



PREVISÃO DE TAXAS DE PENETRAÇÃO NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE  
PETRÓLEO COM BROCAS DE CORTADORES FIXOS

Stephan de Carvalho Küng

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Franciane Conceição Peters

Paulo Couto

Rio de Janeiro

Janeiro de 2016

PREVISÃO DE TAXAS DE PENETRAÇÃO NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE  
PETRÓLEO COM BROCAS DE CORTADORES FIXOS

Stephan de Carvalho Küng

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Franciane Conceição Peters, D.Sc.

---

Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

---

Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura, Ph.D

---

Prof. Shiniti Ohara, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2016

Küng, Stephan de Carvalho

Previsão de Taxas de Penetração na Perfuração de Poços de Petróleo com Brocas de Cortadores Fixos / Stephan de Carvalho Küng. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XVI, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Franciane Conceição Peters

Paulo Couto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 65-67.

1. Taxa de Penetração. 2. Modelos de Previsão de ROP 3. Modelo de Ohara. I. Peters, Franciane Conceição *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Aos meus queridos pais,  
Jean e Mara,  
irmãs,  
Dani e Vivi.  
e esposa,  
Morgana Floresta.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Paulo Couto pelas infindáveis ajudas desde meu período na graduação em Engenharia de Petróleo na UFRJ e por ter me apresentado à minha orientadora, professora Franciane Peters, uma excelente pessoa, sempre disposta a me ajudar ao longo desse período árduo de estudo. O meu muito obrigado aos dois.

Obrigado as minhas colegas de trabalho Mônica Barbosa e Shelly Medeiros que sempre me apoiaram quando pensava em desistir por achar que não seria capaz de realizar meu sonho de me tornar um Mestre. Obrigado ao colega William Godoy por me ajudar na disciplina de Métodos Matemáticos.

Agradeço aos membros da banca, professores Shiniti e Sérgio pelo enriquecimento do trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PREVISÃO DE TAXAS DE PENETRAÇÃO NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE  
PETRÓLEO COM BROCAS DE CORTADORES FIXOS

Stephan de Carvalho Küng

Janeiro/2016

Orientadores: Franciane Conceição Peters

Paulo Couto

Programa: Engenharia Civil

O Modelo de Ohara para previsão de ROP (Taxa de Penetração) foi desenvolvido para uso perfurações com brocas tricônicas. Sua metodologia não necessariamente se ajustará a outro cenário de perfuração por depender de parâmetros específicos da broca para a qual foi desenvolvida. O presente trabalho estuda a aplicabilidade do Modelo de Ohara em perfurações com brocas de cortadores fixos, denominadas PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*), por meio do ajuste de parâmetros via equações normais. Ao adaptar o modelo faz-se necessário avaliar suas variáveis de entrada, principalmente, o desgaste dos cortadores, diferencial de pressão e resistência à compressão da rocha. Baseado nessas três variáveis realizam-se simulações buscando-se encontrar a melhor combinação entre as propostas de cálculo para cada uma delas e a sensibilidade do modelo em relação a cada uma dessas variáveis. Avaliam-se as diferenças entre as ROP reais e as previstas pelo Modelo de Ohara adaptado para PDC, comparando a ROP média do intervalo perfurado, erro médio absoluto e SMAPE (*Symmetric Mean Absolute Percentage Error*), para o conjunto de dados disponível e o uso do modelo em um acompanhamento em tempo real.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## RATE OF PENETRATION PREDICTIVE MODEL FOR FIXED CUTTER BITS

Stephan de Carvalho Küng

January/2016

Advisors: Franciane Conceição Peters

Paulo Couto

Department: Civil Engineering

The Ohara ROP (Rate of Penetration) Predictive Model was developed for tricone bits. Its methodology could not be useful for another drilling scenario. The study checks the applicability of Ohara's Model in fixed cutter bits, like the PDC bit (Polycrystalline Diamond Compact), using normal equations for the adjustment of parameters. For better evaluation of a possible adaptability in different drilling scenarios it is necessary to analyze the variables used by the model, mainly, the bit dull grade, the differential pressure and rock strength. Based on these three variables there are runned simulations aiming to find the best combination between the proposed calculations for each variable estimating the ROP also, identifying their implications in the model doing a sensitivity analysis of their influence in the ROP predictions. It is compared the real ROP and the predicted ROP by Ohara's Model adapted to PDC, analyzing the average ROP measured and its average absolute error in a drilled interval, thus the SMAPE (Symmetric Mean Absolute Percentage Error), to check its application in real time operations.

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	X
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	XII
<b>NOMENCLATURA</b> .....	XIV
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVO DO TRABALHO .....	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	4
<b>CAPÍTULO 2 – PARÂMETROS DE PERFURAÇÃO</b> .....	5
2.1 TAXA DE PENETRAÇÃO (ROP) .....	8
2.2 PROBLEMAS AO LONGO DA PERFURAÇÃO .....	10
<b>CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
3.1 MODELO DE MAURER .....	14
3.2 MODELO DE WARREN .....	15
3.3 MODELO DE BOURGOYNE & YOUNG .....	16
3.4 MODELO DE REZA & ALCOCER .....	18
3.5 MODELO DE MATAHHARI ET AL .....	21
3.6 MODELO DE DUPRIEST .....	22
3.7 MODELO DE OHARA .....	23
<b>CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA</b> .....	27
4.1 TRATAMENTO DE DADOS .....	29
4.2 ADAPTAÇÃO DO MODELO DE OHARA PARA BROCAS PDC .....	33
4.2.1 Estimativa do diferencial de pressão .....	34
4.2.2 Estimativa do desgaste de cortadores .....	36
4.2.3 Estimativa da resistência à compressão da rocha .....	38
4.3 - METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RESULTADOS .....	44
4.4 METODOLOGIA PARA AJUSTE DOS PARÂMETROS .....	49
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS</b> .....	50

<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES</b> .....	62
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62
6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	63
<b>CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	65
<b>APÊNDICE A – CONVERSÃO DE UNIDADES</b> .....	68
<b>APÊNDICE B – PERFURAÇÃO DE POÇOS</b> .....	69
B.1 SONDAS DE PERFURAÇÃO .....	69
B.1.1 Sistema de Rotação.....	69
B.1.2 Sistema de circulação .....	71
B.1.3 Sistema de monitoramento .....	73
B.2 COMPONENTES DO BHA DE PERFURAÇÃO .....	77
B.2.1 Brocas de perfuração .....	77
B.2.2 Ferramentas de perfuração.....	87
B.2.3 Ferramentas de M/LWD.....	89
B.2.4 Outros componentes do BHA.....	92
<b>APÊNDICE C – COEFICIENTES GERADOS NA PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DO MODELO DE OHARA</b> .....	94
<b>APÊNDICE D – EXEMPLO DE TRATAMENTO DE DADOS ATRAVÉS DE MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE <i>OUTLIERS</i></b> .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Preço do barril de petróleo tipo WTI <i>Crude Oil</i> [2]. .....	1
Figura 2.1: Diagrama apresentando a disposição das forças atuantes numa coluna de perfuração em trecho inclinado. ....	7
Figura 2.2: Diagrama apresentando a disposição da Fat quanto girando a coluna.....	8
Figura 4.1: Esquema gráfico do método “Box-Plot” .....	30
Figura 4.2: Tempo de trânsito na matriz da rocha [28]. ....	35
Figura 4.3: Peso do fluido de perfuração metro a metro das corridas. ....	36
Figura 5.1: Curvas de ajuste do modelo para as seis simulações. ....	51
Figura 5.2: Curvas de ROP de previsão das simulações 3 e 4 ante a ROP Real da corrida D que testa o modelo. ....	51
Figura 5.3: Análise de $R^2$ para simulações 3 e 4. ....	52
Figura 5.4: Curvas de ROP de previsão contra ROP real utilizando 0,5 lb/gal como diferencial de pressão como entrada.....	52
Figura 5.5: Comparação entre ROP Real e simulações 3, 4, 7 e 9. ....	54
Figura 5.6: Parâmetro $X_6$ da Corrida A calculado pelas Eq. 3.23 e 4.3. ....	56
Figura 5.7: Curvas de ROP real e previsto (calculado) metro a metro para Simulação 15. ....	57
Figura 5.8: Curvas de ROP real acumulado e previsto para simulação 15. ....	58
Figura 5.9: Curvas de ROP real e previsto metro a metro na Simulação 30. ....	60
Figura 5.10: Curvas de ROP real acumulado e previsto para Simulação 30.....	61
Figura B.1: Representação simplificada do Sistema de Rotação de sonda [6].....	70
Figura B.2: Desenho de Top Drive [7]. ....	71
Figura B.3: Representação de um sistema de circulação em uma sonda [8].....	72
Figura B.4: Sistema de movimentação de carga de uma sonda onde o sensor de peso é instalado [6]. ....	76
Figura B.5: Brocas de perfuração (da esquerda para direita, tricônica com inserto de tungstênio, PDC, impregnada e tricônica dente de aço) [10]. ....	77
Figura B.6: Broca Kymera. Fonte: Baker Hughes.....	82
Figura B.7: Interpretação de desgaste de cortadores de brocas tricônicas [14].....	84
Figura B.8: Interpretação de desgaste de cortadores de brocas PDC. ....	84
Figura B.9: Localização de desgaste em brocas PDC [15]. ....	84

Figura B.10: Estruturas cortantes das brocas tricônicas, inserto de tungstênio e dente de aço respectivamente [14]......	85
Figura B.11: Exemplos de configurações rotor e estator de motores de fundo [16]. ....	88
Figura B.12: Estabilizador do tipo integral espiralado. ....	93

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Exemplos de problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração apresentando suas causas e possíveis soluções. ....	10
Tabela 2.2: Exemplos de problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração apresentando suas causas e possíveis soluções. ....	11
Tabela 2.3: Exemplos de problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração apresentando suas causas e possíveis soluções. ....	12
Tabela 3.1: Coeficientes para aplicação na Eq. 3.22. ....	21
Tabela 3.2: Resumo dos modelos para previsão de ROP. ....	26
Tabela 4.1: Características das brocas utilizadas no estudo. ....	27
Tabela 4.2: Características das corridas utilizadas no estudo. ....	28
Tabela 4.3: Correlações matemáticas para calcular a UCS [31]. ....	40
Tabela 4.4: Coeficientes de Correlação entre ROP e correlações UCS. ....	42
Tabela 4.5: Coeficientes de Correlação entre PSB e correlações de UCS. ....	42
Tabela 4.6: Coeficientes de Correlação entre MSE e UCS. ....	43
Tabela 4.7: Correlação de Pearson por diâmetro de broca para UCS x PSB e UCS x ROP. ....	43
Tabela 4.8: Dados de Entrada das simulações 1 a 6. ....	45
Tabela 4.9: Dados de entradas das simulações 7 à 10. ....	46
Tabela 4.10: Dados de entradas das simulações 11 a 28. ....	47
Tabela 5.1: Resultados das simulações 1 a 6. ....	50
Tabela 5.2: Resultados das simulações 7 a 10. ....	53
Tabela 5.3: Resultado das simulações 11 a 28. ....	55
Tabela 5.4: Resultado da Simulação 29, ROP em pés/h. ....	59
Tabela 5.5: Resultado da Simulação 30, ROP em pés/h. ....	59
Tabela B.1: Exemplo de classificação IADC de broca tricônica 437M. ....	78
Tabela B.2: Exemplo de classificação IADC para broca PDC M432. ....	80
Tabela B.3: Classificação de desgaste de brocas IADC. ....	86
Tabela D.1: Variáveis calculadas para aplicação do método “Box-Plot” para verificação de <i>outliers</i> em dados de rpm na broca. ....	96
Tabela D.2: Dados de rpm de um trecho de perfuração da Corrida C. ....	96
Tabela D.3: Identificação de <i>outliers</i> em demais parâmetros de perfuração e perfis elétricos. ....	97

Tabela D.4: Variáveis calculadas para aplicação do método “Box-Plot” para verificação de <i>outliers</i> em dados de vazão.....	98
Tabela D.5: Dados de rpm na broca tratados.....	99

## NOMENCLATURA

$a_1$ à $a_8$	-	Coefficientes do Modelo de Bourgoyne & Young
$\dot{B}$	-	Taxa de desgaste dos rolamentos de broca tricônica no Modelo de Alcocer
$C_d$	-	Coefficiente de descarga para cálculo da força de impacto dos jatos
$\dot{D}$	-	Taxa de desgaste dos dentes de broca tricônica no Modelo de Reza & Alcocer
$d_b$	-	Diâmetro da broca
$\dot{F}$	-	Taxa de Penetração expressa em pés/min para Modelo de Reza & Alcocer
$f_1$ à $f_8$	-	Funções do Modelo Bourgoyne & Young
ft	-	Unidade de comprimento, em pé
$g_p$	-	Gradiente de pressão de poros
$\dot{h}$	-	Taxa de desgaste dos dentes no Modelo de Reza & Alcocer
lbf.pé	-	Unidade de medida de torque, em libras força.pé
$M_d$	-	Mediana
N	-	Rotação na coluna
Q	-	Vazão
S	-	Resistência a tensão confinante
$S_c$	-	Resistência à compressão da rocha
$t$	-	Variável de temperatura no fundo para o Modelo de Reza & Alcocer, expresso em °F
$X_2$	-	Parâmetro do Modelo Ohara para o peso sobre broca
$X_3$	-	Parâmetro do Modelo Ohara para o diferencial de pressão
$X_4$	-	Parâmetro do Modelo Ohara para o grau de compactação da rocha
$X_5$	-	Parâmetro do Modelo Ohara para a hidráulica;
$X_6$	-	Parâmetro do Modelo Ohara para o desgaste dos dentes da broca

## Letras Gregas

$\Delta P$	-	Diferencial de pressão entre a pressão hidrostática do fluido e a pressão de poros
$\Delta P_b$	-	Perda de carga na broca, em psi;
$\rho_f$	-	Peso do fluido de perfuração, em lb/gal;
$\rho_b$	-	Densidade de formação, em lb/gal;
$\vartheta$	-	Viscosidade do fluido de perfuração, expresso em centipoise (cp)

## Abreviaturas

BHA	-	<i>Bottom Hole Assembly</i>
DT	-	Perfil sônico
ECD	-	<i>Equivalent Circulating Density</i>
Fat	-	Força de atrito
FPWD	-	<i>Formation Pressure While Drilling</i>
FR	-	Fator de Revolução de motores de fundo e turbinas, expresso em rev./gal
HWDP	-	<i>Heavy Weight Drill Pipe</i>
IADC	-	<i>International Association of Drilling Contractors</i>
JIF	-	<i>Jet Impact Force</i>
LCM	-	<i>Loss Circulation Material</i>
MD	-	<i>Measured Depth</i>
MF	-	Motor de Fundo
MSE	-	<i>Mechanical Specific Energy</i>
MWD	-	<i>Measurement While Drilling</i>
LWD	-	<i>Logging While Drilling</i>

NOC	-	<i>National Oil Companies</i>
NOV	-	<i>National Oil Varco</i>
NPHI	-	Perfil Neutrão
OPEP	-	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PDC	-	<i>Polycrystalline Diamond Compact</i>
P&D	-	Pesquisa e Desenvolvimento
PSB	-	Peso sobre broca, expresso em lb/ pol <sup>2</sup>
QPG	-	Quadro de Previsão Geológica
RFT	-	<i>Repeated Formation Test</i>
ROP	-	Taxa de penetração, expressa comprimento por tempo
RPM	-	Rotação Por Minuto
RSS	-	<i>Rotary Steerable System</i>
SMAPE	-	<i>Symmetric Mean Absolute Percentage Error</i>
TBF	-	Tempo de Broca no Fundo, expresso em horas
TFA	-	<i>Total Flow Area</i> , expresso em pol <sup>2</sup>
TSP	-	<i>Thermally Stable Polycrystalline</i>
TVD	-	<i>Total Vertical Depth</i>
UCS	-	<i>Unconfined Compressive Strength</i> ou <i>Uniaxial Compressive Strength</i>

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A cada dia a exploração e produção de óleo e gás avança em direção a regiões com lâminas d'água cada vez mais profundas e projetos de perfuração de poços tornam-se mais complexos, resultando em aumento de seus custos, por exemplo, caso do pré sal brasileiro. Sondas de perfuração com capacidade para operar em lâminas d'água da ordem de 2.000 m tem custos diários superiores a US\$ 500.000,00 [1].

Os custos são crescentes e a geração de receitas de grandes empresas produtoras de petróleo e gás, denominadas *Majors*, de companhias estatais, denominadas NOC (*National Oil Companies*), e de companhias de pequeno porte, conhecidas como independentes, vem reduzindo drasticamente, sofrendo com a queda do preço do barril de petróleo o qual está atingindo patamares inferiores a US\$ 30, vide Figura 1.1.



**Figura 1.1: Preço do barril de petróleo tipo WTI Crude Oil [2].**

Como exemplo, a companhia americana Exxon Mobil, a qual, segundo sua divulgação de resultados do 1º quadrimestre de 2015, teve uma redução aproximada de 46% em seus ganhos quando comparado com o mesmo período de 2014 [3].

As companhias sempre querem minimizar custos e aumentar sua eficiência. Isto fica ainda mais evidente em momentos de crise, buscam-se soluções e alternativas de baixo custo de implementação que as ajudem a alocar melhor seus recursos e fazer uso mais

racional do tempo. Redução de custos operacionais para maximização da geração de receita. Assim, torna-se imprescindível a tomada de medidas que visem, por exemplo, a otimização da perfuração.

Na atividade de tecnologia de brocas de perfuração de poços busca-se escolher o tipo de broca mais indicado para cada ambiente de perfuração de forma a alcançar melhores taxas de perfuração, maior vida útil da broca (economizando tempo de manobra para substituição de broca) e atender a limitações impostas pelo tipo de fluido e/ou equipamentos de perfuração pertencentes ao *Bottom Hole Assembly*, BHA, composto por estabilizadores, comandos, motores de fundo, RSS, *Rotary Steerable System*, MWD, *Measurement While Drilling*, LWD, *Logging While Drilling* etc.

Com a crise, todas as áreas da indústria de petróleo sofrem com o corte de gastos, seja *upstream*, exploração e produção de óleo e gás, seja *downstream*, refino e abastecimento, até mesmo pesquisa e desenvolvimento, P&D. Não é a primeira, nem será a última crise no setor petrolífero, exemplo histórico é a “Crise da OPEP”, em 1973.

## **1.1 OBJETIVO DO TRABALHO**

Em um projeto de perfuração a escolha correta do tipo de broca e dos parâmetros aplicados na broca como PSB (Peso sobre Broca), RPM (Rotações por Minuto na coluna), vazão, são fatores fundamentais para otimizar a perfuração. Na literatura há diversos modelos matemáticos que buscam prever a ROP (Taxa de Penetração) em poços de perfuração. É possível perceber que, desconsideradas as pesquisas pioneiras, diversos modelos são desenvolvidos a partir de outros existentes, ou seja, o processo de desenvolvimento não começa do zero.

O desenvolvimento de um modelo de previsão de ROP está bastante sujeito a alteração do cenário ao qual é aplicado, não é algo sistemático do tipo “*plug and play*”. Uma metodologia aplicada em um cenário de perfuração (geologia, tipo de broca, parâmetros de perfuração aplicados etc.), não necessariamente apresentará um bom resultado em

outro. Pode-se dizer que os modelos acabam sendo “especialistas”, restritos a um cenário de perfuração.

Utilizando os softwares *Matlab e Microsoft Excel*, o estudo pretende analisar uma proposta de adaptação de um modelo de previsão de ROP existente na literatura, o Modelo de Ohara, [4 e 5], desenvolvido para prever a ROP de modelos de brocas conhecidos como tricônicas. Assim, o estudo sugere uma forma de adaptação desse método em brocas com tecnologias mais recentes, brocas com cortadores fixos do tipo PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*), verificando a influência das variáveis de entrada no Modelo de Ohara, através de uma análise de sensibilidade, ou seja, o quanto os parâmetros impactam na previsão da ROP.

Assim como no Modelo de Ohara, não são consideradas a viscosidade do fluido de perfuração nem a permeabilidade da rocha nessa proposta de adaptação. Buscando minimizar possíveis efeitos da reologia do fluido todos os dados são oriundos de corridas com fluidos sintéticos. Como as corridas não tiveram quaisquer anomalias (perdas ou ganhos na circulação, prisões de coluna etc.) assume-se que o modelo é aplicável para uma limpeza perfeita. Logo, com relação à hidráulica de perfuração parte-se do pressuposto de que os jatos de broca, vazão e pressão de bombeio são ideais. O conceito de UCS, *Unconfined Compressive Strength* ou *Uniaxial Compressive Strength*, representa a resistência à compressão da rocha, considerada o elemento que restringe o desempenho da broca de perfuração, limitante para se alcançar a melhor ROP, não sendo considerados nesse trabalho efeitos do peso e viscosidade do fluido de perfuração.

Com a proposta de adaptação do Modelo de Ohara pretendesse verificar a possibilidade de seu uso na preparação de um programa de brocas, o qual é baseado em informações litológicas, poços de correlação, limitações de equipamentos direcionais, trajetória do poço, tipo de fluido utilizado entre outras, bem como seu uso na previsão de ROP metro a metro em acompanhamentos de perfuração em tempo real. Tais verificações são feitas com base na diferença entre a média harmônica da ROP real e a média harmônica da

ROP calculada para as corridas de ajuste, geradoras de coeficientes do modelo, e as corridas de previsão, além do SMAPE (*Symmetric Mean Absolute Percentage Error*).

Grande parte da redução do custo de perfuração é atingida reduzindo o tempo de operação, o que se consegue, em parte, com a otimização da ROP.

## **1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

O Capítulo 2 descreve os parâmetros de perfuração e seus efeitos na taxa de penetração além de possíveis problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração prejudicando o desempenho da broca bem como seu impacto nos parâmetros aplicados.

