C_j$	Coefficiente dos jatos
$g_c$	Gravidade
$P_h$	Varição na pressão hidrostática no ponto de cálculo do ECD
$P_f$	Varição na perda de carga no ponto de cálculo do ECD
$\frac{\Delta P}{\Delta L}$	Varição na pressão por comprimento ao longo da seção do anular
$L_{ma}$	Comprimento medido da seção do anular
$V_{fan}$	Velocidade do fluido no anular
$G_{fa}$	Fator de geometria do modelo de <i>Power Law</i>
$R_e$	Número de Reynolds
$R_{ec}$	Número de Reynolds crítico
$V_c$	Velocidade de fluido crítica
$Q_c$	Vazão crítica
$\tau_p$	Tensão cisalhante da partícula
T	Espessura da partícula
$\gamma_b$	Taxa de tensão crítica da partícula
$d_p$	Diâmetro da partícula
$\gamma_p$	Taxa de tensão de cisalhamento da partícula
$K_a$	Fator de consistência anular
$n_a$	Índice de comportamento anular
$V_s$	Velocidade de escorregamento da partícula
$E_t$	Eficiência de transporte
$C_{ca}$	Concentração de cascalhos no poço
$D_b$	Diâmetro da broca
$f$	Coefficiente de atrito de deslizamento da broca
$\tau$	Tensão cisalhante
$\gamma$	Taxa de cisalhamento
$\mu$	Fator de fricção
RPM	Rotação do segmento da coluna de perfuração
WOB	Peso sobre a broca
ECD	Densidade equivalente de circulação
ESD	Densidade estática equivalente
TVD	Profundidade vertical total
ROP	Taxa de penetração da broca
TQB	Torque na broca
RSS	<i>Rotary Steerable System</i>
MWD	Medindo durante a perfuração
LWD	Perfilando durante a perfuração