O Capítulo 3 é a revisão bibliográfica de modelos de previsão existentes na literatura ressaltando os cenários de perfuração em que foram aplicados e suas peculiaridades, incluindo o Modelo de Ohara. O Capítulo 4 descreve a metodologia aplicada para o tratamento de dados, para o cálculo de variáveis utilizadas na proposta de adaptação do Modelo de Ohara para brocas PDC, descrição da metodologia para realização das simulações no *Matlab* e posterior análise dos resultados.

O Capítulo 5 contém os resultados das simulações bem como suas interpretações. Já o Capítulo 6 são as conclusões do trabalho e apresentação de propostas para futuros trabalhos.

O Apêndice B contextualiza leitores que não possuam conhecimento profundo sobre a perfuração de poços de petróleo. Nele há descrições dos sistemas de rotação, circulação e monitoramento de uma sonda de perfuração, essenciais para aplicação de parâmetros e coleta de dados, descrição das componentes do BHA com foco especial nos tipos de broca de perfuração, descrevendo suas particularidades e o código de desgaste IADC.

## CAPÍTULO 2 – PARÂMETROS DE PERFURAÇÃO

Os parâmetros de perfuração podem ser divididos em 2 grupos: Naqueles que são aplicados pelo responsável da perfuração (*Company Man*<sup>1</sup>, sondadores, engenheiros direcionais) que são os inputs (peso sobre broca, rpm e vazão) e *outputs*, leituras resultantes desses parâmetros aplicados durante a perfuração (torque e ROP, por exemplo).

A vazão é o bombeio de fluido de perfuração para dentro do poço tendo como uma de suas principais funções o carregamento de cascalhos, gerados pelo corte da formação, até a superfície. A rpm é a rotação que se aplica à broca, através da coluna de perfuração, a partir dos equipamentos de superfície do sistema de rotação da sonda, ou diretamente a broca pelo motor de fundo ou turbina (Apêndice B). O PSB é a força que se aplica à broca dependendo do peso disponível no BHA para que haja avanço da perfuração. A faixa de peso a ser aplicada varia com o diâmetro da broca. Quanto maior o diâmetro, maior o limite para aplicação de peso, variando também com o tipo e modelo da broca.

Tais parâmetros tem que estar de acordo com as limitações técnicas da sonda, do BHA montado, variando de acordo com o diâmetro da fase, logo, as limitações técnicas dos fabricantes de brocas também devem ser levadas em consideração. O uso inadvertido de qualquer um desses parâmetros pode impactar negativamente no desempenho de uma broca, abreviando sua vida útil.

Como consequência da aplicação desses parâmetros, os sensores de *mud logging*, que registram esses parâmetros aplicados na superfície, auxiliam fazendo a leitura de outros parâmetros, os *outputs*.

O torque é uma leitura de superfície gerada a partir da interação entre a broca e a formação. Essa interação se dá com a aplicação de rotação a broca, seja com ou sem

---

<sup>1</sup> Representante da companhia responsável pela perfuração (ex: Petrobras, Shell).

giro da coluna de perfuração. Sua unidade de campo é libras força × pé (lbf.pé). O torque é definido a partir da componente perpendicular ao eixo da força aplicada sobre a broca (que é efetivamente utilizada para fazê-lo girar em torno de um eixo ou ponto central conhecido como ponto de rotação).

$$\text{Torque} = \text{Força} \times \text{Distância} \quad (2.1)$$

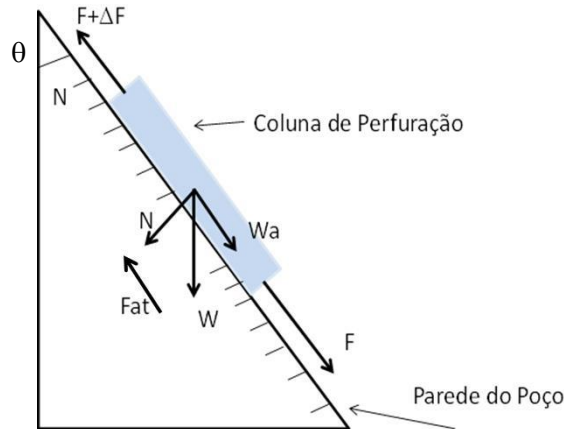
Dupriest [18] utiliza o torque em seu estudo sobre energia mecânica específica como indicativo de uma possível ineficiência de perfuração. No campo, a boa prática da indústria diz que o torque é de grande importância para identificar um desgaste severo da broca dificultando seu avanço, sendo um indicativo para retirada da broca em momento adequado.

No caso das brocas tricônicas, remetendo-se ao Modelo de Ohara, uma variação repentina de torque pode significar que os selos dos cones já não são mais efetivos, fazendo com que eles se soltem havendo interferência entre os mesmos, saindo de seu eixo de giro concêntrico girando excentricamente. Um cone pode se soltar e cair no poço incorrendo em custos inesperados com pescaria. Isso pode ser resultado de um defeito fabril ou o elevado número de revoluções. Caso isso aconteça estará registrado no desgaste de saída da broca.

No entanto, o torque não deve ser o único parâmetro a ser avaliado. As mudanças de litologia ao longo da perfuração e de parâmetros aplicados influenciam nessa leitura.

As brocas com cortadores fixos não possuem o problema da perda de um cone. Essa característica diferenciada faz com ela seja preferida para perfurar maiores intervalos e em regiões mais profundas por não ter uma limitação de tempo dentro do poço, número de revoluções. Nela, a variação do torque também está associada às mesmas questões que influenciam as tricônicas, porém devido ao tipo de padrão de corte, a magnitude do torque é diferenciada.

A trajetória do poço, integridade da parede do poço e o desenho do BHA também influenciam a leitura de torque e o peso aplicado que chega a broca. Em poços direcionais, parte do peso da coluna é suportada pela parede do poço. Desenho esquemático na Figura 2.1.



**Figura 2.1: Diagrama apresentando a disposição das forças atuantes numa coluna de perfuração em trecho inclinado.**

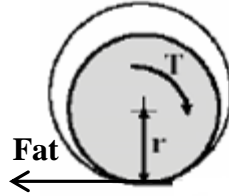
A Força Normal ( $N$ ) atua perpendicularmente a superfície inclinada. A Força de Atrito ( $Fat$ ), na indústria conhecida como arraste, sempre atua em direção oposta ao movimento dependendo de  $N$  e do coeficiente de atrito ( $\mu$ ). Sua direção depende do tipo de análise a ser feita (para cima ou baixo, manobra, ou atuando tangencialmente), resistindo à rotação do tubo. Já a força para mover o segmento para cima ( $F + \Delta F$ ) dependerá se a coluna está sendo descida ou retirada.

O torque gerado nas paredes, onde  $r$  é o raio do segmento (coluna de perfuração) é calculado da seguinte maneira:

$$\vec{T} = \overrightarrow{Fat} \times r = \mu \times \vec{N} \times r = \mu \times \vec{W} \times \text{sen}\theta \times r \quad (2.2)$$

Quando o segmento é rodado a  $Fat$  passa a ser tangencial gerando o torque ( $Fat$  rotativo), Figura 2.2. Quando o segmento é rodado e movido axialmente

simultaneamente, o arraste axial (*drag*) é reduzido e a maior parte é convertido em arraste rotacional (torque).



**Figura 2.2: Diagrama apresentando a disposição da Fat quanto girando a coluna.**

O torque, apesar de não ser um dado de entrada do Modelo de Ohara possui importância para seleção de brocas e parâmetros de perfuração e é um parâmetro a ser observado para identificar se houve algum problema durante a perfuração.

## 2.1 TAXA DE PENETRAÇÃO (ROP)

É a leitura mais importante resultante da aplicação dos parâmetros de perfuração que podem ser alterados pelos responsáveis da operação. É um dos indicadores que ajudam na decisão da continuidade ou não da perfuração. Sua unidade de medida é comprimento por tempo.

O tempo que se leva para perfurar um poço de petróleo está diretamente associado a sua taxa de penetração e, com isso, é uma medida associada ao custo. Os custos de perfuração são dependentes do tempo. Qualquer método que ajude a aumentar a taxa de penetração e preservar a broca levará a redução do tempo. Fatores que afetam a ROP devem ser compreendidos antes que seja feita qualquer análise visando compreender quão efetiva é a perfuração de um poço para uma dada uma broca. Há diversos fatores que influenciam na ROP durante a perfuração.

Dividem-se esses fatores em seis grupos [19]:

- Tipo de broca;

- Características da formação (por exemplo, resistência à compressão da rocha, porosidade, permeabilidade);
- Propriedades do fluido (densidade, viscosidade etc.);
- Parâmetros de perfuração aplicados (RPM e PSB);
- Desgaste de cortadores/dentes;
- Hidráulica da broca (inclui a vazão aplicada).

No presente trabalho vários desses fatores são abordados, o principal deles, tema dessa dissertação, é a verificação da aplicabilidade do Modelo de Ohara em brocas do tipo PDC. A broca é a ferramenta que transmite energia para a formação a ser atravessada. Os tipos de broca possuem diferentes valores de parâmetros de perfuração a serem aplicados, em virtude de seus padrões de corte. Sendo assim, o Modelo de Ohara pode se adequar ou não a essas mudanças.

A litologia perfurada é um fator do qual não se tem controle. Por mais que se façam estudos preliminares, sísmicas, por exemplo, pela experiência do autor no campo, o previsto pelo geólogo nem sempre é o real. O cenário ideal seria perfurar uma formação homogênea, isotrópica. Porém, na prática, o que se vê são formações intercaladas, as quais sofreram processos diagenéticos diferenciados incorrendo em variadas características dentro de uma mesma formação, por exemplo, um mesmo tipo de arenito possui diferentes leituras dos perfis geológicos (sônico, raio gama, etc.). Sendo assim, cada intervalo perfurado possui suas próprias características que afetam a resistência à perfuração.

As propriedades reológicas dos fluidos, que são diversas, variam de acordo com o cenário da perfuração. Há modelos de previsão de ROP, Capítulo 3, que utilizam esses dados como variáveis de entrada. O Modelo de Ohara, dentre os possíveis dados de fluido de perfuração, utiliza o peso do fluido. Além disso, um de seus parâmetros foca na hidráulica de perfuração, o qual se baseia em dados como vazão e área dos jatos.

Um fator que não é mencionado por Ebrahimi et al [19] mas que é de suma importância e influência na perfuração e, principalmente, na aquisição de dados, é a eficiência

humana e dos equipamentos, tanto de superfície quanto os que compõe o BHA. O sistema de monitoramento é suscetível ao erro humano, assim como a falha de sensores ou ferramentas que afetam diretamente a coleta de dados. Tais questões resultam em registros de dados suspeitos que são armazenados durante a perfuração.

Além disso, critérios adotados ao longo da perfuração, valores de peso e rpm aplicados, por exemplo, podem impactar negativamente na vida útil da broca. Utilização de parâmetros de perfuração além das recomendações do fabricante, impacto da broca com a formação devido a uma manobra em alta velocidade, falta de uso adequado dos compensadores de movimento do mar em sondas marítimas flutuantes, tudo pode afetar a broca, logo a ROP registrada.

## 2.2 PROBLEMAS AO LONGO DA PERFURAÇÃO

A identificação de problemas ao longo da perfuração de um poço é importante para validação dos dados de perfuração registrados na superfície pelo *mud logging*. Isto porque tais problemas podem afetar diretamente o desempenho de uma broca, como a necessidade de controlar os parâmetros aplicados, consequentemente, reduzindo o possível valor de uma ROP em um dado intervalo perfurado.

Dessa forma, identificá-los é bastante importante para que possam ser validados os dados de entrada do modelo de previsão de ROP evitando a presença de dados suspeitos. Alguns exemplos de problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração apresentando possíveis causas e soluções estão na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1: Exemplos de problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração apresentando suas causas e possíveis soluções.**

Problema	Causa	Solução
Perda induzida de circulação	Má limpeza do poço (Aumento do ECD <sup>2</sup> )	Circular para limpeza do poço e analisar comportamento da perda.

---

<sup>2</sup> ECD significa *Equivalent Circulating Density* que é a densidade efetiva exercida pelo fluido em circulação contra a formação. É um importante parâmetro para evitar *kicks* e perdas de circulação.

**Tabela 2.2: Exemplos de problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração apresentando suas causas e possíveis soluções.**

Perda de circulação em zonas de interesse	Zona depletada; Peso de fluido excessivo.	Combater perda com tampões de calcita (CaCO <sub>3</sub> ) para o caso do pré sal, tampões com material de perda de circulação (LCM <sup>3</sup> ). O método de combate a perda depende da causa, atrelada a litologia.
Baixa ROP	Parâmetros inadequados.	Efetuar <i>drill off test</i> : fixar rotação, variar o PSB e reportar a ROP. Repetir processo para outras RPM. Adotar a melhor combinação PSB x RPM de acordo com limite da broca e BHA.
	Alteração de litologia.	Checar Quadro de Previsão Geológica (QPG), poços de correlação e analisar amostras de calha; Alterar parâmetros.
	Broca desgastada.	Verificar histórico de vida útil; Verificar alteração de parâmetros (principalmente torque) para a mesma litologia perfurada; Manobrar e substituir broca.
Enceramento de Broca	Formação muito plástica (exemplo: Folhelho).	Retirar broca do fundo e deslocar solução lavadora com alta vazão; Girar a broca com alta rotação quando a solução passar por ela, trabalhando a coluna com velocidade.
	PSB aplicado sem vazão.	
	PSB excessivo.	
	Vazão insuficiente associada à reologia elevada.	
	Fluido de perfuração com propriedades reológicas inadequadas.	
Jatos de broca entupidos	Topada em poço aberto sem circulação.	Trabalhar coluna com velocidade e frear.
	Fragmentos sólidos no fluido de perfuração.	
Perda de circulação em formações intermediárias	Formação fraturada.	Combater perda com tampões de material de perda; Combater perda com tampões de cimento; Prosseguir perfurando, repondo fluido perdido para a formação.

<sup>3</sup> LCM significa *Loss Circulation Material*.

**Tabela 2.3: Exemplos de problemas que podem ocorrer ao longo da perfuração apresentando suas causas e possíveis soluções.**

Torque & Arraste	Enceramento de estabilizadores.	Deslocar tampão lavador e reciprococar coluna com rotação.
	Perda de calibre da broca.	Manobrar para troca de broca e descendo com cuidado para evitar prisão e repassar com baixo PSB
	Taxa instantânea muito alta.	Parar para circular antes da conexão. Moderar Taxa instantânea.
	Má limpeza do poço.	Deslocar tampão viscoso; Alterar reologia do fluido de perfuração; Repassar antes da conexão (se não atrapalha a perfuração direcional).
Packer Hidráulico (aumento da pressão de bombeio, risco de prisão)	Vazão insuficiente; Taxa de penetração instantânea muito alta; Formação plástica; Fluido de perfuração ineficiente.	Interromper a perfuração para circular até o restabelecimento da pressão de bombeio e arraste iniciais; Reciprococar coluna durante a perfuração; Prosseguir perfurando com vazão maior (se possível) e taxa instantânea controlada.

## **CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Como visto no Capítulo 2 há diversos fatores que influenciam na ROP. Isto permite pesquisadores seguirem diversas linhas de pesquisa com base em uma grande variedade de dados de entrada possíveis a serem aplicadas em seus modelos preditivos. Muitos autores, a partir da observação de que a perfurabilidade (grau de facilidade com que se perfura a rocha) e, conseqüentemente a ROP, diminui com o aumento da profundidade, iniciaram investigações acerca dos fatores que mais a afetam. Diversos modelos utilizam a resistência à compressão da rocha como variável que tem forte influência na ROP. Moreira [23] apresenta diversos modelos que também são descritos nesse trabalho.

Percebe-se que a evolução dos estudos sobre a previsão de ROP está bem relacionada ao avanço tecnológico, surgimento de novos tipos de broca e a maior facilidade na aquisição de dados. Tais avanços permitem a criação de novos modelos assim como possíveis estudos sobre a verificação da aplicabilidade de modelos mais antigos adaptando-os a novas condições de perfuração (brocas PDC, perfis geológicos em tempo real, etc.).

No entanto, como cada modelo tende a ter sua própria particularidade, tipo de broca, parâmetros inseridos, premissas adotadas, isso faz com que os modelos de previsão se tornem “especialistas”, sendo capazes de prever a ROP somente para um dado cenário de perfuração, não havendo um modelo amplamente utilizado na indústria.

Há também o conceito de energia mecânica específica [18], 2005, o qual desenvolve um modelo a partir do acompanhamento da MSE e da eficiência mecânica, possibilitando a previsão da magnitude ROP em tempo real, além de promover uma melhor avaliação do estado atual da perfuração, o quão eficiente está sendo a alteração dos parâmetros na manutenção e/ou melhora no avanço da broca.

Com base na contextualização dos dados a serem utilizados no presente trabalho, o foco dessa revisão são modelos de perfuração que são correlações empíricas do ROP a partir

de parâmetros medidos em superfície, em função dos efeitos inerentes a cada um deles observando-se as premissas para que cada um dos modelos seja aplicado.

### 3.1 MODELO DE MAURER

A partir de mecanismos de geração de crateras em rochas, como o impacto dos dentes de uma broca tricônica na rocha, Maurer [20], 1962, descreve uma fórmula para o cálculo da ROP em função da ação dos dentes da broca, logo seu foco era em brocas tricônicas. Em condições de limpeza de poço perfeita, ou seja, todos os fragmentos de rocha gerados pela ação da broca são removidos pelo fluido de perfuração de forma eficiente não havendo contato dos dentes com pedaços de rocha já perfurados. A partir dessa suposição Maurer encontrou boa correlação entre a taxa de penetração, peso sobre broca e rpm. Isso indicou que é possível delinear os mecanismos de perfuração a partir da relação dos mecanismos da época para geração de crateras com a operação de perfuração.

No entanto, o desvio das correlações entre ROP, PSB e rpm obtidas no campo a partir de formulações para cálculo de ROP existentes já época como por exemplo:

Simon 
$$ROP = a \frac{P}{D^2} \quad (3.1)$$

Van Lingen 
$$ROP = W^{1,25} N^{0,8} \quad (3.2)$$

Eckel, Biel:  
& Cannon 
$$ROP = aWN^{0,4} \quad (3.3)$$

Onde a é uma constante do modelo, P é a potência, expressa em HP (Horse Power), W o peso sobre broca expresso em Klbf e N sendo a rpm, mostrou que uma limpeza de poço ineficiente reduz a ROP com a profundidade. A Equação 3.4 apresenta a formulação de Maurer:

$$ROP = k \frac{N \times W^2}{d_b^2 \times S_c^2} \quad (3.4)$$

Onde  $N$  é a rotação na coluna,  $k$  é uma constante de perfurabilidade da formação,  $d_b$  é o diâmetro da broca, expresso em polegadas,  $S_c$  a resistência à compressão da rocha, expresso em psi, e  $W$  é o peso sobre broca expresso em Klbf.

Como as correlações entre ROP, PSB e rpm são função da limpeza de poço elas também são função da profundidade. No entanto, Maurer conclui que uma melhor formulação para cálculo da ROP deve estar em função da profundidade do poço (o Modelo de Ohara, por exemplo, Seção 3.7, apresenta parâmetro dependente da profundidade do poço).

### 3.2 MODELO DE WARREN

O Modelo de Warren [21], 1986, também se baseia no estudo de brocas tricônicas e também assume a limpeza perfeita do poço para um cenário de formações moles. Ou seja, os fragmentos de rocha gerados na perfuração desse tipo de formação não impactam na ROP. Sua ideia é de que em condições normais de perfuração, a taxa de remoção de cascalho por parte da broca seja igual à taxa na qual se formam novos fragmentos de rocha. Isto implica que a ROP é controlada pelo processo de geração de cascalhos, pelo processo de remoção ou a combinação dos dois. Nesse modelo, a resistência à compressão da rocha é representada por  $S$ , também expressa em unidade de pressão,  $a$  e  $c$  são coeficientes do modelo.

$$ROP = \left( \frac{a \times S^2 \times d_b^2}{N^b \times W^2} + \frac{c}{N \times d_b} \right)^{-1} \quad (3.5)$$

Onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes da broca do modelo,  $N$  é a rotação na coluna,  $d_b$  é o diâmetro da broca, expresso em polegada,  $S$  é a tensão confinada na rocha, expresso em psi, e  $W$  é o peso sobre a broca expresso em Klbf.

O primeiro termo da Equação 3.5 define a máxima taxa na qual a rocha é triturada pela ação dos dentes da broca transformando-a em pequenos fragmentos. Essa suposição de Warren se baseia na premissa de que o PSB é suportado por um número fixo de dentes da broca independente da profundidade de penetração do dente na rocha. O segundo termo do modelo modifica a previsão por levar em conta a distribuição de PSB em uma maior quantidade de dentes a medida que o PSB é aumentado e o dente penetra mais na formação.

Warren verifica através de ensaios de laboratório que a redução da ROP em poços com alta pressão no fundo são resultado da limpeza do poço (Capítulo 2, Seção 2.2, problemas que podem ocorrer na perfuração em virtude de elevado ECD, aumento da pressão no anular do poço em razão de limpeza ineficiente) e o que ele chama de *local cratering effects*, fenômeno que ocorre adjacente a um dente em particular durante a penetração na rocha podendo ser estudado a partir de um teste de impacto de um único dente na rocha. Este é um conceito que faz menção a dificuldade de penetração do dente da broca na rocha para fazê-la fraturar e começar a se fragmentar dando assim prosseguimento à perfuração. No entanto, nenhum desses impactos na ROP pode ser explicitamente modelado pelo autor.

A proposta de adaptação do Modelo de Ohara leva em conta a dificuldade da perfuração devido à rocha, sua resistência à força aplicada para perfurá-la, sendo utilizado o conceito de UCS para representá-la.

### **3.3 MODELO DE BOURGOYNE & YOUNG**

Este modelo [22], 1974, sugere que os principais parâmetros que influenciam a ROP são a resistência à compressão da rocha, o tipo de broca, o conteúdo de sólido (relativo à limpeza do poço, a capacidade de carreamento dos fragmentos de rocha gerados na perfuração até a superfície não havendo retrabalho da broca em trecho já perfurado), grau de compactação da formação, peso aplicado sobre a broca, rotação na coluna,

desgaste dos dentes da broca tricônica *overbalance*<sup>4</sup> (relativo ao diferencial de pressão dentro do poço) e hidráulica da broca. Bourgoyne & Young, ao comparado aos Modelos de Maurer e Warren, contempla uma gama maior de fatores que influenciam a ROP. O modelo propõe a seguinte formulação para previsão de ROP:

$$ROP = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \times f_6 \times f_7 \times f_8 \quad (3.6)$$

Os parâmetros  $f_1$  a  $f_8$  são funções que relacionam diferentes variáveis a ROP. Tais funções são baseadas em padrões observados em laboratório e em aplicações no campo. A função  $f_1$  representa os efeitos dos parâmetros que não estão inclusos no modelo. Esses parâmetros são a resistência à compressão da rocha, tipo de broca, tipo de fluido e conteúdo sólido. Diferentemente dos Modelos de Maurer e Warren, o Modelo de Bourgoyne & Young não se aplica somente para poços perfeitamente limpos.

$$f_1 = e^{2,303 \times a_1} \quad (3.7)$$

As funções  $f_2$  e  $f_3$  fazem menção ao efeito de compactação da formação. Já  $f_4$  mensura o efeito do *overbalance* na ROP.  $D$  é a profundidade expressa em pés (ft).

$$f_2 = e^{2,303 \times a_2 \times (10000 - D)} \quad (3.8)$$

$$f_3 = e^{2,303 \times a_3 \times D^{0,69} \times (g_p - 9)} \quad (3.9)$$

Onde  $g_p$  é o equivalente em pressão de poros, expresso em lb/gal.

---

<sup>4</sup> Na exploração de poços de petróleo, a perfuração é dita *overbalance*, quando a pressão no fundo de poço é maior que a pressão da formação, destacando que a pressão dentro do poço não deve ultrapassar o valor da pressão de fratura da formação, do contrário haverá perda de fluido de perfuração para a formação.

$$f_4 = e^{2,303 \times a_4 \times D(g_p - \rho_f)} \quad (3.10)$$

Onde  $\rho_f$  é o peso equivalente do fluido de perfuração em circulação (ECD), expresso em lb/gal.

As funções  $f_5$  e  $f_6$  modelam os efeitos do PSB e a rotação (N), respectivamente:

$$f_5 = \left[ \frac{\frac{W}{d_b} - \left(\frac{W}{d_b}\right)_t}{4 - \left(\frac{W}{d_b}\right)_t} \right]^{a_5} \quad (3.11)$$

$$f_6 = \left(\frac{N}{60}\right)^{a_6} \quad (3.12)$$

A equação  $f_7$  refere-se ao efeito do desgaste dos dentes na ROP:

$$f_7 = e^{-a_7 \times h} \quad (3.13)$$

Onde  $h$  é a fração do desgaste de dente variando de 0 a 1.

Por último  $f_8$ , o qual modela os efeitos da hidráulica da broca na ROP. A força de impacto dos jatos (JIF) é utilizada como o parâmetro de hidráulica.

$$f_8 = \left(\frac{JIF}{1000}\right)^{a_8} \quad (3.14)$$

### 3.4 MODELO DE REZA & ALCOCER

O Modelo de Reza & Alcocer [24], 1986, utiliza a análise dimensional para seu desenvolvimento. O modelo se baseia em três equações: ROP, desgaste dos dentes e dos

rolamentos de brocas tricônicas para operações em águas profundas. Essas equações buscam incluir o máximo de fatores que influenciam na ROP como PSB, rpm, densidade e viscosidade do fluido de perfuração, resistência à compressão da rocha, diferencial de pressão (diferença de pressão entre a coluna de fluido e a formação), temperatura e coeficiente de transferência de calor (a quantidade de calor trocado ente a formação e o fluido de perfuração). Para determinar os coeficientes desconhecidos presentes em tais equações (calibração do modelo) foram utilizados dados de campo, do contrário, segundo os pesquisadores, a escassez de equipamentos para estudo em laboratório poderia limitar o modelo.

A ROP (simbolizado na Equação 3.15 como  $\dot{F}$  expresso em pés/min) é calculada através de uma função que contém sete parâmetros independentes.

$$\dot{F} = f_1(W, N, Q, \vartheta, E, \Delta P, d) \quad (3.15)$$

Onde  $f_1$  simboliza a função para cálculo da ROP,  $W$  é o peso sobre a broca expresso em Klbf,  $N$  é a rpm,  $Q$  é a vazão expressa em gpm,  $E$  é a resistência à compressão da rocha expressa em psi,  $\vartheta$  é a viscosidade expressa em centipoise,  $\Delta P$  é o diferencial de pressão expresso em psi, e  $d$  é o diâmetro do rolamento da broca, expresso em polegadas. Com base nesses parâmetros, Reza & Alcocer [24] fazem um estudo de análise dimensional fazendo uso do método do teorema de Buckingham Pi<sup>5</sup>. Isto resulta na Equação 3.16 para cálculo de ROP.

$$\frac{\dot{F}}{N \times d} = C_1 \left[ \frac{N \times d^2}{\vartheta} \right]^a \left[ \frac{N \times d^3}{Q} \right]^b \left[ \frac{E \times d}{W} \right]^c \left[ \frac{\Delta P \times d}{W} \right]^d \quad (3.16)$$

Onde  $a, b, c$  e  $d$  são os coeficientes do modelo e  $C_1$  é a constante de proporcionalidade da equação. A equação para cálculo do desgaste dos dentes da broca segue os mesmos

---

<sup>5</sup> Permite que durante o estudo de análise dimensional os parâmetros sejam elevados a expoentes sendo necessário o conhecimento prévio do número de grupamentos dimensionais que constituirão o estudo [24].

princípios utilizados para encontrar a equação da ROP. A Equação 3.17 apresenta os parâmetros que são considerados por Reza & Alcocer [24] os melhores para cálculo do desgaste em razão de seus efeitos físicos diretos e indiretos no processo de desgaste.

$$\dot{D} = f_2(W, N, Q, \vartheta, E, D) \quad (3.17)$$

Onde  $f_2$  simboliza a função para cálculo do desgaste,  $\dot{D}$  é o desgaste do dente da broca, fração do dente original sendo um parâmetro adimensional, e  $D$  é o diâmetro da broca expresso em polegadas.

$$\frac{\dot{D}}{N \times D} = C_2 \left[ \frac{Q}{N \times D^3} \right]^a \left[ \frac{W}{E \times D^2} \right]^b \left[ \frac{\vartheta \times D}{N \times Q} \right]^c \quad (3.18)$$

Onde  $a, b$  e  $c$  são os coeficientes do modelo e  $C_2$  é a constante de proporcionalidade da equação.

Por último a Equação 3.19 para o desgaste dos rolamentos de brocas tricônicas. As práticas de perfuração combinadas com fatores físicos levam ao desgaste dos rolamentos. Seguindo o mesmo princípio das equações para cálculo de ROP e desgaste dos dentes:

$$\dot{B} = f_3(W, N, t, h, d, Q, \vartheta) \quad (3.19)$$

Onde  $f_3$  simboliza a função para cálculo do desgaste do rolamento,  $t$  é a temperatura no fundo do poço expressa em °F e  $h$  é o coeficiente de transferência de calor expresso em BTU/h.pé<sup>2</sup>.°F desgaste do dente da broca, fração do dente original sendo um parâmetro adimensional, e  $D$  é o diâmetro da broca expresso em polegadas.

$$\frac{\dot{B}}{N} = C_3 \left[ \frac{t \times h \times d}{W \times N} \right]^a \left[ \frac{\vartheta}{N \times d^2} \right]^b \left[ \frac{Q}{N \times d^3} \right]^c \quad (3.20)$$

Onde  $a, b$  e  $c$  são os coeficientes do modelo e  $C_2$  é a constante de proporcionalidade da equação.

### 3.5 MODELO DE MATAHHARI ET AL

O Modelo de Matahhari et al (2010), descrito em Liu et al [25], prevê a ROP para brocas PDC assumindo uma limpeza perfeita do poço.

$$ROP = W_f \times G \times \frac{W^a \times N^b}{S \times d_b} \quad (3.21)$$

Onde  $W_f$  é o desgaste dos cortadores, sendo  $a, b$  e  $G$  constantes do modelo, leva em consideração a tensão confinante da rocha sendo esta calculada da seguinte maneira:

$$S = UCS \times (1 + a_s P_e^{b_s}) \quad (3.22)$$

Os coeficientes  $a_s$  e  $b_s$  dependem do tipo de perfuração atravessada, Tabela 3.1.

**Tabela 3.1: Coeficientes para aplicação na Eq. 3.22.**

Formação	Permeável	Impermeável
<b>Pe</b>	$P_{bh} - P_p$	$P_{bh}$
<b>a<sub>s</sub></b>	0,0133	0,00432
<b>b<sub>s</sub></b>	0,577	0,782

Quanto ao desgaste, Rahimzadeh [26] assume uma relação linear do efeito do desgaste dos cortadores na ROP ( $W_f$ ) sendo utilizada por Matahhari:

$$W_f = 1 - \frac{\Delta BG}{8} \quad (3.23)$$

Onde  $\Delta BG$  é o desgaste IADC, adimensional.

### 3.6 MODELO DE DUPRIEST

No Capítulo 2 foram vistos diversos parâmetros de perfuração que influenciam na ROP. Parâmetros são constantemente alterados buscando sua maximização, principalmente o PSB e a rotação na coluna.

O conceito de energia mecânica específica, MSE, busca mensurar, através de uma taxa, a relação entre a quantidade de energia aplicada à broca para que ela perfure uma rocha e a ROP resultante dessa energia [18]. Este conceito auxilia o responsável pela perfuração a identificar se os valores dos parâmetros aplicados são suficientes ou exagerados podendo acarretar um desgaste prematuro da broca. A Equação 3.24 apresenta o cálculo do MSE:

$$MSE = \frac{480 \times T \times RPM}{d_b \times ROP} + \frac{4 \times W}{\pi \times d_b^2} \quad (3.24)$$

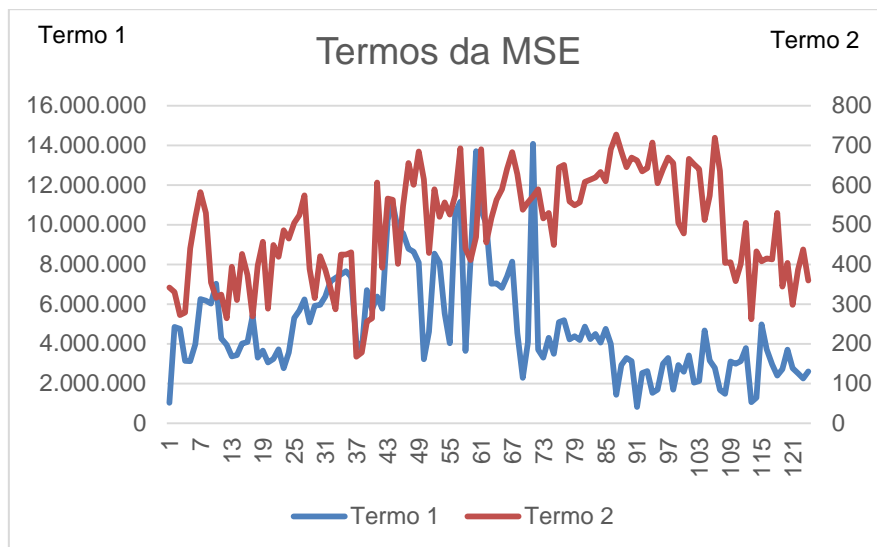
Onde T é o torque registrado em superfície expresso em lb.pé, W expresso em lbf, ROP expressa em pé/h, o diâmetro de broca  $d_b$  expresso em polegadas e a MSE expressa em psi.

Espera-se que a MSE para um tipo de rocha com mesmas propriedades petrofísicas seja constante e vá aumentando ao longo do tempo em razão do desgaste da broca, sendo necessário o ajuste de parâmetros para ao menos manter a ROP.

Considerando-se a perfuração em um cenário homogêneo, quanto menor a MSE significa que a ROP é maior, aumentando a vida útil da broca em virtude da aplicação de valores mais brandos para os parâmetros. Como a análise de MSE se baseia em parâmetros de perfuração, faz-se necessário frisar que a origem do dado a ser estudado é muito importante. O presente trabalho utiliza dados de *mud logging* registrados em superfície. A leitura de torque na superfície sofre forte influência do contato dos

componentes do BHA com a parede do poço e da rpm aplicada a coluna (Apêndice B). Dessa forma, ter a leitura de fundo de ferramentas de M/LWD, como no trabalho de Pessier [27], agregaria bastante valor ao estudo.

Na prática percebe-se que na Equação 3.24 o primeiro termo da equação é o que tem maior representatividade no valor da MSE. O torque de superfície, soma do torque na coluna e na broca, multiplicado pela rpm resulta em um valor muito maior que o PSB, em lbf, multiplicado por 4 dividido pelo quadrado do diâmetro da broca. Dessa forma, o torque é o valor com maior influência no MSE sendo ele utilizado no campo como indicador de ineficiência da perfuração.



**Figura 3.1: Análise dos termos 1 e 2 do cálculo de MSE, em psi.**

### 3.7 MODELO DE OHARA

O Modelo de Ohara [5] é um modelo de previsão de ROP para brocas tricônicas, o qual, dentre os grupos de fatores mencionados que influenciam a taxa de penetração (Capítulo 2), não considera a viscosidade dos fluidos de perfuração nem a permeabilidade da formação. Tal estudo limitou-se a poços verticais, com a premissa de que, em poços direcionais, a escolha dos parâmetros de perfuração é feita pelo engenheiro de perfuração direcional com objetivo de atingir a trajetória de projeto de poço. Logo isso pode impactar diretamente na ROP registrada.

Quanto à hidráulica de perfuração, partiu-se do pressuposto de que os jatos de broca, vazão e pressão de bombeio são ideais, logo a limpeza do poço é ideal, premissa de alguns modelos apresentados de previsão de ROP. Por último, para uso do Modelo de Ohara deve-se ter na área ao menos um poço com dados registrados metro a metro pelo *mud logging*, logo, em um poço pioneiro, sugere-se não aplicar o modelo.

O Modelo de Ohara foi desenvolvido com base nas metodologias consideradas por Bourgoyne & Young [22] e Reza & Alcocer [24], sendo ele uma relação exponencial de parâmetros advindos de um processo de análise dimensional. Além desses modelos, o estudo de Ohara contempla o método de seleção de brocas proposto por Mason [28], o qual mostrou-se consistente e prático. Isto é bom, pois conforme visto, há modelos para previsão de ROP que são muito complexos limitando suas aplicações.

O Modelo de Ohara propôs a inclusão da resistência à compressão da rocha, em relação à Bourgoyne & Young, sendo para seu autor, um ponto de dificuldade para a aplicabilidade do modelo em virtude do acesso a tal informação na época. Para alguns parâmetros, algumas hipóteses e considerações foram feitas para conferir ao modelo um maior grau de similaridade com a realidade física do problema de modelagem da ROP, caso dos parâmetros  $X_4$  e  $X_5$  [5]. O Modelo de Ohara é expresso conforme a Equação 3.25:

$$\frac{ROP}{N \times d_b} = e^{(b_1 + \sum_{j=2}^6 X_j b_j)} \quad (3.25)$$

Onde  $b_i$  ( $i=1, \dots, 6$ ) são os coeficientes a serem determinados por regressão linear e  $X_j$  ( $j=2, \dots, 6$ ) são parâmetros de perfuração definidos como:

Parâmetro de Peso sobre Broca:

$$X_2 = \ln \left[ \frac{W}{S_c \times d_b^2} \right] \quad (3.26)$$

Onde  $S_c$  é a resistência à compressão da rocha expressa em psi,  $W$  é o peso sobre a broca expresso em Klbf e  $d_b$  é o diâmetro da broca expresso em polegadas.

Parâmetro de  
Diferencial de  
Pressão:

$$X_3 = -\frac{\Delta P}{S_c} \quad (3.27)$$

Onde  $\Delta P$  é o diferencial de pressão entre a pressão no fundo do poço e a pressão de poros da formação, expresso em psi.

Parâmetro de  
Compactação:

$$X_4 = \left(2 - \frac{D}{d_b} \times 5 \cdot 10^{-5}\right) \quad (3.28)$$

Onde D é a profundidade do poço expressa em pés.

Parâmetro de  
Hidráulica:

$$X_5 = \ln\left(\frac{JIF}{S_c \times d_b^2}\right) \quad (3.29)$$

Para cálculo o cálculo de JIF, utiliza-se:

$$JIF = 0,01823 \times C_d \times Q \times \sqrt{\rho_f \times \Delta P_b} \quad (3.30)$$

Para o cálculo da perda de carga na broca,  $\Delta P_b$ , são necessários à vazão aplicada, Q, o peso do fluido de perfuração,  $\rho_f$ , o coeficiente de descarga,  $C_d$  sendo 0,95, e TFA.

$$\Delta P_b = \frac{8,311 \times 10^{-5} \times \rho_f \times Q^2}{C_d^2 \times TFA^2} \quad (3.31)$$

Por último  $X_6$  é o parâmetro que mensura o efeito do desgaste dos dentes na ROP onde h é uma constante que depende do tipo de broca tricônica (leia-se IADC).

Parâmetro de  
desgaste do dente da  
broca:

$$X_6 = -\frac{h}{D_b} \quad (3.32)$$

A revisão bibliográfica apresenta alguns dos diversos modelos para previsão de ROP existentes na literatura, eles são bem variados em suas composições, às vezes, bastante complexos, o que pode ser um limitante a aplicação devido à falta de dados e a dificuldade de aplicação no campo. A seguir a Tabela 3.2 resume os modelos para previsão da ROP apresentados.

**Tabela 3.2: Resumo dos modelos para previsão de ROP.**

MODELO	EQUAÇÃO	OBS:
<b>Maurer</b>	$ROP = k \frac{N \times PSB}{d_b^2 \times S_c^2}$	Broca tricônica; Limpeza perfeita.
<b>Warren</b>	$ROP = \left( \frac{a \times S^2 \times d_b^2}{N^b \times PSB^2} + \frac{c}{N \times d_b} \right)^{-1}$	Broca tricônica; Limpeza perfeita; Tensão confinante.
<b>Bourgoyne &amp; Young</b>	$ROP = f_1 \times f_2 \times \dots \times f_7 \times f_8$	Broca tricônica.
<b>Reza &amp; Alcocer</b>	$\frac{ROP}{N \times d_b} = k \left[ \frac{N \times d_b^2}{\vartheta} \right]^{aR_1} \left[ \frac{N \times d_b^3}{Q} \right]^{aR_2} \left[ \frac{S_c \times d_b}{PSB_d} \right]^{aR_3} \left[ \frac{\Delta P \times d_b}{PSB_d} \right]^a$	Broca tricônica; Viscosidade.
<b>Matahhari</b>	$ROP = W_f \times G \times \frac{PSB^a \times N^b}{S \times d_b}$	Broca PDC; Limpeza perfeita.
<b>Dupriest</b>	$MSE = \frac{480 \times T \times RPM}{d_b \times ROP} + \frac{4 \times PSB}{\pi \times d_b^2}$	MSE; Sem restrição de broca
<b>Ohara</b>	$\frac{ROP}{N \times D_b} = e^{(b_1 + \sum_{j=2}^6 X_j b_j)}$	Broca tricônica; Limpeza perfeita.

## CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

Para o estudo de adaptação do Modelo de Ohara para uso em brocas com cortadores fixos do tipo PDC são utilizados registros de quatro corridas realizadas com brocas distintas, Tabela 4.1.

As corridas, Tabela 4.2, são de uma mesma região com lâminas d'água similares, intervalos perfurados em mesmo cenário geológico, 100% rochas carbonáticas sem intercalações. No entanto, não há disponibilidade das análises de amostras de calha que auxiliariam na diferenciação dos tipos de rochas carbonáticas dentro desse conjunto de dados. Todas as corridas utilizam fluido sintético. Para cálculo da resistência à compressão da rocha (Seção 4.2.3) utilizam-se perfis DT e NPHI.

**Tabela 4.1: Características das brocas utilizadas no estudo.**

Corrida	Diâmetro (pol)	Cortador (mm)	IADC	Pés	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
A	12 ¼	13	M0813	312	2	8	MA	O	D	1	IL	TP
B	12 ¼	16	M0816	636	3	8	ID	O	D	0	MA	TP
C	8 ½	14	M0614	640	1	6	MA	O	D	0	IQ	TP
D	8 ½	13	M0613	420	3	2	IQ	T	D	1	IL	TP

São duas corridas com brocas 12 ¼” e duas com 8 ½”. Dentro de cada grupamento as brocas possuem IADC diferentes. Para 12 ¼” são duas brocas com 8 aletas, uma com cortadores de 13 mm e a outra com de 16 mm. Já para 8 ½” são duas com 6 aletas, uma com cortadores de 14 mm e a outra com de 13 mm.

Todas as 4 corridas foram retiradas por motivo de baixa taxa de penetração. As de 12 ¼” apresentaram elevados desgastes dos cortadores, registrando nível 8 para os cortadores externos e desgastes internos 2 e 3, bem próximos. Por outro lado, as brocas 8 ½” apresentaram desgastes sem qualquer similaridade, colunas D1 e D2 da Tabela 4.1, desgastes inferiores a 4.

**Tabela 4.2: Características das corridas utilizadas no estudo.**

<b>Corrida</b>	<b>Tipo de Trajetória</b>	<b>Ângulo</b>	<b>Equipamento de Perfuração</b>	<b>Anomalias na Perfuração</b>
<b>A</b>	Direcional	<30°	Não	Não
<b>B</b>	Vertical	-	Não	Não
<b>C</b>	Vertical	-	Não	Não
<b>D</b>	Vertical	-	Não	Não

Quanto à trajetória das corridas, três são em poços verticais e apenas uma em direcional, Corrida A. No entanto, é um poço com pouco ganho de inclinação. Soma-se a isso a informação de que não foram utilizados equipamentos de perfuração em seu BHA. Logo, o intervalo perfurado nela foi em modo rotativo, em que se mantém o ângulo ganho, denotado trecho tangencial. Nenhuma corrida apresentou anomalias ao longo da perfuração. Sendo assim, não há quaisquer justificativas para que tenha havido bruscas mudanças nos parâmetros de perfuração aplicados, como por exemplo, grande variação na vazão aplicada.

Porém, às vezes, encontram-se experimentos em que dados registrados são motivo de desconfiança por estarem fora da faixa de valor da grande maioria. No caso desse estudo, a aquisição de inúmeros dados em tempo real pode sofrer influência de diversos acontecimentos, seja algo inesperado no decorrer da perfuração seja a leitura dos sensores de superfície.

Assim, esses possíveis dados equivocados, que possam não corresponder à realidade da operação de perfuração, devem ser encontrados através de uma varredura do conjunto de registros. Mesmo que eles visivelmente possam parecer errados, pontos discrepantes no espaço amostral não podem simplesmente ser descartados, uma vez que eles, de repente, podem ser na verdade um fenômeno peculiar para um momento da operação. Deve haver uma análise consistente que justifique a eliminação desses dados discrepantes, denominados *outliers*, baseado em algum fundamento matemático que corrobore a retirada desses dados espúrios do conjunto de dados.

## 4.1 TRATAMENTO DE DADOS

Na literatura há diversas metodologias para tratamento de dados e optou-se pelo método de diagrama em caixas [29], conhecido como “Box-Plot”. Para melhor entendimento deste método alguns conceitos devem ser apresentados.

Média aritmética e desvio padrão são as medidas mais usadas para avaliar a posição central e a dispersão de um conjunto de valores. Contudo, essas medidas são fortemente influenciadas por valores discrepantes. Dessa forma, utiliza-se a mediana  $M_d$ . Ela é o valor que divide os dados amostrais ao meio, deixando os 50% maiores valores de um lado e os 50% menores em outro.

Em geral, dado um conjunto de dados, a média é a medida de posição central mais adequada, quando se supõe que tais dados tenham distribuição razoavelmente simétrica, enquanto a mediana é uma alternativa para representar a posição central em distribuições muito assimétricas.

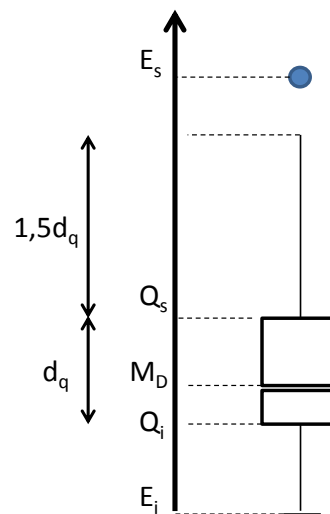
Além da mediana, para uso do Box-Plot, é necessário o cálculo do 1º e 3º quartis para definição de limites inferiores e superiores para identificação de possíveis *outliers*.

Chama-se de 1º quartil, ou inferior,  $Q_1$ , ao valor que delimita os 25% menores valores do conjunto de dados. O 3º quartil, ou superior,  $Q_3$ , é o valor que separa os 25% maiores valores. O 2º quartil é a própria mediana. Assim como a mediana, ordena-se os dados de maneira crescente ou decrescente. Utilizando a planilha eletrônica EXCEL, aplica-se a função QUARTIL (lista, quarto), onde quarto será 1 (um) ou 3 (três). O desvio entre quartis,  $d_q = Q_3 - Q_1$ , é utilizado como medida de dispersão em Box-Plot. Quanto mais dispersa a distribuição, maior o valor de  $d_q$ .

Tendo esses conceitos em mente fica fácil utilizar o método de Box-Plot para identificação de possíveis *outliers*. Dois retângulos são desenhados, de forma que um represente o espaço entre o quartil inferior e a mediana, e o outro a mediana e o quartil superior. Esses retângulos juntos representam a faixa dos 50% dos valores mais típicos

da distribuição. Entre os quartis e os extremos superior,  $E_s$ , e inferior,  $E_i$ , traça-se uma linha. A partir daí investigam-se os *outliers*.

Caso haja valores inferiores a  $Q1 - 1,5 \times d_q$  ou superiores a  $Q3 + 1,5 \times d_q$ , a linha é traçada até o último valor não discrepante; e os valores discrepantes são identificados por pontos (Figura 4.1). Para o trabalho em questão não é necessário plotar o gráfico, somente identificar quem são os pontos discrepantes.



**Figura 4.1: Esquema gráfico do método “Box-Plot”.**

Porém, pela experiência do autor nas atividades de perfuração em campo, quando há o registro de um possível *outlier* pelos sensores *mud logging*, há chance desse erro se propagar continuamente ao longo de vários metros, não se restringindo a 1 (um) metro. Isto pode acontecer em virtude de questões climáticas, grande movimentação da sonda de perfuração para cima e para baixo, denominado *heave*, fazendo com que haja dificuldade de manter a broca no fundo do poço, mesmo com o acionamento de compensadores de movimento. Com isso, por exemplo, o sensor de peso não registra o PSB aplicado em superfície apropriadamente.

Ainda com base em experiência de campo, os dados mais susceptíveis a erro são os parâmetros de perfuração de superfície, pois estes não possuem tratamento após a

perfuração. Dados de MWD e LWD para geração de perfis são avaliados por corpo técnico especializado, principalmente pela grande importância dessas informações na atualização de modelos geológicos, por exemplo.

Dessa forma, para uso do Box-Plot, um pré-tratamento de dados deve ser feito, uma vez que eles possuem particularidades que devem ser examinadas antes de seguir um roteiro para identificação dos *outliers*.

- Peso sobre broca 0,0 Klbs e ROP 0,0 m/h são valores operacionais que não condizem com a realidade operacional;
- Para o torque, deve-se verificar se o trecho é perfurado em modo orientado. Se sim, a leitura de torque na superfície deverá ser nula assim como a leitura de rpm na coluna. Como todas as corridas são em modo rotativo, girando a coluna de perfuração, as leituras devem ser diferentes de zero assim como as leituras de rpm.

Identificados tais registros operacionais de acordo com a abordagem acima, eles devem ser substituídos pela média aritmética dos cinco registros acima e cinco registros abaixo válidos de tal registro. Caso a quantidade de dados seja insuficiente calcula-se a média aritmética com o que há disponível.

Após esse tratamento preliminar aplica-se o método “Box-Plot”. Sendo identificado um *outlier* esse registro deve ser substituído a partir do cálculo da média aritmética dos cinco registros acima e cinco registros abaixo válidos de tal registro. Caso a quantidade de dados seja insuficiente calcula-se a média aritmética com o que há disponível, não considerando outros dados também identificados como *outliers* para o cálculo da média aritmética que substituirá o *outlier* registrado.

Os dados foram tratados corrida a corrida uma vez que o tipo e diâmetro de broca utilizada influenciam diretamente nos parâmetros de perfuração aplicados, além de que, para cada corrida pode haver uma equipe a bordo diferente, condições ambientais, seja

climática e/ou geológica, variadas, sendo esta última passível mesmo as corridas estando em poços de uma mesma região.

Como não há registros de anomalias de perfuração nas corridas, não há razões que justifiquem que um dado possa ser um potencial *outlier*, exceto erro humano e falha de na medição por sensores. Abaixo um roteiro após o tratamento prévio descrito acima:

1. Aplicação do método Box-Plot para os dados de perfuração;
  - a. Para os dados de RPM, quando sinalizado que é um *outlier*, confrontar com o valor de  $RPM_{broca} = RPM_{coluna} + FR^6 \times Vazão$  cabendo uma análise mais abrangente da vazão aplicada;
  - b. Verificar se os possíveis *outliers* dos parâmetros de perfuração são na mesma linha de registro. Caso sejam, confirma-se, a princípio, o metro perfurado como *outlier*;
2. Aplicação do Box-Plot para os dados de perfil. Se identificado um *outlier* na mesma profundidade que em item 1, qualquer que seja o perfil, o metro não é considerado um *outlier* pois a mudança da leitura de parâmetro de perfuração pode estar associada a mudança litológica, principalmente o ROP. Como já dito, essa variação de parâmetro pode ser na verdade um fenômeno peculiar para um momento da operação;
3. Dados julgados como *outliers*, permanecem em *stand bi* para verificação da frequência de tal evento nas demais corridas, sempre separando por tipo e diâmetro de broca. Caso haja representatividade dos dados eles são utilizados. Do contrário, os *outliers* são substituídos conforme descrito.

---

<sup>6</sup> É o número de revoluções que o equipamento de fundo é capaz de fornecer para cada 1 gpm de vazão (rev./gal).

Um exemplo de como o tratamento de dados foi realizado pode ser visto no Apêndice D.

## **4.2 ADAPTAÇÃO DO MODELO DE OHARA PARA BROCAS PDC**

Como visto no Capítulo 2, há diversos fatores que influenciam na ROP. O Modelo de Ohara contempla grande parte deles. Como dito, ele é um modelo proposto para brocas tricônicas. Para o estudo de sua adaptação para brocas do tipo PDC, algumas premissas são adotadas para posterior avaliação de sua aplicabilidade em um cenário diferente do proposto por Ohara.

Assim como no Modelo de Ohara, não é considerada a viscosidade do fluido de perfuração nem a permeabilidade da rocha. Buscando minimizar possíveis efeitos da reologia do fluido todos os dados são originários de corridas com fluidos sintéticos. Como as corridas não tiveram quaisquer anomalias (perdas ou ganhos na circulação, prisões de coluna etc.) assume-se que o modelo é aplicável para uma limpeza perfeita. Logo, com relação à hidráulica de perfuração parte-se do pressuposto de que os jatos de broca, vazão e pressão de bombeio são ideais.

Para cálculo da resistência à compressão da rocha, utiliza-se o conceito de UCS, *Unconfined Compressive Strength* ou *Uniaxial Compressive Strength*, que indica o quão uma rocha é competente, dificultando sua perfuração. Quanto maior seu valor, maior a resistência à compressão da rocha. É calculado a partir dos perfis DT e NPHI.

Para o desgaste dos cortadores e cálculo do diferencial de pressão respectivamente, são feitas suposições uma vez que o modelo agora é para broca PDC e faltam informações relativas ao gradiente de pressão de poros. Desconhece-se também o tipo de fluido contido dentro do espaço poroso da rocha que podem afetar a leitura do perfil sônico. Por último, para uso desse modelo adaptado deve-se ter na área ao menos um poço com dados registrados metro a metro pelo *mud logging*, para ajuste do modelo.

#### 4.2.1 Estimativa do diferencial de pressão

Uma das variáveis de entrada no Modelo de Ohara é o  $\Delta P$ , utilizado para cálculo do parâmetro  $X_3$ . A pressão hidrostática do fluido é encontrada através da profundidade e densidade do fluido de perfuração, os quais são conhecidos. No entanto, nesse estudo não estão disponíveis dados do gradiente de pressão de poros ( $g_p$ ).

Tal gradiente pode ser encontrado diretamente através de testes realizados em formações permeáveis, intervalos produtores ou potencialmente produtores [17]. As medidas adquiridas nesses testes, em regra, são assumidas como verdades absolutas, e servem muitas vezes para calibrar os métodos indiretos de estimativas de pressão de poros. Entretanto, um problema é o fato de seus registros serem pontuais, quanto maior o número de registros maior o custo operacional, ou seja, não há uma curva de pressão de poros ao longo de todo poço.

Na ausência de quaisquer testes pode-se tentar estimar o  $g_p$  através de métodos empíricos, também denominados métodos indiretos. Na indústria um dos mais utilizados é o Método de Eaton [17]. Neste método a pressão de poros a certa profundidade é função do gradiente de sobrecarga ( $g_{ov}$ ), gradiente de pressão de poros normal ( $g_N$ ), ambos em lb/gal, e a razão entre o valor do parâmetro de tempo de trânsito observado ( $\Delta t_o$ ), do valor da linha de tendência de compactação normal ( $\Delta t_N$ ), ambos em  $\mu s/ft$ , e do expoente escolhido.

O expoente é função da área em estudo e do parâmetro que está sendo utilizado. Para o Golfo do México [17], por exemplo, o expoente foi definido como 3,0 para o perfil sônico. Por desconhecimento do valor do expoente da região em estudo adota-se o valor de 3,0.

$$g_p = g_{ov} - \left[ (g_{ov} - g_N) \times \left( \frac{\Delta t_N}{\Delta t_o} \right)^{3,0} \right] \quad (4.1)$$

Para encontrar o gradiente de sobrecarga é necessário estimar o perfil de densidade. Para estimá-lo, algumas premissas são adotadas. Em profundidades superficiais em que

não há informação a respeito da litologia perfurada, assume-se o valor de  $1,95 \text{ g/cm}^3$  para a densidade. Quando o perfil sônico estiver disponível em uma dada profundidade, assim como a litologia, utiliza-se a correlação desenvolvida por Bellotti [17], assumindo valores de tempo de trânsito na matriz da rocha conforme Figura 4.2.

TABLE 1—RATIO OF SHEAR TO COMPRESSIVE TRAVEL TIME <sup>7-9</sup>		
Formation Lithology	$\Delta t_s / \Delta t_o$	Matrix-Rock Velocity (ft/sec)
Anhydrite	2.45	20,000
Basalt	1.55	20,150
Chalk	2.45	8,500
Chert	1.60	22,300
Clay	3.20	6,000
Claystone	1.90	19,000
Diabase	1.70	22,700
Diorite	1.75	22,000
Dolomite	1.80	25,000
Epidosite	1.70	23,000
Gabbro	1.60	23,500
Gneiss	1.80	25,000
Granite	1.70	21,350
Gypsum	2.45	19,050
Hornstone	1.85	25,000
Limestone (clean)	1.90	21,000
Limestone (most are silty)	2.10	21,000
Limestone (argillaceous)	2.30	21,000
Marble	1.80	24,000
Mudstone	1.85	19,000
Pyrite	1.70	28,000
Quartz	1.55	20,000
Quartzite	1.50	21,500
Salt	2.15	15,000
Sandstone (clean)	1.60	19,500
Sandstone (silty)	1.70	19,500
Sandstone (argillaceous)	1.85	19,500
Shale	1.70 to 1.75	19,500
Siltstone	1.80	23,000

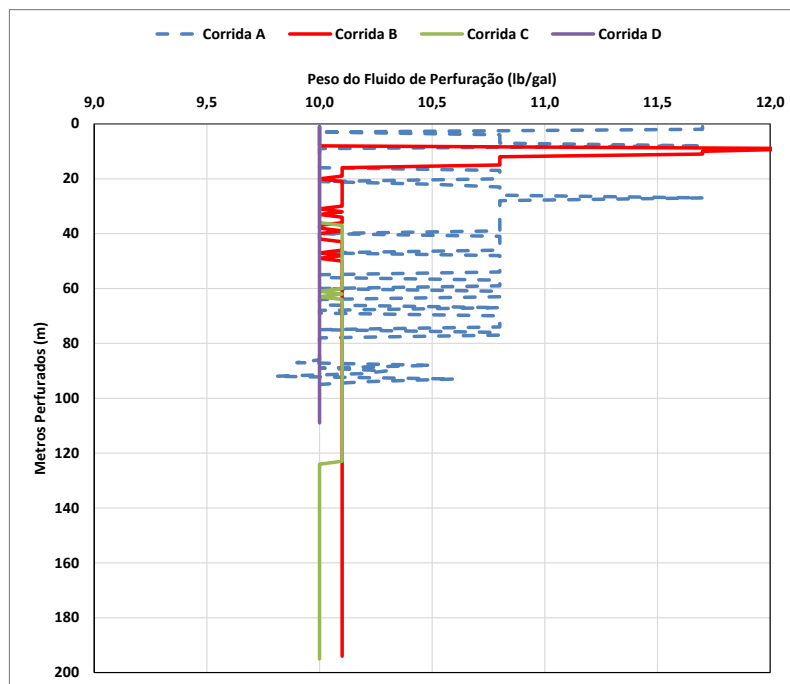
Figura 4.2: Tempo de trânsito na matriz da rocha [28].

No entanto, a forma na qual calculou-se o  $g_p$  por Eaton, assumindo um expoente 3,0, não foi encontrado um resultado satisfatório. Muitas suposições têm que ser feitas interferindo no resultado. O gradiente estimado varia bastante em curtos intervalos de metro.

Observado isso, analisaram-se os perfis de pesos de fluido de perfuração utilizados, Figura 4.3. Baseado neles, sugere-se que os  $g_p$  são normais. A corrida A apresenta peso de fluido muito intermitente com elevadas variações em curto espaço de metros perfurados, assim, os dados registrados desse parâmetro não são confiáveis para tal

corrida o que afeta o cálculo do diferencial de pressão mesmo que a pressão de poros estimada estivesse coerente com valores encontrados ao longo da perfuração. Isso nos remete ao Capítulo 2, aos problemas relacionados aos sensores de medição do *mud logging*. Como não há quaisquer registros de anomalia ao longo da perfuração em A, assume-se também que ela possui pressão de poros normal.

Dessa forma, além de aplicar o resultado de Eaton ao parâmetro  $X_3$ , sabendo-se que os valores possivelmente são irreais ante os encontrados na prática, são feitas simulações considerando  $\Delta P$  igual a 0,5 lb/gal. Isto é uma forma de fazer uma análise de sensibilidade do parâmetro  $X_3$  na predição da ROP verificando sua influência no modelo.



**Figura 4.3: Peso do fluido de perfuração metro a metro das corridas.**

#### 4.2.2 Estimativa do desgaste de cortadores

Para adaptação do Modelo de Ohara a brocas com cortadores fixos, propõe-se análises de desgaste para os cortadores, parâmetro  $X_6$ .

Apesar da identificação da localização do desgaste da broca ser difícil de prever, a quantificação do desgaste dos cortadores durante o avanço da perfuração é de grande importância na otimização da perfuração influenciando na decisão do ponto de parada para substituição da broca reduzindo o custo por metro da perfuração. No entanto, não há disponível o desgaste para cada ponto da perfuração, somente medido quando a broca é retirada do poço.

Na literatura há diversos modelos, porém nenhum que calcule precisamente o desgaste da broca devido às complexas condições no fundo do poço [25]. Frequentemente modelos analíticos e análises em tempo real são usadas separadamente para estimar e prever o desgaste nos cortadores da broca. Isso porque o nível de desgaste dos cortadores varia constantemente com o avanço da perfuração.

Há situações que os cortadores internos são mais desgastados, situações em que o desgaste ocorre em um determinado local da broca (calibre, ombro, pescoço). Em [26], Rahimzadeh (2010), apresenta uma relação linear para o efeito do desgaste dos cortadores, Equação 3.23. Apesar de identificado que quando essa relação é aplicada em simulações de ROP os valores encontrados são inferiores ao real e, caso o modelo para previsão de ROP esteja correto, o desgaste dos cortadores são superestimados [26].

Como a proposta de adaptação do Modelo de Ohara para brocas com cortadores fixos se baseia somente em poços já perfurados, desgaste IADC conhecido, a Equação 3.23 será utilizada como parâmetro  $X_6$ . Rashidi [30] alterou a para previsão em tempo real do desgaste dos cortadores usando dados de ROP, Equação 4.2.

$$W_f = 1 - a_o \left( \frac{\Delta BG}{8} \right)^{b_o} \quad (4.2)$$

Onde  $\Delta BG$  é o desgaste IADC,  $a_o$  e  $b_o$  são constantes do modelo.

Os desgastes previstos utilizando a Equação 4.2 apresentaram similaridades com os reais. Porém, o método não se mostrou funcional para planejamento antes do início da perfuração. Ou seja, as constantes têm de ser ajustadas ao longo da perfuração o que prejudica seu uso. Baseando-se no conceito de desgaste linear [26], uma proposta para cálculo de  $X_6$  nesse trabalho é:

$$X_6 = \frac{\Delta BG}{L} \times \Delta S \quad (4.3)$$

$\Delta S$  é o intervalo perfurado,  $\Delta BG$  é o desgaste IADC, considerado o maior nível de desgaste, assim como para Equação 3.23, e  $L$  é o comprimento da corrida. Como as brocas do conjunto de dados dessa dissertação possuem IADC diferenciados, assumindo também que o desgaste seja linear, adapta-se a Equação 4.3 para o tamanho dos cortadores sendo  $\Delta DC$  o desgaste linear dos cortadores. É feita uma normalização para converter o diâmetro do cortador ( $Cort$ ), de milímetros para metro, Equação 4.4.

$$X_6 = \frac{\Delta DC}{L} \times \Delta S, \quad \Delta DC = \frac{Cort}{L \times 1000} \quad (4.4)$$

### 4.2.3 Estimativa da resistência à compressão da rocha

A UCS é utilizada para estimar a resistência à compressão da rocha, expressa em unidade de pressão. Para determinar a UCS de uma rocha comumente são utilizadas técnicas de medições diretas e indiretas. A medição direta é feita através de ensaios de laboratório correlacionando as leituras de perfis com as forças exercidas, tensões aplicadas sobre os testemunhos<sup>7</sup>.

A UCS correlaciona propriedades físicas das rochas com deformações sofridas por elas quando expostas a determinadas pressões, os parâmetros de perfuração aplicados para

---

<sup>7</sup> Amostras de rocha extraídas do poço a partir da operação de testemunhagem.

desagregar a rocha, além de suas respectivas leituras de propriedades petrofísicas. De posse desses dados, pesquisadores criaram correlações matemáticas, métodos indiretos para medição da UCS.

Santos e Ferreira [31] estudaram o comportamento mecânico de rochas carbonáticas para criar uma correlação matemática própria que se adeque melhor aos seus cenários de aplicação através de testes em laboratório comparando-os com diversas correlações matemáticas existentes na literatura. A correlação encontrada por eles, Equação 4.5, baseia-se no módulo de elasticidade de Young, e o volume de folhelho contido na formação, valor adimensional entre 0 e 1, representando o percentual. Tais variáveis não estão entre os dados disponíveis para realização do presente estudo além de serem extremamente difíceis de serem obtidas durante um acompanhamento em tempo real.

$$Sc = 0,0045 \times E \times (1 - V_{sh}) + 0,008 \times E \times V_{sh} \quad (4.5)$$

O Modelo de Ohara aplica o método de seleção de brocas proposto por Mason [28]. Baseando-se em correlações empíricas existentes na literatura, verifica-se qual correlação existente melhor se adequaria ao modelo.

Para identificar qual correlação se encaixaria melhor ao Modelo de Ohara provendo assim a melhor previsão de ROP, inicialmente fez-se uso do Coeficiente de Correlação, também conhecido como Coeficiente de Pearson [32], com a intenção de encontrar, dentre as formulações da Tabela 4.3 e Mason, as que apresentam melhor correlação com a ROP e demais parâmetros de perfuração. Importante utilizar a premissa de que no campo espera-se que ROP e UCS sejam inversamente proporcionais, quanto maior a ROP menor a UCS e vice-versa.

**Tabela 4.3: Correlações matemáticas para calcular a UCS [31].**

Name	Expression	Comments
CPM	$UCS_{[MPa]} = 8.374 \cdot 10^{-21} \cdot \rho_{[kg/m^3]}^2 \cdot Vp_{[m/s]}^4 \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} \right)^3 (1-2\nu)$	Carbonate rocks
King (1983)	$UCS_{[MPa]} = 4.31 \left( \frac{Ed\gamma n_{[GPa]}}{10} \right)^{1.705}$ $Est_{[GPa]} = 1.263 \cdot Ed\gamma n_{[GPa]} - 29.5$	Igneous and metamorphic rocks of the Canadian shield
Lacy (1997)	$UCS_{[MPa]} = 0.2787 \cdot Est_{[GPa]}^2 + 2.458 \cdot Est_{[GPa]}$ $Est_{[GPa]} = 0.0018 \cdot Ed\gamma n_{[GPa]} + 0.422 \cdot Ed\gamma n_{[GPa]}$	Several hundred samples of sandstones, shales, limestones and dolomites
Eissa and Kazi (1988)	$Est_{[GPa]} = 0.074 \cdot Ed\gamma n_{[GPa]} - 0.82$ $Est_{[GPa]} = 1.047 \cdot (\rho_{[kg/cm^3]} \cdot Ed\gamma n_{[GPa]})^{0.77}$	342 test results from several sources
Militzer and Stoll (1973)	$UCS_{[MPa]} = 81320 \cdot Vp_{[p/\mu s]}^{1.82}$	
Golubev and Rabinovich (1976)	$UCS_{[MPa]} = 10^{109.14 \cdot Vp_{[p/\mu s]} + 0.279}$	
Limestone	$UCS_{[MPa]} = 13.8 \cdot E_{[GPa]}^{0.51}$	$10 < UCS_{[MPa]} < 300$
Dolomite	$UCS_{[MPa]} = 25.1 \cdot E_{[GPa]}^{0.34}$	$60 < UCS_{[MPa]} < 100$
Rzhevsky and Novik (1971)	$UCS_{[MPa]} = 276 \cdot (1-3\phi)^2$	Korobcheyev deposit - Russia
Chang (2004)	$UCS_{[MPa]} = 143.8 \cdot e^{-6.95\phi}$	Middle East $30 < UCS_{[MPa]} < 150$ $0.05 < \phi < 0.20$
Chang (2004)	$UCS_{[MPa]} = 135.9 \cdot e^{-4.8\phi}$	$10 < UCS_{[MPa]} < 300$ $0 < \phi < 0.2$
Smorodinov (1970)	$UCS_{[MPa]} = 17.9 \cdot e^{-0.91\phi}$	Group of carbonate rocks
Farquhar et al(1994)	$UCS_{[MPa]} = 174.8 \cdot e^{-9.3\phi}$ $Est_{[GPa]} = 69.05 \cdot e^{-6.0\phi}$	Carbonate rocks
Edlmann et al (1988)	$UCS_{[MPa]} = -322.5 \cdot \phi + 129.54$ $Est_{[GPa]} = -78.31 \cdot \phi + 38.878$	Samples from a number of North Sea fields - wide range of porosities, mineralogy and heterogeneities.
Ameen et al (2009)	$UCS_{[MPa]} = 62.567 \cdot e^{-2.03\phi}$	Dolomite
	$Est_{[GPa]} = 92.612 \cdot e^{-4.75\phi}$	Ghawar field
	$UCS_{[MPa]} = 89.432 \cdot e^{-5.46\phi}$ $Est_{[GPa]} = 86.094 \cdot e^{-5.34\phi}$	Limestone

Da Tabela 4.3 utilizam-se:

$$\begin{array}{l} \text{Militzer \& Stoll} \\ \text{(1973)} \end{array} \quad UCS_{[MPa]} = 81320 \times V_P^{1,82} [p\acute{e}/\mu s] \quad (4.6)$$

$$\begin{array}{l} \text{Golubev \&} \\ \text{Rabinovich (1976)} \end{array} \quad UCS_{[MPa]} = 10^{109,14 \times Vp [p\acute{e}/\mu s] + 0,279} \quad (4.7)$$

$$\text{Chang (2004).} \quad UCS_{[MPa]} = 135,9 \times e^{-4,8 \times \phi} \quad (4.8)$$

$$\text{Smoridonov (1970)} \quad UCS_{[MPa]} = 17,9 \times e^{-0,91 \times \phi} \quad (4.9)$$

Farquhar et al (1970).

$$UCS_{[MPa]} = 174,8 \times e^{-0,93 \times \phi} \quad (4.10)$$

O Coeficiente de correlação é normalmente designado por “r” para dados referentes a amostras. Sua utilização é bastante difundida em problemas envolvendo o relacionamento linear entre duas variáveis (X e Y), pois além de quantificar a correlação existente entre elas, ainda a qualifica [32].

$$r_{X,Y} = \frac{\text{Covariância (X, Y)}}{\text{DESVIO PADRÃO(X)} \times \text{DESVIO PADRÃO(Y)}} \quad (4.11)$$

Considerando que o desvio padrão de qualquer variável será sempre um número não negativo, o Coeficiente de Correlação terá o mesmo sinal da covariância. Interpreta-se, portanto, da seguinte forma:

- Quando diferente de zero, indicará dependência entre as variáveis, evidenciando relacionamentos positivos e negativos;
- A escala do Coeficiente de Correlação é entre -1 e 1, onde -1 significa uma correlação 100% negativa, inversa, e 1 significa uma correlação 100% positiva, direta;
- Quanto mais próximo de zero poderá indicar independência entre a ROP e UCS ou relacionamentos não lineares, mais plausível a segunda possibilidade, em caso de aproximação do zero.

Por exemplo, os perfis DT e NPHI apresentam um coeficiente de correlação positivo de 0,71 de um máximo de 1, ou seja, maior DT maior a porosidade da rocha. A maior vantagem do perfil DT provém da relação direta que existe entre o tempo de trânsito de uma onda sonora em uma rocha e sua porosidade.

Esse valor de 0,71 significa que para os dados estudados, 71% do valor do DT é explicado pela porosidade da formação. Os demais 29%, não abordados nessa dissertação, são explicados por outros motivos. Por exemplo, foi dito que o meio em

que a onda sonora se propaga influi na leitura de DT, logo o fluido dentro do espaço poroso (gás, óleo ou água) é um dos fatores que afetam a leitura do perfil.

Primeiro analisa-se o coeficiente de correlação entre a ROP e a UCS calculada pelas correlações empíricas apresentadas acima (Tabela 4.4):

**Tabela 4.4: Coeficientes de Correlação entre ROP e correlações UCS.**

ROP x UCS por:	r
Mason	0,14
Chang	0,25
Farquhar	0,27
Militzer e Stoll	0,08
Golubev	0,07
Smorodinov	0,22

Nenhum dos coeficientes apresentou correlação negativa, o contrário do esperado. Isto pode se justificar pela atuação do responsável pela perfuração na modificação de parâmetros para ao menos tentar manter a ROP anterior, diante um suposto incremento da UCS. Outra questão é o desgaste que a broca sofre ao longo da perfuração, conseqüentemente afetando a eficiência da perfuração. Dessa forma, calcula-se o coeficiente de correlação entre UCS x PSB (Tabela 4.5).

**Tabela 4.5: Coeficientes de Correlação entre PSB e correlações de UCS.**

PSB x UCS por:	r
Mason	0,19
Chang	0,05
Farquhar	0,04
Militzer e Stoll	0,22
Golubev	0,23
Smorodinov	0,05

Na Tabela 4.5, Militzer & Stoll, Golubev & Rabinovich e Mason apresentaram coeficientes positivos mais representativos diante das demais correlações. Como visto no Capítulo 2, a otimização de parâmetros na busca da melhor ROP são a rpm na coluna, PSB e vazão. A vazão, em geral, é um parâmetro muito pouco modificado sujeito à alteração para limpeza ou algum problema de poço relacionado a ganho ou

perda de fluido, não sendo o caso do conjunto de dados estudado. Logo, a combinação PSB e rpm são os parâmetros que o responsável de perfuração modificará com maior frequência para melhoria da ROP.

A MSE utiliza esses parâmetros além do torque e ROP. Assim como o PSB, espera-se que maior a UCS maior a energia dispendida para remoção de um volume de rocha. Porém, de acordo com a Tabela 4.6, todas as correlações são negativas. Logo, a análise de correlação entre MSE e UCS não é de grande valia para o conjunto de dados disponível.

**Tabela 4.6: Coeficientes de Correlação entre MSE e UCS.**

MSE x UCS por:	r
Mason	-0,0964
Chang	-0,1206
Farquhar	-0,1338
Militzer e Stoll	-0,0604
Golubev	-0,0591
Smorodinov	-0,1067

Viu-se no Capítulo 2 que o PSB aplicado varia de acordo com o diâmetro da broca. Dessa forma, o intervalo de valores de peso que pode ser aplicado em uma broca 12 ¼” é maior que em um de 8 ½”. Assim, a população de dados é dividida em 2 grupamentos, pelo diâmetro da broca, Tabela 4.7.

**Tabela 4.7: Correlação de Pearson por diâmetro de broca para UCS x PSB e UCS x ROP.**

PSB x UCS por:	12 1/4"	8 1/2"	ROP x UCS por:	12 1/4"	8 1/2"
Mason	0,22	0,20	Mason	-0,14	0,30
Chang	0,20	0,22	Chang	-0,31	0,34
Farquhar	0,21	0,23	Farquhar	-0,31	0,35
Militzer e Stoll	0,21	0,18	Militzer e Stoll	-0,12	0,28
Golubev	0,23	0,20	Golubev	-0,18	0,29
Smorodinov	0,19	0,22	Smorodinov	-0,31	0,33

Claramente, ao dividir os dados por diâmetros de broca, as formulações para cálculo de UCS apresentam melhores coeficientes de correlação com o PSB, variação 0,19 – 0,23, para diâmetros 12 ¼” e 0,18 – 0,23 para 8 ½”, sendo as correlações com formulações que utilizam porosidade como dado de entrada aumentado consideravelmente ante a análise anterior, Tabela 4.5. Encontrado para o diâmetro 12 ¼” coeficientes negativos entre ROP x UCS, sendo as formulações que utilizam porosidade as maiores.

É difícil definir qual a melhor metodologia de UCS a ser aplicada. Sendo assim, com base no resultado da Tabela 4.7 para o conjunto de dados estudado, são aplicadas as metodologias de UCS de Mason, metodologia citada em [5], Golubev & Rabinovich e Farquhar por serem as que apresentam as melhores correlações entre UCS x PSB e UCS x ROP para perfil DT e NPHI respectivamente, verificando a influência delas no modelo.

Os coeficientes de correlação podem ser aprimorados à medida que se tenha um maior espaço amostral de registros. Além disso, a broca se desgasta influenciando seu desempenho, por conseguinte, afetando os coeficientes de correlação acima, uma vez que, quanto mais desgastada menor será o efeito da alteração de parâmetros na ROP. Aumentando os valores dos parâmetros aplicados, PSB e rpm, apenas acumulará mais energia na coluna de perfuração podendo resultar em vibrações danosas ao BHA e aos cortadores da broca, encurtando o tempo dela no fundo.

### **4.3 - METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RESULTADOS**

Para verificar a aplicabilidade do Modelo de Ohara de previsão de ROP, juntamente com as adaptações propostas, em dados de perfuração com brocas de cortadores fixos, utiliza-se o software *Matlab*, no qual foram feitas diversas simulações baseando-se no exposto na Seção 4.2.

As simulações de 1 a 6 utilizam as corridas A, B e C para o ajuste do modelo e a Corrida D para a previsão. A opção pela Corrida D para previsão se deve unicamente à questão de cronologia da perfuração. Previamente, verificou-se que o PSB apresenta correlação positiva com o ROP mais relevante quando separadas as corridas por

diâmetro, 12 ¼” e 8 ½”. As corridas 12 ¼”, com essa separação, apresentam coeficientes de correlação negativos entre ROP e a UCS. Espera-se, portanto, que os resultados para as simulações 1 à 6 não sejam satisfatórios ao colocar as corridas de diâmetros variados em um mesmo conjunto de dados para ajuste de parâmetros, mesmo as corridas sendo em profundidades similares e atravessando mesmo cenário geológico.

Para o parâmetro  $X_6$ , assume-se  $X_6 = 1 - \frac{\Delta BG}{8}$  (Equação 3.23). Como o modelo será testado em uma corrida que já aconteceu, o desgaste IADC é conhecido. Já  $X_3$ , assume-se um  $\Delta P$  de 0,5 lb/gal e pressão de poros calculada por Eaton.

**Tabela 4.8: Dados de Entrada das simulações 1 a 6.**

<b>Simulação</b>	<b>Modelo de UCS</b>	<b><math>\Delta P</math></b>
<b>1</b>	Farquhar	PP por Eaton
<b>2</b>	Farquhar	Assumido 0,5 lb/gal
<b>3</b>	Golubev	PP por Eaton
<b>4</b>	Golubev	Assumido 0,5 lb/gal
<b>5</b>	Mason	PP por Eaton
<b>6</b>	Mason	Assumido 0,5 lb/gal

Em seguida, tomando o melhor resultado entre as simulações de 1 a 6, faz-se uma análise de sensibilidade retirando os parâmetros  $X_3$  e  $X_6$  do modelo para verificar seus efeitos nos resultados, Tabela 4.9.

**Tabela 4.9: Dados de entradas das simulações 7 à 10.**

<b>Simulação</b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b>Desgaste</b>
<b>7</b>	Sem X3	Equação 3.23
<b>8</b>	PP por Eaton	Sem X6
<b>9</b>	Assumido 0,5 lb/gal	Sem X6
<b>10</b>	Sem X3	Sem X6

Coletados os resultados iniciais, estes são analisados para que se faça a análise posterior separando as corridas por diâmetro. As corridas B e C são utilizadas como dados para ajuste do modelo enquanto A e D são as corridas a serem usadas para testes do modelo. Na Seção 4.2.1, o cálculo de Eaton não apresentou bom resultado, principalmente quando comparado às curvas de peso de fluido utilizadas nas quatro corridas. Dessa forma, para a análise por diâmetro assumiu-se somente  $\Delta P$  de 0,5 lb/gal. A partir da Seção 4.2.2 são utilizadas três propostas de cálculo do parâmetro X<sub>6</sub>, Equação 3.23, já utilizada no primeiro conjunto de simulações, e outras duas suposições, Equações 4.3 e 4.4, sendo feitas as simulações de acordo com a Tabela 4.10.

**Tabela 4.10: Dados de entradas das simulações 11 a 28.**

Simulação	Diâmetro	Modelo de UCS	Desgaste
11	12 ¼"	Farquhar	Equação 3.23
12			Equação 4.3
13			Equação 4.4
14		Golubev	Equação 3.23
15			Equação 4.3
16			Equação 4.4
17		Mason	Equação 3.23
18			Equação 4.3
19			Equação 4.4
20	8 ½"	Farquhar	Equação 3.23
21			Equação 4.3
22			Equação 4.4
23		Golubev	Equação 3.23
24			Equação 4.3
25			Equação 4.4
26		Mason	Equação 3.23
27			Equação 4.3
28			Equação 4.4

A análise de resultados de uma simulação numérica depende do que se deseja provar, analisar, apresentar como resultado [33]. No presente estudo, o interesse é na capacidade do Modelo de Ohara adaptado, a partir de diversas medidas, em prever a ROP metro a metro. Além disso, será feita análise numérica comparativa entre a ROP média real e a ROP média calculada, ou seja, confronto entre dois números, ignorando o comportamento da curva de ROP metro a metro, chamada análise descritiva. Todas as avaliações das simulações são baseadas em:

- Diferença percentual absoluta (“erro absoluto”) entre a média harmônica do ROP real (ROPr) e a média harmônica do ROP calculado (ROPc) para as corridas de ajuste e previsão do Modelo;

$$Erro\ Absoluto = \left( \frac{|ROPr - ROPc|}{ROPr} \right) \quad (4.12)$$

- Erro percentual máximo relativo, pontos onde as curvas de ROP real e calculado apresentam maior afastamento;
- SMAPE (*Symmetric Mean Absolute Percentage Error*).

O SMAPE é comumente utilizado para avaliar a precisão de métodos que se baseiam em dados. A referência mais antiga dessa formulação é a de Armstrong, 1985 [34], onde foi chamado de MAPE ajustado. Calcula-se a partir dos erros percentuais absolutos, conforme a Equação 4.13:

$$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|F_t - A_t|}{|F_t + A_t|} \quad (4.13)$$

A soma das diferenças entre os valores previstos (F) e os valores reais (A) é dividida pela soma de ambos. Esse cálculo é feito para todos os pontos ajustados, logo são somadas as diferenças e o resultado é dividido pelo número total de pontos (n). Quanto menor o valor de SMAPE [35], mais ajustado está o modelo preditivo aos dados reais.

Será dada ênfase ao melhor resultado encontrado nas simulações 11 a 28 avaliando-se a retirada de  $X_6$  do modelo (Simulação 29). Por fim, linhas de registro da corrida de teste da melhor simulação entre 11 a 28 serão retiradas incorporando-se ao ajuste (Simulação 30). Isso é uma forma de supor a coleta de dados em uma situação de acompanhamento em tempo real, assumindo que haja leitura dos perfis utilizados para cálculo de UCS na profundidade de perfuração, sem *offset* dos sensores de medição, sendo o modelo atualizado pelos dados adquiridos na perfuração. Espera-se que o SMAPE tenha redução ante a Simulação 15.

#### 4.4 METODOLOGIA PARA AJUSTE DOS PARÂMETROS

O cálculo dos parâmetros  $b_j$  do modelo de Ohara foi realizado por meio da solução das equações normais [36]. Para cada um dos valores de ROP das corridas selecionadas para ajuste, monta-se uma equação:

$$X_1 b_1 + X_2 b_2 + X_3 b_3 + X_4 b_4 + X_5 b_5 + X_6 b_6 = ROP \quad (4.14)$$

Com isso, obtém-se um conjunto de  $m$  equações, onde  $m$  é o número de dados nas corridas de ajuste, e 6 incógnitas que podem ser escritas matricialmente como:

$$AB = R \quad (4.15)$$

Onde  $A_{ij} = X_j$  do  $i$ -ésimo dado,  $B_j = b_j$  e  $R_i = ROP_i$ , com  $j=1, 2, \dots, 6$  e  $i=1, 2, \dots, m$ .

Os valores dos parâmetros em  $B$  podem ser aproximados de diferentes formas. Aqui, adota-se o critério da minimização da diferença quadrática entre os dados de ROP e valores de ROP calculados pelo modelo. Tal minimização recai na solução do sistema linear (6 equações e 6 incógnitas) conhecido como equações normais:

$$A^T A B = A^T R \quad (4.16)$$

Onde  $A^T$  é a matriz transposta de  $A$ .

Uma vez calculados os valores dos parâmetros, pode-se prever valores de ROP usando o Modelo de Ohara.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

Inicialmente foram feitas as simulações de 1 a 6 utilizando as duas corridas 12 ¼” e a corrida C de 8 ½” como dados para o ajuste do modelo, enquanto a corrida D para teste do modelo. Ou seja, diâmetros diferentes em um mesmo “pacote” de dados para ajuste de parâmetros. Resultados na Tabela 5.1. Os coeficientes gerados em todas as simulações (1 a 30) para ajuste da proposta de adaptação do Modelo de Ohara encontram-se no Apêndice C.

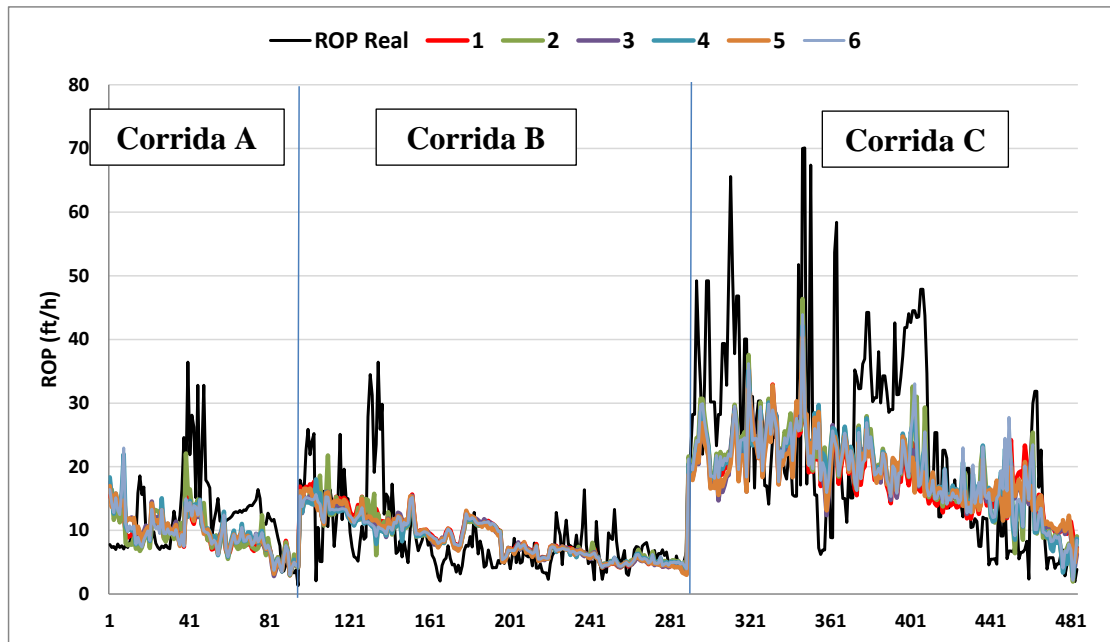
**Tabela 5.1: Resultados das simulações 1 a 6.**

Simulação	AJUSTE					PREVISÃO				
	ROP Média (ft/h)		ERRO		Smape	ROP Média (ft/h)		ERRO		Smape
	Real	Calculada	Absoluto	Máximo Relativo		Real	Calculada	Absoluto	Máximo Relativo	
1	8,67	9,92	14,42%	571,84%	22,52%	15,64	38,16	143,96%	474,43%	40,78%
2	8,67	9,83	13,43%	624,27%	21,47%	15,64	37,54	139,97%	489,28%	40,20%
3	8,67	9,89	14,06%	775,24%	22,43%	15,64	35,11	109,82%	434,00%	35,81%
4	8,67	9,84	13,55%	605,34%	21,42%	15,64	36,20	116,34%	478,10%	35,69%
5	8,67	9,89	14,14%	605,34%	22,34%	15,64	37,57	124,53%	469,68%	37,74%
6	8,67	9,86	13,73%	658,25%	21,80%	15,64	36,31	116,97%	476,57%	36,35%

Analisam-se separadamente os resultados do ajuste e da previsão do modelo. No ajuste as simulações apresentaram resultados bem similares sendo as simulações 2, 4 e 6 com diferencial de pressão de 0,5 lb/gal apresentando erros absoluto e SMAPE ligeiramente menores. O erro máximo relativo ocorre tanto nas simulações utilizando diferencial de pressão de 0,5 lb/gal (simulações 2 e 6) tanto como com a pressão de poros calculada por Eaton (Simulação 3).

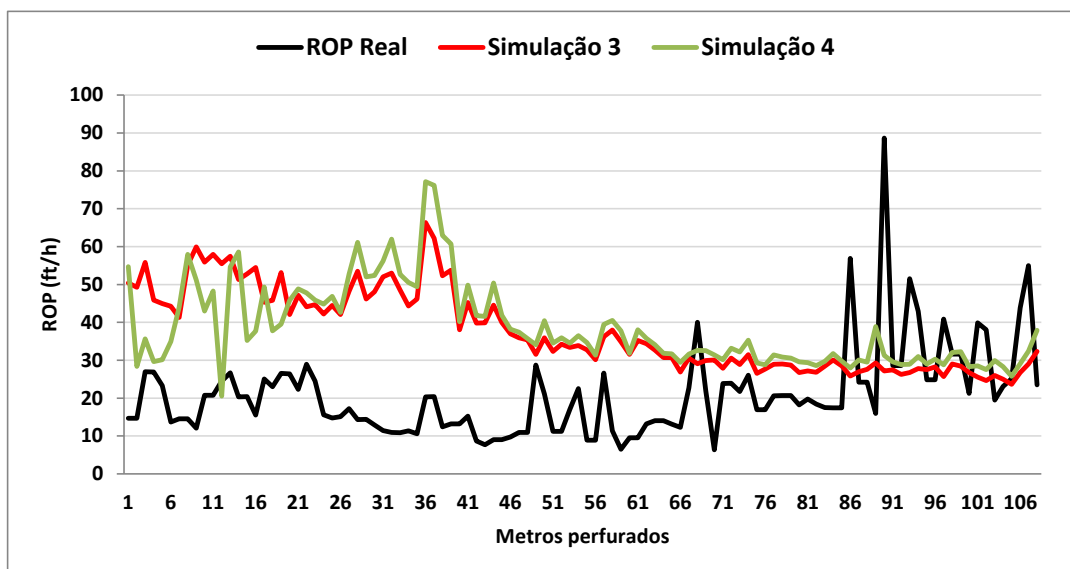
Quanto aos resultados das previsões, as duas simulações utilizando a correlação de UCS de Golubev, simulações 3 e 4, apresentaram menores erros absolutos e SMAPE. No entanto, ao contrário das simulações de ajuste, as de previsão para esses dois casos apresentaram erros absoluto maiores na simulação 4 utilizando 0,5 lb/gal.

A Figura 5.1 mostra as curvas de ajuste das seis simulações ante as taxas de penetração reais das corridas de ajuste. Nelas não se observam grandes mudanças em seus comportamentos justificando ajustes bem parecidos (Tabela 5.1).



**Figura 5.1: Curvas de ajuste do modelo para as seis simulações.**

Plotando as curvas de ROP real contra a ROP prevista das simulações 3 e 4, melhores resultados da previsão, Figura 5.2, verifica-se que a simulação 4, nos primeiros 20m aproximadamente, apresenta maior proximidade da curva de ROP real, sendo o restante bem similar. Isto pode justificar o SMAPE ligeiramente menor.



**Figura 5.2: Curvas de ROP de previsão das simulações 3 e 4 ante a ROP Real da corrida D que testa o modelo.**

Outra maneira de avaliar o resultado é através do coeficiente de determinação  $R^2$ . Observa-se que a simulação 4 possui  $R^2$  levemente maior que em 3 corroborando os menores erros para essa simulação, vide Figura 5.3.

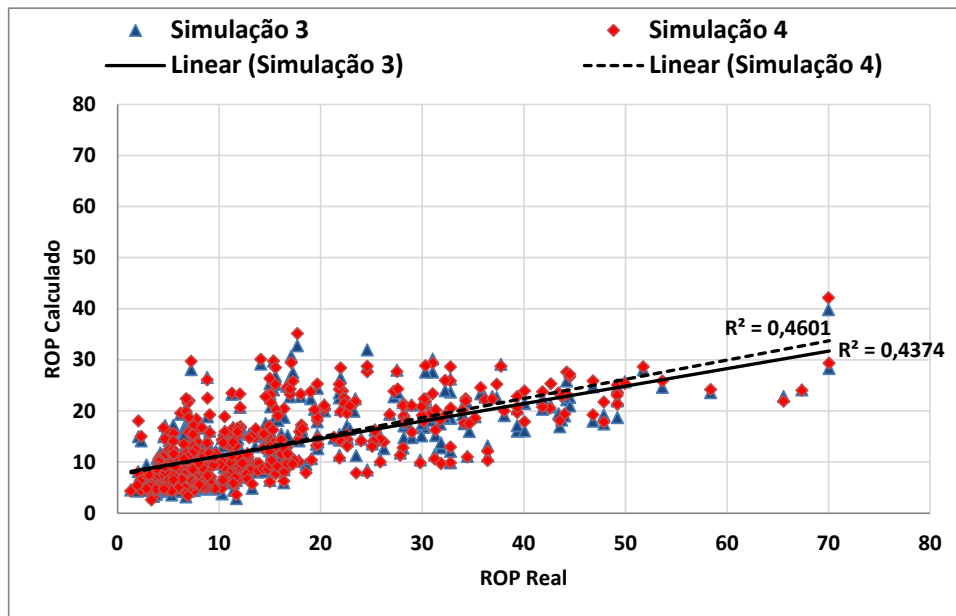


Figura 5.3: Análise de  $R^2$  para simulações 3 e 4.

O comportamento da curva de previsão da simulação 4 acompanha as curvas 2 e 6, somente a metodologia para o cálculo da UCS as difere, Figura 5.4.

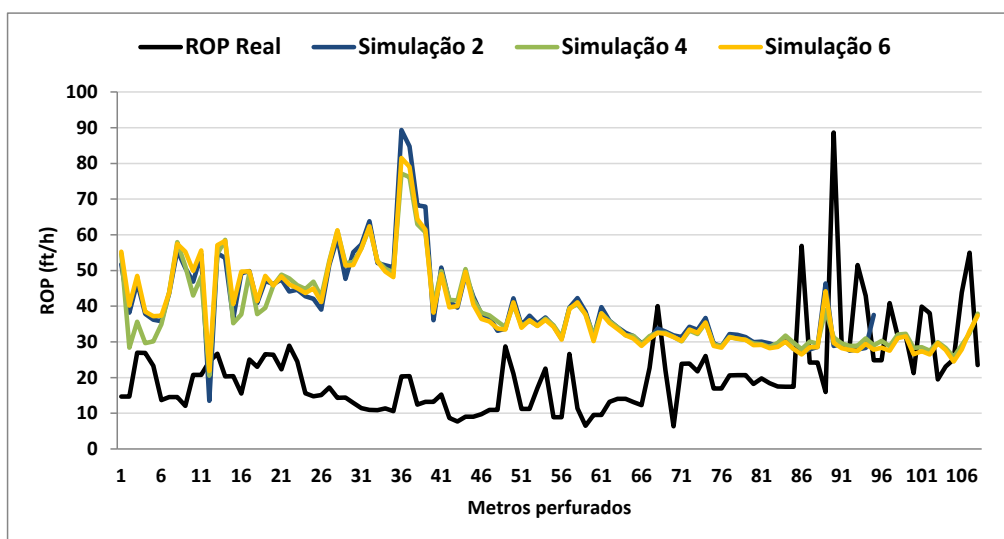


Figura 5.4: Curvas de ROP de previsão contra ROP real utilizando 0,5 lb/gal como diferencial de pressão como entrada.

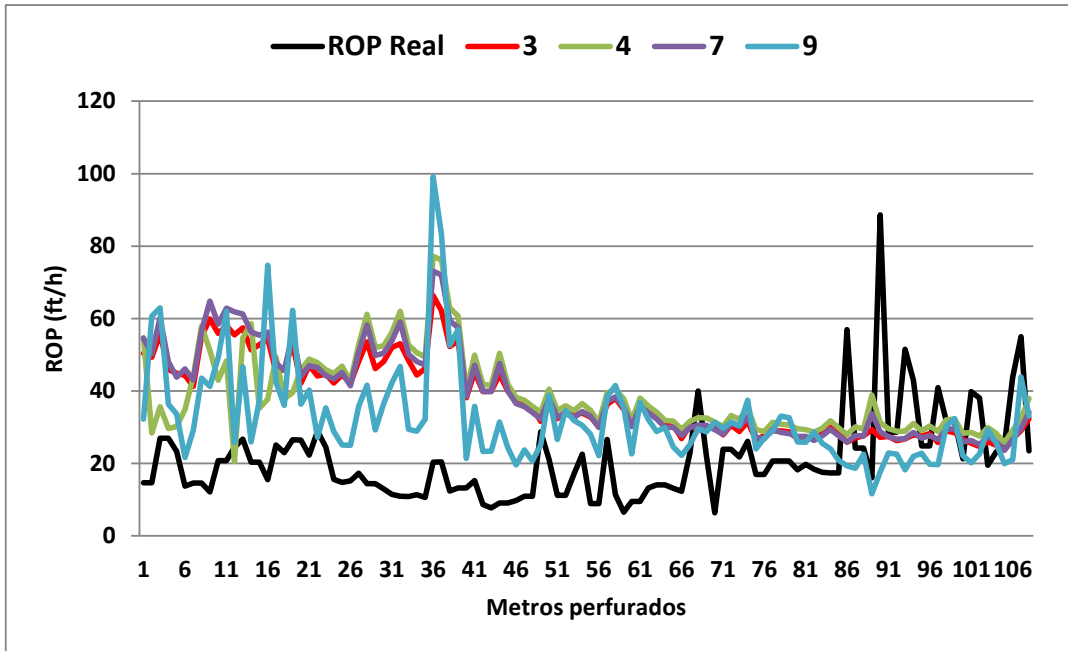
Com base nessas observações, mesmo não apresentando dados satisfatórios de previsão, considera-se que as simulações utilizando Golubev são as que apresentam melhor resultado na análise inicial da aplicabilidade do Modelo de Ohara para brocas com cortadores fixos, não levando em consideração o diâmetro das brocas. Assim a análise de sensibilidade dos parâmetros  $X_3$  e  $X_6$  é feita com UCS de Golubev, simulações 7 a 10, Tabela 5.2.

**Tabela 5.2: Resultados das simulações 7 a 10.**

Simulação	AJUSTE					PREVISÃO				
	ROP Média (ft/h)		ERRO		Smape	ROP Média (ft/h)		ERRO		Smape
	Real	Calculada	Absoluto	Máximo Relativo		Real	Calculada	Absoluto	Máximo Relativo	
<b>7</b>	8,67	9,91	14,39%	609,71%	22,51%	16,73	35,78	113,79%	442,88%	36,49%
<b>8</b>	8,67	9,90	14,21%	1006,87%	24,33%	16,73	30,10	79,85%	515,16%	32,32%
<b>9</b>	8,67	10,14	16,98%	978,54%	25,54%	16,73	28,72	71,61%	441,19%	30,89%
<b>10</b>	8,67	10,18	17,42%	956,65%	25,95%	16,73	29,56	76,67%	476,84%	31,85%

Todas as simulações pioram o ajuste do modelo, no entanto, é visível a melhora no resultado de algumas previsões. Comparando as simulações 3 e 4 com a 7, sem  $X_3$ , o resultado varia muito pouco sendo os erros encontrados bem próximos. Dessa forma,  $X_3$  é um parâmetro que na análise de prever ROP sem separar o conjunto de dados por diâmetro, não apresentou grande influência nos resultados das simulações com e sem  $X_3$ .

Retirando  $X_6$  a previsão melhora significativamente, porém ainda são calculados erros absolutos entre 70 e 80% e pequenas reduções em SMAPE. Ou seja, a metodologia para cálculo de desgaste dos cortadores aplicada em  $X_6$  é uma potencial fonte de erro. A análise gráfica das previsões em 3 e 4 contra 7, sem  $X_3$ , e 9, melhor resultado entre 7 e 10, evidencia que a retirada de  $X_3$  muito pouco afeta o resultado sendo refletido no resultado dos erros, Figura 5.5.



**Figura 5.5: Comparação entre ROP Real e simulações 3, 4, 7 e 9.**

Como esperado, ao colocar conjunto de dados 12 1/4" e 8 1/2" em um mesmo "pacote", os resultados para previsão de ROP não são bons. Abaixo, Tabela 5.3, são apresentados os resultados das simulações separando por diâmetro de broca,  $\Delta P$  0,5 lb/gal, variando a forma de cálculo de  $X_6$ .

**Tabela 5.3: Resultado das simulações 11 a 28.**

Simulação	AJUSTE					PREVISÃO				
	ROP Média (ft/h)		ERRO		Smape	ROP Média (ft/h)		ERRO		Smape
	Real	Calculada	Absoluto	Máximo Relativo		Real	Calculada	Absoluto	Máximo Relativo	
11	6,36	6,84	7,46%	405,83%	15,41%	8,94	8,33	6,79%	209,16%	21,72%
12	6,36	6,84	7,47%	405,83%	15,42%	8,94	8,35	6,63%	209,92%	21,70%
13	6,36	6,83	7,46%	406,31%	15,42%	8,94	9,82	9,79%	311,45%	20,01%
14	6,36	6,89	8,31%	555,34%	16,48%	8,94	8,85	1,02%	323,02%	23,63%
15	6,36	6,89	8,30%	555,83%	16,48%	8,94	8,87	0,76%	324,01%	23,61%
16	6,36	6,89	8,28%	556,80%	16,48%	8,94	11,34	26,87%	357,25%	22,38%
17	6,36	6,87	8,00%	582,52%	15,99%	8,94	9,71	8,59%	325,00%	23,57%
18	6,36	6,87	8,00%	583,01%	15,99%	8,94	9,74	8,89%	325,85%	23,56%
19	6,36	6,87	8,00%	583,01%	15,99%	8,94	12,59	40,78%	419,08%	24,14%
20	13,25	16,12	21,69%	319,74%	22,56%	15,76	40,86	159,31%	495,10%	42,63%
21	13,25	16,12	21,68%	319,74%	22,56%	15,76	40,67	158,12%	492,34%	42,49%
22	13,25	16,12	21,68%	319,74%	22,56%	15,76	26,49	68,10%	392,98%	34,71%
23	13,25	15,75	18,90%	356,83%	21,86%	16,73	39,33	22,59%	571,98%	39,61%
24	13,25	15,75	18,90%	356,83%	21,86%	16,73	39,13	21,91%	568,61%	39,47%
25	13,25	15,75	18,91%	356,69%	21,86%	16,73	22,19	44,70%	406,44%	36,31%
26	13,25	15,87	19,76%	384,41%	21,91%	16,73	43,64	29,72%	660,05%	42,98%
27	13,25	15,86	19,76%	384,41%	21,91%	16,73	43,40	28,96%	655,77%	42,82%
28	13,25	15,86	19,75%	384,14%	21,91%	16,73	23,30	39,24%	535,09%	38,83%

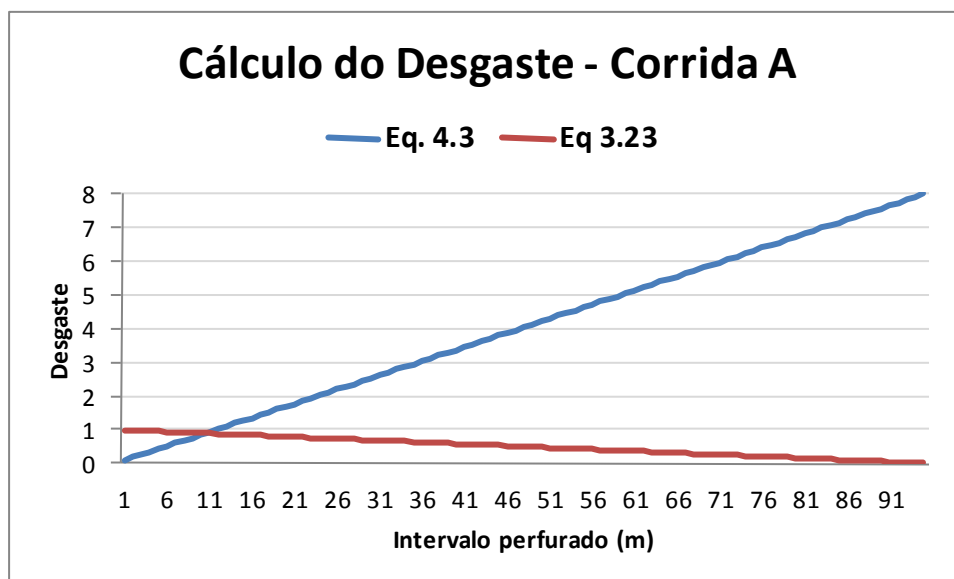
Claramente, as simulações de 11 a 19 apresentaram melhores resultados em comparação com as corridas com brocas 12 ¼". Logo, a separação dos dados por diâmetro de broca por si só já produz efeito comparada com as simulações anteriores, Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

Analisando os resultados das simulações com conjunto de dados de 12 1/4" observa-se que continuam havendo picos elevados de erros máximos relativos, porém o SMAPE, reduziu aproximadamente pela metade comparado às simulações 1 a 6 e, quanto a 7 a 10, em torno de 25%. Recordar-se na Seção 4.2.3 que a correlação entre ROP e UCS apresentou resultado positivo para os dados de 8 1/2" enquanto que para 12 1/4", uma correlação negativa, inversa. Isto pode ser um dos fatores que corroboram para o resultado ruim do conjunto de 8 1/2".

As simulações com a correlação de UCS de Golubev são as que apresentam melhores resultados calculando o parâmetro  $X_6$  pelas Equações 3.23 e 4.3, simulações 14 e 15. As

simulações que calcularam  $X_6$  assumindo desgaste linear utilizando os cortadores apresentam os piores resultados (simulações 13, 16 e 19). No entanto, analisando a Tabela 5.3, verifica-se que há casos, no conjunto de dados de 8 1/2", que calculando o desgaste com as informações dos cortadores apresentam melhores resultados comparando as simulações que calculam a UCS de mesma forma. Porém, como as previsões em 8 1/2" não são satisfatórias, pode-se dizer que a Equação 3.23 e Equação 4.3 são melhores opções para entrada de dados no parâmetro  $X_6$ .

Ainda quanto ao cálculo de desgaste, Equação 3.23 e Equação 4.3, apresentam resultados diferentes. As escalas são diferentes. Para Equação 3.23 o número que quantifica o desgaste decresce em uma escala de 1 (broca nova) à 0 (desgaste total), enquanto que para a Equação 4.3, o valor do desgaste cresce em uma escala de 0 (broca nova) à 8 (desgaste total).

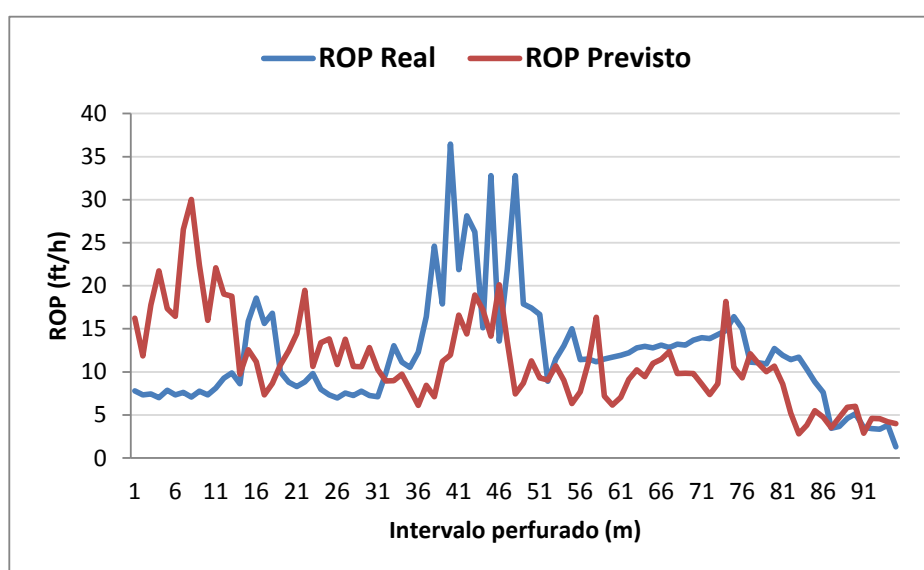


**Figura 5.6: Parâmetro  $X_6$  da Corrida A calculado pelas Eq. 3.23 e 4.3.**

A Corrida B, também de 12 1/4", se plotado gráfico como da Figura 5.6, apresentará mesmo comportamento, uma vez que o desgaste máximo IADC da corrida também foi 8. Já em 8 1/2", apesar das brocas terem sido retiradas devido a baixa taxa de penetração, seus desgastes não atingiram o nível máximo, sendo este mais um possível fator para que o conjunto de dados de 8 1/2" não tenha apresentado um resultado similar ao conjunto de dados de 12 1/4".

Os erros absolutos em 14 e 15 são próximos a 1%, porém o SMAPE está próximo de 23%. Isto significa que há pontos de divergência entre a ROP real e a prevista pelo modelo, existência de picos de máximos e mínimos sinalizados pelo erro máximo relativo. Assim, de antemão pode-se dizer que o modelo não é o ideal para analisar a ROP metro por metro, como seria o caso de um acompanhamento em tempo real.

Tomando a simulação 15, melhor resultado de 11 a 28, para exemplificação do descrito acima, a Figura 5.7 plota as curvas de ROP real e previsto (calculado) metro a metro.



**Figura 5.7: Curvas de ROP real e previsto (calculado) metro a metro para Simulação 15.**

Acima, podemos observar que o previsto em alguns intervalos perfurados acompanha o real, porém as curvas no geral são diferentes. No início, principalmente, a curva de previsão não possui qualquer semelhança com o real, podendo ser em virtude de diferentes propriedades petrofísicas<sup>8</sup> das rochas (não há informação sobre amostras de calha). Logo, o acompanhamento em tempo real, a princípio não é satisfatório ao

---

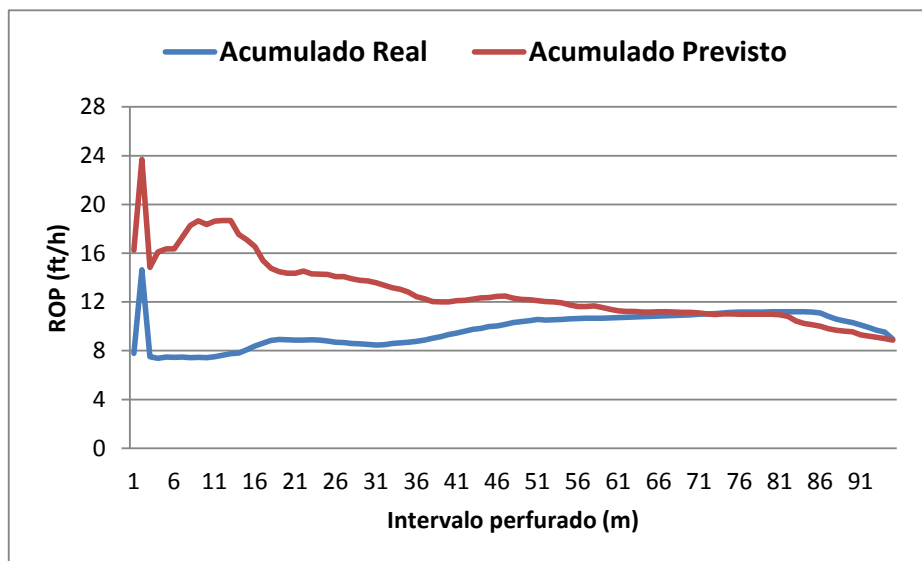
<sup>8</sup> A petrofísica investiga as propriedades físicas de minerais, rochas e fluidos nela contidos. Tais características se alteram em função das variações ambientes as quais são submetidas (pressão, temperatura, argilosidade etc.) impactando na formação da rocha.

considerar o caso da Figura 5.7 no qual o modelo não é atualizado com os novos dados que surgem ao longo da perfuração.

Buscando analisar de uma forma diferente os resultados, sem ser metro por metro, plotam-se as curvas de ROP acumulado que são:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\text{intervalo perfurado}}{TBF} \quad (5.1)$$

Onde TBF é o tempo de broca no fundo, em horas, que é igual a 1 metro dividido pelo ROP do metro perfurado. Sendo assim, Figura 5.8 apresenta as curvas de ROP real acumulado e ROP calculado (previsto) acumulado.



**Figura 5.8: Curvas de ROP real acumulado e previsto para simulação 15.**

O acumulado pode estar ruim no início devido à possibilidade dos dados estarem em um intervalo diferente do ajuste. Colocando-os no ajuste, isso talvez possa melhorar a previsão, seria um ajuste dinâmico (Figura 5.9) sendo o mais adequado para acompanhamento em tempo real.

Assumindo a Simulação 15 como o melhor resultado entre 11 e 28, desconsidera-se o parâmetro  $X_6$  na Simulação 29 para verificar seu impacto na proposta de adaptação do Modelo de Ohara,

**Tabela 5.4: Resultado da Simulação 29, ROP em pés/h.**

Simulação	ROP	ROP	Erro	Erro Máximo	SMAPE
	Real	Previsto	Absoluto	Relativo	
<b>29</b>	8,94	50,56	465,44%	2429,77%	65,10%

Claramente a simulação é impactada ao desconsiderar o parâmetro  $X_6$  da proposta de adaptação, uma vez que o SMAPE tem aumento próximo a 200% e o valor do ROP previsto é fortemente impactado com a sua desconsideração.

Como última simulação, número 30, simulação 15 o melhor resultado, linhas de registros da corrida A, utilizada como teste para o conjunto de dados de diâmetro 12 ¼”, são movidos para o conjunto de dados de ajuste do modelo. Isto, como dito no Capítulo 8, busca simular um acompanhamento em tempo real da perfuração. As últimas 20 linhas de registros da corrida A são utilizadas para teste do modelo, Tabela 5.5

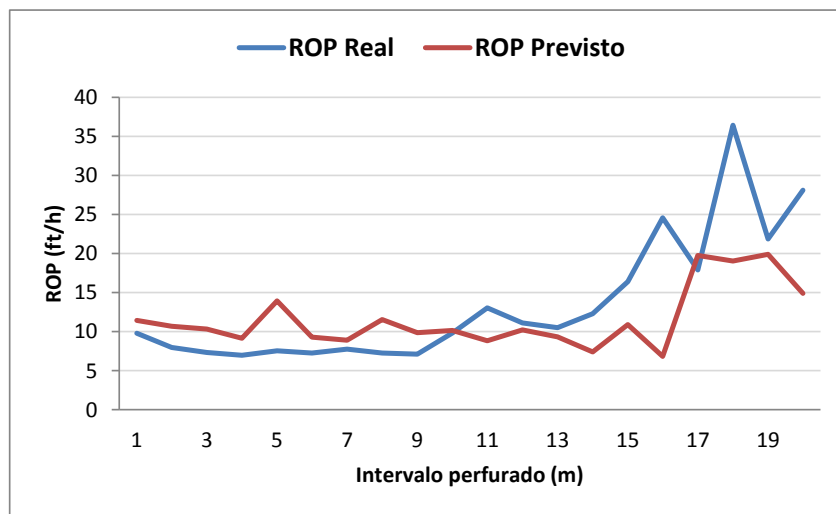
**Tabela 5.5: Resultado da Simulação 30, ROP em pés/h.**

Simulação	ROP	ROP	Erro	Erro Máximo	SMAPE
	Real	Previsto	Absoluto	Relativo	
<b>30</b>	10,45	10,80	3,26%	84,75%	17,59%

Observando a Tabela 5.5, ressaltam-se a melhora do SMAPE assim como do erro máximo relativo, porém, o erro absoluto tem um leve aumento. No entanto, ao fazer o a simulação 30 o objetivo era observar redução no SMAPE, o que aconteceu.

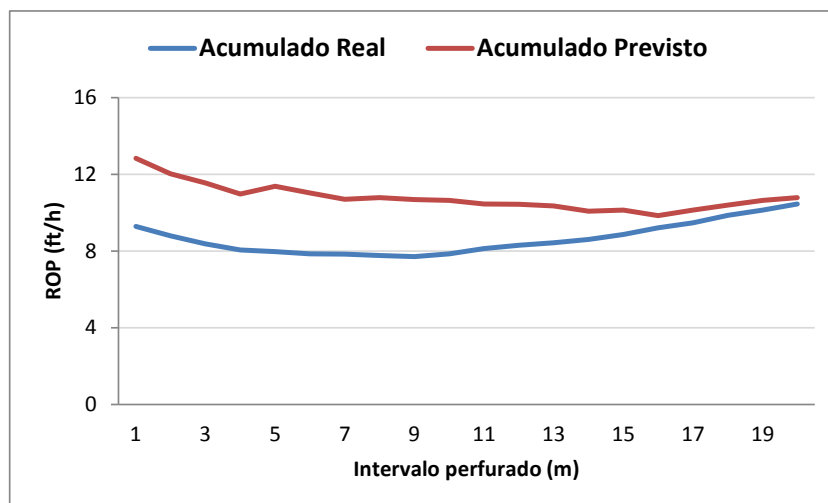
O afastamento entre o ROP real e o ROP calculado ainda possuem pontos com significativa discrepância (Figura 5.9). Esta análise, somada ao fato de que todas as

simulações não tenham apresentado curvas de previsão de ROP similares às reais, e que os coeficientes do modelo se alteram à medida que novos dados são inseridos (Simulação 30), conclui-se que a proposta de adaptação do Modelo de Ohara para brocas de cortadores fixos, considerando ajuste de parâmetros estático, isto é, sem realimentação, com base nas premissas feitas e conjunto de dados utilizado nesse trabalho, não apresentou bom resultado para um eventual acompanhamento em tempo real.



**Figura 5.9: Curvas de ROP real e previsto metro a metro na Simulação 30.**

A Figura 5.10, assim como feito para Simulação 15, Figura 5.8, apresenta as curvas de ROP real acumulado e ROP previsto acumulado para Simulação 30. Observa-se melhora comparando-se as duas figuras. Na Figura 5.10 verifica-se que a maior diferença entre as ROP acumuladas é de aproximadamente 4 pés/h (~1,2m/h) reduzindo-se ao longo da perfuração.



**Figura 5.10: Curvas de ROP real acumulado e previsto para Simulação 30.**

Ao planejar um programa de brocas deve-se informar o comprimento do intervalo perfurado previsto assumindo que a vida útil da broca será consumida, em outras palavras, nível máximo de desgaste. A ROP esperada também é informada, servindo como base para o cronograma do projeto de construção de um poço. Sendo assim, o resultado apresentado pelo Modelo de Ohara adaptado para brocas PDC apresentou um bom resultado do ponto de vista descritivo podendo ser utilizado como base para fase de planejamento das brocas a serem utilizadas.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho objetivou estudar uma proposta de adaptação do Modelo de Ohara de previsão de ROP em brocas tricônicas para brocas PDC. Foi necessário separar o conjunto de dados por diâmetro da broca apesar de esse ser um dado de entrada em diversos parâmetros do modelo. As simulações para brocas 12 ¼” apresentaram melhores resultados. Uma hipótese para que isto tenha ocorrido é o fato de existir uma relação entre a ROP e UCS negativa e uma entre ROP e PSB maior em 12 ¼” que em 8 ½”. Outra hipótese é o desgaste das brocas, já que as de 12 ¼” apresentam desgaste máximos 8, enquanto as de 8 ½” apresentam níveis diferentes entre as corridas. Para o cenário geológico estudado, a formulação empírica de UCS por Golubev apresentou melhor resultado ao ajustar a proposta de adaptação do Modelo de Ohara.

Os coeficientes dos parâmetros do modelo não são constantes e devem ser ajustados à medida que novos dados são registrados, o que se supõe que vá acontecer em um acompanhamento em tempo.

Assumiu-se no estudo que o desgaste em cortadores de brocas PDC é linear. Contudo, não há na literatura uma expressão matemática que sustente essa teoria, apesar dos diversos estudos, não há equação ou modelo universal de previsão de desgaste metro a metro para PDC. Há apenas o conhecimento prático da indústria de que o desgaste impacta diretamente no desempenho da broca. Porém, a retirada desse parâmetro do modelo mesmo que a formulação de desgaste utilizada não tenha sido a ideal, impacta significativamente no resultado da simulação devendo ser preservado.

O Modelo de Ohara, de acordo com as premissas e conjunto de dados desse estudo, pode ser utilizado na fase de planejamento, seleção de brocas, em vista a proximidade entre os valores das ROP médias reais e calculadas. Ao realizar um planejamento de brocas considerando que a broca alcance a metragem prevista com desgaste máximo, tendo informações sobre a geologia a ser perfurada, em um trecho de perfuração sem

alteração de ângulo da trajetória, uso de fluido sintético, a adaptação do Modelo de Ohara pode ser um suporte para o critério de seleção ou não de uma broca PDC ante a outros modelos de broca. A simulação considera que não haja quaisquer anomalias de perfuração, caso contrário o resultado apresentado pelo modelo pode não ser o esperado.

## **6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

A linha de pesquisa sobre a previsão de ROP apesar de mais de meio século ainda não conseguiu estabelecer um modelo preditivo que seja amplamente divulgado e utilizado na indústria do petróleo. Pesquisadores ainda buscam definir um modelo que consiga combinar todas as variáveis que influenciam a ROP. Esse trabalho utilizou o conceito de UCS como único limitante ao desempenho da broca. Sugere-se para próximos trabalhos verificar a influência da densidade e viscosidade do fluido de perfuração.

Quanto maior o conjunto de dados, melhor será o teste do modelo. A trajetória do poço nesse estudo não influenciou o resultado, inclusive a análise para corridas de 12 1/4” apresentou melhor resultado que em 8 1/2”, sendo estes dados de duas corridas em poços verticais. Porém, deve-se verificar se isso foi um caso isolado ou não, uma vez que, a angulação do poço é um fator complicador para a chegada do peso aplicado em superfície na broca.

Outra questão relevante é o IADC da broca. Tendo um maior conjunto de dados, maior será a repetição de modelos de brocas e fabricantes, sendo assim, o estudo pode ser dividir em IADC e fabricante podendo o Modelo de Ohara ser aplicado na escolha de qual o melhor modelo de broca PDC a ser utilizado para um determinado cenário de perfuração. Soma-se a isso a busca por correlações entre o desgaste e o comprimento do intervalo perfurado para cada IADC.

Hoje, não há ferramenta de M/LWD que registre o perfil DT próximo a broca, prejudicando a aplicação do Modelo de Ohara no acompanhamento em tempo real, uma vez que esse dado só será adquirido após a perfuração do intervalo, em virtude do *offset* da ferramenta de medição. A criação de perfis sintéticos DT antes da perfuração e sua retroalimentação à medida que os dados são adquiridos podem ser o *input* ideal do

modelo para que este seja utilizado para acompanhamento em tempo real da previsão de ROP.

De posse do tipo de fluido contido dentro do espaço poroso da formação geológica perfurada (água do mar, óleo, gás etc.) é possível verificar a influência desse fluido trapeado no parâmetro  $X_3$  do Modelo de Ohara, o que poderia justificar possíveis variações no diferencial de pressão. Além disso, sugere-se em estudos futuros a variação do expoente da formulação de Eaton para cálculo do gradiente de poros.

Sugere-se a adaptação do Modelo de Ohara em brocas impregnadas cujo padrão de corte permite dizer que o comportamento do desgaste é mais plausível de ser linear do que em brocas PDC. Para futuros estudos com brocas PDC recomenda-se buscar uma equação exponencial para o desgaste, sem assumi-lo linear. Por fim propor adaptação do Modelo de Ohara para brocas detentoras de novas tecnologias.

## CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Disponível em: <<http://www.deepwater.com/investor-relations/fleet-status-report>>. Acesso em: 06 jun. 2015.
- [2] Disponível em: <<http://www.bloomberg.com>>. Acesso em: 21 jan. 2016.
- [3] Disponível em: <<http://news.exxonmobil.com/press-release/exxonmobil-earns-49-billion-first-quarter-2015>>. Acesso em: 06 jun. 2015.
- [4] MAIDIA, E.; OHARA, S., 1991, “Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit, WOB, and Drillstring Rotation”, *SPE Drilling Engineering*, (Sep) pp.189-195.
- [5] OHARA, S., 1989, *Método de Escolha do Tipo de Broca e Seleção do Peso sobre Broca e Velocidade de Rotação na Perfuração com Mínimo Custo*. Dissertação de M.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- [6] THOMAS, J. E., *Fundamentos da Engenharia de Petróleo*, 1a ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora Interciência, 2001.
- [7] MITCHELL, R. F.; MISKA, S. Z., *Fundamentals of Drilling Engineering*. 1 ed. Richardson, Texas, EUA, Society of Petroleum Engineers - SPE, 2011.
- [8] Disponível em:  
<[https://www.osha.gov/SLTC/etools/oilandgas/drilling/mud\\_system.html](https://www.osha.gov/SLTC/etools/oilandgas/drilling/mud_system.html)>. Acesso em: 15 jul. 2015.
- [9] WHITTAKER, A. H., “Mud Logging”. Em: *Petroleum Engineering Handbook*, chapter 52, Richardson, Texas, EUA, Society of Petroleum Engineers - SPE, 1992.
- [10] Disponível em:  
<<http://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/reference-guides/drill-bits-catalog>>. Acesso em: 10 dez. 2015.
- [11] BRANDON, B.D. et al. “First Revision to the IADC Fixed Cutter Dull Grading System”. Em: *SPE/IADC Drilling Conference*, New Orleans - EUA, 18-21 Fevereiro, 1992. IADC/SPE-23940.
- [12] McGEHEE, D. Y., et al. “The IADC Roller Bit Classification System”. Em: *SPE/IADC Drilling Conference*, New Orleans - EUA, 18-21 February, 1992. IADC/SPE-23937.
- [13] Disponível em:  
<[https://www.nov.com/Segments/Wellbore\\_Technologies/Downhole/Drill\\_Bits/Fixed\\_Cutter/FuseTek\\_Hybrid\\_Drill\\_Bits.aspx](https://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Drill_Bits/Fixed_Cutter/FuseTek_Hybrid_Drill_Bits.aspx)>. Acesso em 10 nov. 2015.
- [14] Disponível em: <<https://oilfieldmania.files.wordpress.com/2014/10/dull-grade-book-2008.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2016.
- [15] Disponível em: <[http://petrowiki.org/PDC\\_bit\\_profile](http://petrowiki.org/PDC_bit_profile)>. Acesso em 12 jul. 2015.

- [16] ANDRADE, R., AZUAGA, D., ROCHA, L. A. S., SANTOS, O. L. A., VIEIRA, J. L. B., *Perfuração Direcional*. 2a ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora Interciência Ltda, 2009.
- [17] ROCHA, L. A. S., AZEVEDO, C. T., *Projetos de Poços de Petróleo*. 2a ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora Interciência Ltda., 2009.
- [18] DUPRIEST, F. E.; KOEDERITZ, W. L., “Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy”. Em: *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam - Holanda, 23-25 Fevereiro, 2005. SPE /IADC-92194.
- [19] EBRAHIMI, M.; NOVEIRI, E., “Cost per Foot Reduction by Bit Run Optimization: A Simulation Study”, Em: *Trinidad & Tobago Energy Resources Conference*, Port of Spain - Trinidad & Tobago, 27-30 Junho, 2010. SPE-133429-MS.
- [20] MAURER, W. C., 1962, “The perfect cleaning theory of rotary drilling”, *Journal of Petroleum Technology*, SPE 408 (Nov), pp.1270-1274.
- [21] WARREN, T. M., “Penetration-Rate performance of Roller-Cone Bit”, Em: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston - EUA, 16-19 Setembro, 1986. SPE-13259.
- [22] BOURGOYNE, A. T. J., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M.E., YOUNG, F. S. J., *Applied Drilling Engineering*. 9 ed. Richardson, EUA Society of Petroleum Engineers - SPE Textbook Series, 2003.
- [23] MOREIRA, M., 2013, *Verificação da Aplicabilidade do Modelo de Perfuração Ohara para determinação da Taxa de Penetração em Tempo Real de Poços do Pré-Sal Brasileiro*. Monografia de B.Sc, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [24] ALCOCER, C.F., REZA, M.R., “A Unique Computer Simulation Model Well Drilling: Part I”, Em: *56<sup>th</sup> California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers*, Oakland – EUA, 2-4 Abril, 1986. SPE-15108
- [25] LIU et al, “An Analytical Model Coupled with Data Analytics to Estimate PDC Bit Wear”. Em: *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Maracaibo - Venezuela, 21-23 Maio, 2014. SPE-169451-MS.
- [26] RAHIMZADEH et al., “Comparison of the Penetration Rate Models Using Field Data for One of the Gas Fields in Persian Gulf Area”. Em: *International Oil and Gas Conference and Exhibition*, Pequim - China, 6-10 Junho, 2010. SPE-131253.
- [27] PESSIER, R., et al., “Drilling Performance is a Function of Power at the Bit and Drilling Efficiency”. Em: *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, San Diego - EUA, 6-8 Março, 2012. SPE-151389.
- [28] MASON, L. K., “Three-Cone Bit Selection with Sonic Logs” Em: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston - EUA, 16-19 Setembro, 1984. SPE-13256.
- [29] BARBETTA, P. A., “Medidas Descritivas”. Em: *Estatística Aplicada às Ciências Sociais*, 8a ed. chapter 6, Santa Catarina, SC, Brasil, UFSC, 2010.

- [30] RASHIDI, B., HARELAND, G., WU, A., “New Approach in Real-Time Bit War Prediction”. Em: *Abu Dhabi Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi – UAE, 1-4 Novembro, 2010. SPE-136008.
- [31] SANTOS, E.S.R.; FERREIRA, F. H. “Mechanical Behavior of a Brazilian Off-Shore Carbonate Reservoir”, Em: *44th US Rock Mechanics Symposium and 5<sup>th</sup> US – Canada Rock Mechanics Symposium*, South Lake City - USA, 27-30 Junho, 2010. ARMA 10-199.
- [32] PEARSON R.K., 2001, “Exploring Process Data”, *Journal of Process Control*, v. 11, pp. 179-194.
- [33] LEEK, J. T., PENG, R. D., 2015, “What is the question?” *Science Mag*, v. 347 n. 6228 (Mar), pp. 1314-1315.
- [34] ARMSTRONG, J. S., *Long-range Forecasting: From Crystal Ball to Computer*, New Jersey, EUA, 2a ed., John Wiley & Sons Inc, 1985.
- [35] TOFALLIS, C., 2015, “A Better Measure of Relative Prediction Accuracy for Model Selection and Model Estimation”, *Journal of the Operational Research Society*, v. 66(8), pp 1352-1362.
- [36] ASTER, C.R, BORCHERS, B., THURBER, C. H., *Parameters Estimation and Inverse Problems*, EUA, Elsevier Academic Press, 2005.

## APÊNDICE A – CONVERSÃO DE UNIDADES

$\text{ft} \times 3,048$	$\text{E}^{-01} = \text{m}$
$\text{gal} \times 3,785412$	$\text{E}^{-03} = \text{m}^3$
$\text{in} \times 2,54$	$\text{E}^{+00} = \text{cm}$
$\text{lbf} \times 4,448222$	$\text{E}^{+00} = \text{N}$
$\text{lbm} \times 4,535924$	$\text{E}^{-01} = \text{kg}$
$\text{psi} \times 6,894757$	$\text{E}^{+00} = \text{kPa}$

## **APÊNDICE B – PERFURAÇÃO DE POÇOS**

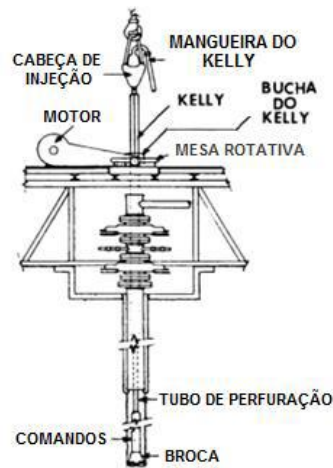
Com intuito de proporcionar melhor entendimento ao leitor não familiarizado com alguns dos temas abordados nessa dissertação, esse capítulo é dedicado à apresentação da operação de perfuração de poços e aquisição de dados em tempo real, os quais são fundamentais para a compreensão desse estudo.

### **B.1 SONDAS DE PERFURAÇÃO**

Há diversos tipos de sonda de perfuração. Elas podem ser marítimas, do tipo fixa ou flutuante, cuja escolha é baseada na capacidade da sonda em perfurar o poço, leia-se lâmina d'água e *lay out* (capacidade de bombas, volume de tanques de fluidos, BOP, torre de perfuração etc.) ou sondas de perfuração terrestres. Qualquer que seja o tipo de sonda ela possui diversos sistemas operacionais os quais, podem, ou não, trabalhar de forma interligada. A seguir, são descritos esses sistemas que atuam diretamente na perfuração de poços e que são de suma importância para a aquisição e entendimento dos dados utilizados nessa dissertação.

#### **B.1.1 Sistema de Rotação**

O sistema de rotação é o responsável por transmitir rotação à coluna de perfuração e broca a partir da superfície. Há duas configurações básicas de equipamentos: A primeira e mais antiga é a associação do *kelly* e cabeça de injeção, *swivel*, além da associação do *kelly* com a mesa rotativa por intermédio da bucha do *kelly*, Figura B.1. Essa configuração é bastante encontrada em sondas de terra.

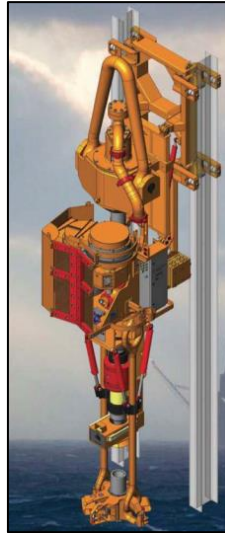


**Figura B.1: Representação simplificada do Sistema de Rotação de sonda [6].**

O *kelly* é constituído por uma haste metálica de seção quadrada ou hexagonal conectada ao topo da coluna de perfuração e é o elemento de transmissão de rotação à mesma. A mesa rotativa é o equipamento que transmite rotação ao *kelly*, além de permitir seu livre deslizamento dado o aumento de profundidade do poço. O *swivel*, por sua vez, é o elemento do sistema que permite a separação dos elementos rotativos daqueles estacionários na sonda, suportando ainda o peso da coluna de perfuração além de ser por onde o fluido de perfuração é injetado para o interior da coluna.

Com o avanço tecnológico surgiu o *Top Drive*, equipamento de superfície que elimina a necessidade de um *kelly* e mesa rotativa, uma vez que tem em sua composição um motor conectando-o ao topo da coluna de perfuração. Por ser um equipamento mais robusto e composto por dois braços mecânicos, apresenta como vantagem permitir a realização muito mais rápida da operação de manobra – retirada ou descida da coluna de perfuração do poço.

Dessa forma, a perfuração com *Top Drive*, vide Figura B.2, reduz o tempo de manobra para troca de uma broca, por exemplo, e o tempo das conexões de tubos, diminuindo o tempo operacional da perfuração, fatores que afetam diretamente no cálculo de custo por metro perfurado, custo métrico, expresso em unidade de moeda por metro. Além disso, provê mais potência para girar a coluna que a mesa rotativa.



**Figura B.2: Desenho de Top Drive [7].**

### **B.1.2 Sistema de circulação**

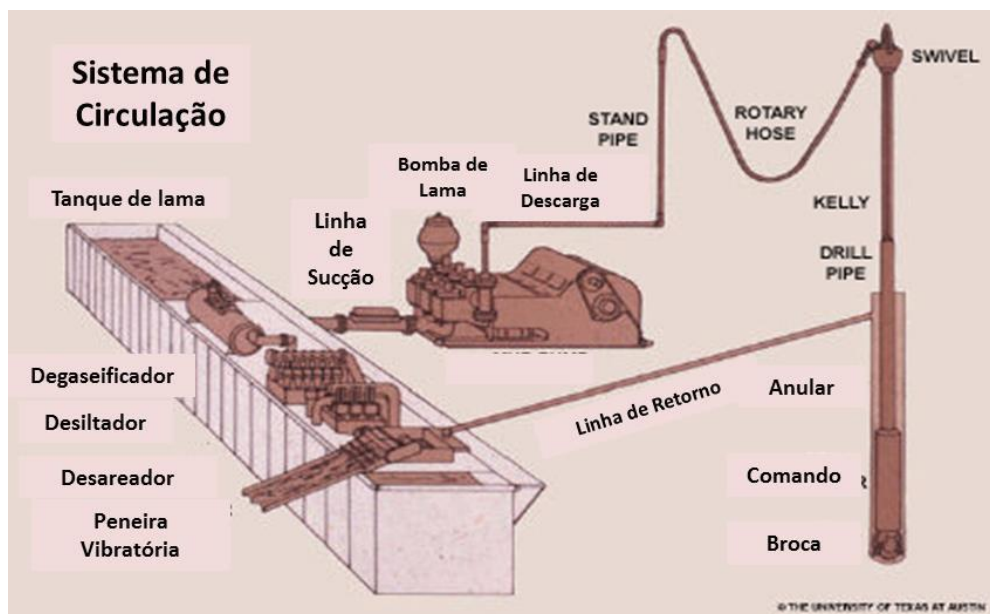
Os principais componentes de um sistema de circulação de uma sonda incluem bombas de circulação, tanques de fluido de perfuração, do inglês, *mud*, equipamentos de mistura de compostos químicos adicionados ao fluido para adequar suas propriedades reológicas e equipamentos de separação responsáveis pela remoção de contaminantes, em outras palavras, a homogeneização do fluido. Como o enfoque do trabalho é o que acontece dentro do poço, essa seção busca um melhor entendimento do sistema “poço-fluido”.

O fluido de perfuração tem diversas funções durante a perfuração de um poço. Ele, quando com suas propriedades reológicas adequadas, densidade ( $\rho_f$ ), por exemplo, confere pressão hidrostática ao poço evitando que haja influxo de fluidos da formação para dentro do poço, evento denominado *kick*, quando de dentro para fora do poço, caracteriza-se a perda de circulação. Esses fenômenos são identificados pelo sistema de monitoramento.

O fluido de perfuração deposita uma fina camada de reboco nas paredes do poço reforçando a proteção à perda ou ganho de fluido, carreamento de sedimentos e fragmentos de rocha gerados durante a perfuração, lubrifica e refrigera a broca de perfuração, o contato rocha/broca gera atrito, conseqüentemente calor, o qual em

excesso pode reduzir a vida útil de componentes do BHA e da broca, entre outras funções.

A Figura B.3: Representação de um sistema de circulação em uma sonda [8]. apresenta de forma simplificada um sistema de circulação. O sistema “poço-fluido” se inicia nas bombas de lama. O fluido circula pela linha de descarga e percorre um determinado circuito de tubulações até chegar ao tubo bengala, *stand pipe*, tubo rígido de metal que conduz o fluido a alta pressão até aproximadamente um terço da altura da torre de perfuração. Em sua extremidade, o tubo bengala é conectado à mangueira do *kelly*, uma linha flexível de alta pressão que permite a chegada do fluido ao *swivel* (conectada à sua outra extremidade). A flexibilidade da mangueira permite a movimentação vertical do *kelly* enquanto o fluido é bombeado por dentro da coluna de perfuração. Ou, simplesmente, conecta-se ao *Top Drive*.



**Figura B.3: Representação de um sistema de circulação em uma sonda [8].**

Na extremidade da coluna de perfuração encontra-se a broca de perfuração, por onde o fluido sai através de seus jatos, os quais podem ter diferentes diâmetros, além de suas disposições espaciais apresentarem configurações variadas. O objetivo dos jatos das brocas é melhorar a ação de limpeza do fluido de perfuração no fundo do poço, a qual é maximizada a partir da determinação da força hidráulica de impacto dos jatos (JIF).

Quando a JIF é insuficiente, problemas como o encrramento de broca podem ocorrer acarretando na diminuição da ROP. Trata-se da adesão de cascalhos na broca, geralmente de formações pouco permeáveis ou impermeáveis, folhelhos, por exemplo, em razão da ausência parcial ou total de filtração do fluido de perfuração por esses cascalhos.

O fluido começa então a fase de retorno do circuito definido pelo sistema “poço-fluido”, a partir do fluxo pelo espaço anular do poço – determinado pela diferença entre o diâmetro do poço e da coluna – carregando consigo os cascalhos e outras partículas sólidas geradas durante a perfuração, até chegar à superfície. Na superfície, o fluido é direcionado através da linha de retorno para tratamento, peneiras vibratórias<sup>9</sup>, em sequência desareadores<sup>10</sup>, dessiltadores<sup>11</sup> e degaseificador<sup>12</sup> até chegar ao tanque de fluido passando pela linha de sucção retornando a bomba.

### **B.1.3 Sistema de monitoramento**

Para o estudo em questão, este é o sistema mais importante dentro de uma sonda de perfuração, pois os dados analisados se originam do monitoramento do poço.

O sistema de monitoramento de poços é constituído por equipamentos que fornecem informações dos parâmetros necessários ao controle das operações de perfuração em tempo real feito pela equipe da sonda (supervisores e engenheiros de perfuração, químicos, sondadores etc.) em conjunto com os representantes da companhia operadora e seus prestadores de serviço contratados.

Dentre os diversos parâmetros podemos citar: profundidade de poço vertical (TVD), profundidade medida de poço (MD), PSB, rotações na coluna, pressão de bombeio, vazão de fluido, vazão de retorno de fluido, torque, ROP, volume de tanques de lama

---

<sup>9</sup> Equipamento utilizado no controle de sólidos que remove grandes fragmentos de rocha incorporados ao fluido durante a perfuração;

<sup>10</sup> Equipamento utilizado no controle de sólidos instalado após os shale shakers;

<sup>11</sup> Equipamento utilizado no controle de sólidos instalado após o desareador;

<sup>12</sup> Equipamento que elimina gases que se incorporam ao fluido durante a perfuração.

ativos (conectados ao sistema de circulação) e tanques de manobra<sup>13</sup> (fundamental para identificar *kicks*).

A transmissão dessas informações pode ser feita através de equipamentos de *Measurement While Drilling* (MWD) e *Logging While Drilling* (LWD), *mud logging* ou pelo próprio sistema de monitoramento da sonda. Em geral, a depender do orçamento para a perfuração de um poço, as três fontes de informação são utilizadas, aumentando a segurança da operação com a maior aquisição de dados.

Mais adiante são descritas as ferramentas de M/LWD, mas por enquanto, pode-se dizer que são leituras feitas no fundo do poço. Já o *mud logging* é o monitoramento de tais parâmetros em superfície. O termo *mud logging* por si só, não descreve a atividade. Sua atividade vai além da simples análise do fluido de perfuração que retorna do poço ciclicamente, como seu nome diz.

O *mud logging* representa uma grande gama de serviços prestados por uma equipe multidisciplinar formada por geólogos, engenheiros de cálculo de pressão de poros, avaliação de formações e técnicos de TI, estes no campo conhecidos como *mud loggers*. Essa equipe, na sonda de perfuração, encontra-se na cabine de *mud logging*, dando nome ao serviço prestado [9]. Tradicionalmente entregam-se ao contratante três serviços principais:

- Avaliação geológica. Tal avaliação se dá a partir das coletas de amostra de calha - partículas maiores de fragmentos de rocha - que chegam às peneiras em através do sistema de circulação da sonda, sendo descritas a litologia e mineralogia pelo geólogo. A análise das amostras auxilia a inferência de propriedades petrofísicas, tais como a densidade, porosidade e

---

<sup>13</sup> Tanque com pequena capacidade utilizado para monitorar ganhos e perdas de fluido de perfuração no poço sendo muito utilizado durante manobras de descida e retirada do BHA.

permeabilidade da formação perfurada, além do tipo de litologia e das feições geológicas da rocha importantes para tomar as melhores decisões no que tange a escolha de parâmetros de perfuração e integridade do poço;

- Suporte a engenharia de perfuração e operações (planejamento e execução de construção de poços);
- Manutenção de operações de perfuração e avaliação de acordo com as políticas de segurança, meio ambiente e saúde vigentes.

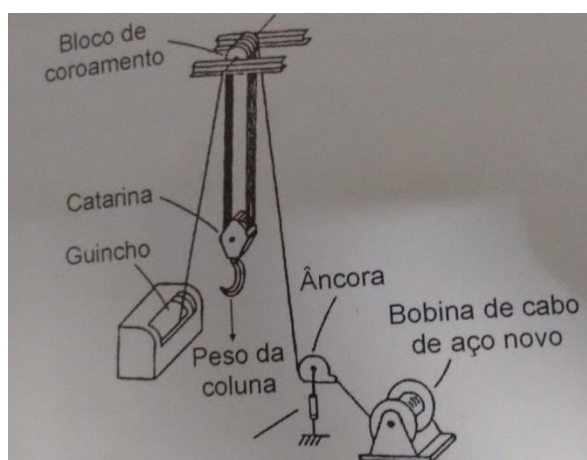
Dessa forma, tais serviços buscam identificar potenciais zonas produtoras de hidrocarbonetos, marcadores estratigráficos e correlações geológicas, além de prover à equipe de perfuração informações para que seja realizado um trabalho de forma segura e otimizada. Para aquisição de dados de superfície, o *mud logger* instala sensores em diversas localidades da sonda.

O sensor de torque é como um grampo o qual é colocado em volta do cabo de energia do sistema do *Top Drive*. Ele funciona baseado na leitura de correntes elétricas, leitura de amperagem, ampères. Quanto maior o torque gerado pela rotação da coluna de perfuração maior será a corrente elétrica pelo cabo de energia do *Top Drive*. A leitura de torque pode estar relacionada à litologia e suas variações durante a perfuração, problemas durante a perfuração, por exemplo, restrições de diâmetro do poço para passagem de componentes do BHA, desgaste das estruturas cortantes das brocas de perfuração etc.

O sensor para leitura do número de rotações por minuto provido a coluna de perfuração pelo sistema de rotação da sonda também é instalado no *Top Drive* e, para casos de sondas que utilizam a mesa rotativa como provedor de giro na coluna, na própria.

O sensor de peso, que registra o parâmetro de peso sobre a broca é chamado em inglês de *hookload sensor* sendo ele instalado no sistema de movimentação de carga de uma sonda. O cabo de perfuração proveniente do carretel é passado e fixado numa âncora situada próximo a torre de perfuração. Nessa âncora é que se encontra o sensor de peso, que mede a tensão no

cabo, a qual está relacionada com o peso total sustentado pelo guincho. Esse é passado pelo sistema bloco-catarina e enrolado e fixado no tambor do guincho (Figura B.4).



**Figura B.4: Sistema de movimentação de carga de uma sonda onde o sensor de peso é instalado [6].**

Para segurança da operação, monitoram-se os volumes de entrada e saída de fluido do poço, analisa-se o fluido de perfuração que retorna à superfície, sob a ótica das propriedades das partículas carregadas pelo fluido, presença de óleo e/ou gás, coletadas na sonda e coleta amostras de calha também.

São instalados sensores nas bombas de lama para contagem de *strokes*, leitura de vazão, permitindo verificar se a vazão de bombeio na entrada do poço é a mesma na saída do sistema de circulação, sensores que medem o volume de fluido de perfuração nos tanques. Ambos os sensores auxiliam na verificação da estanqueidade da parede do poço, se há ganho ou perda de fluido para a formação.

Como podemos ver, a equipe de *mud logging* é responsável por diversas atribuições, porém, para o trabalho proposto, são os parâmetros de perfuração que interessam. Aquisição computadorizada de dados e uma rotina contínua de transferência deles em tempo real para *displays* espalhados na sonda de perfuração e/ou escritório em terra permitindo tomadas de decisões mais rápidas. Somando-se a isso as ferramentas de MWD e LWD, tornando a cabine de *mud logging* em uma central de aquisição e transmissão de dados.

## B.2 COMPONENTES DO BHA DE PERFURAÇÃO

A coluna de perfuração é composta pelos tubos de perfuração somados ao BHA, o qual é composto por várias componentes, como broca e ferramentas de M/LWD, citados anteriormente, comandos e equipamentos de perfuração etc. Os tubos de perfuração têm como função básica transmitir rotação (sistema de rotação) e conduzir o fluido de perfuração (sistema de circulação). A composição do BHA leva em consideração a trajetória do poço, tipo da formação, tipo de broca, parâmetros de perfuração a serem aplicados (peso sobre broca, vazão, rotação), diâmetros dos componentes da coluna.

### B.2.1 Brocas de perfuração

A broca é um dos componentes mais básicos da coluna de perfuração ficando localizada em sua extremidade. Sua seleção e disposição de seus jatos se baseiam na litologia perfurada, trajetória e limpeza do poço. Hoje em dia, com o avanço tecnológico e investimentos feitos nesse produto, surgem brocas mais resistentes assim como novos tipos e modelos que apresentam melhores resultados. Logo, há uma redução de gastos com a perfuração.

Existem diversos tipos de broca que são classificadas de acordo com suas estruturas cortantes, (Figura B.5). O Modelo de Ohara para previsão de ROP estudou a aplicabilidade de seu modelo para brocas tricônicas, enquanto que o objetivo desse estudo é a aplicação do modelo em um cenário de perfuração com brocas PDC.



**Figura B.5: Brocas de perfuração (da esquerda para direita, tricônica com inserto de tungstênio, PDC, impregnada e tricônica dente de aço) [10].**

Para melhor classificar os diversos tipos de brocas, a IADC criou um código internacional para a classificação, que no caso das brocas tricônicas vem sendo empregado desde 1972, tendo sido revisado para se adequar a novas tecnologias em 1992. As brocas com cortadores fixos (PDC, Diamante e TSP) ganharam um sistema de classificação IADC em 1990 [11].

O método de classificação IADC de brocas de cortadores fixos torna-se mais complexo à medida que surgem novas tecnologias de brocas. No Brasil, por influência da Petrobras e seu corpo técnico, principal companhia a atuar na área de exploração e produção de óleo e gás no país, criou-se um sistema de classificação para brocas com cortadores fixos, chamado código Petrobras, que vem sendo bastante utilizado na indústria local, influenciando até mesmo a nomenclatura de fabricantes, como a companhia Smith Bits.

### ***Brocas tricônicas***

O IADC para brocas tricônicas é formado por quatro dígitos, Tabela B.1. Esse tipo de broca se diferencia basicamente pelo tipo da estrutura cortante, dente de aço ou inserto. Há outras diferenças entre os modelos descritos pelo código IADC [12].

**Tabela B.1: Exemplo de classificação IADC de broca tricônica 437M.**

<b>1º Dígito</b>	<b>2º Dígito</b>	<b>3º Dígito</b>	<b>4º Dígito</b>
<b>4</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>M</b>

- 1º Dígito – Pode ter números de 1 a 8, onde dígitos de 1 a 3 referem-se a brocas de dentes de aço e dígitos de 4 a 8 insertos de tungstênio.
- 2º Dígito – Pode ser representado por números de 1 a 4, os quais descrevem o tipo de dente da broca e de rocha para aplicação. Além disso, mostra a graduação do 1º dígito relativo à dureza da rocha, normalmente indicando que quanto maior o número, maior a quantidade de dentes e menor a altura dos mesmos.

- 1 – Formação mais mole dentro do grupo;
  - 2 – Formação mole e média;
  - 3 – Formação média à dura;
  - 4 – Formação dura.
- 3° Dígito – Este campo refere-se aos rolamentos e proteção do *gauge*<sup>14</sup>, podendo ser determinado por números de 1 a 7.
    - 1 e 3 – Rolamentos não selados. Estes são lubrificados pelo próprio fluido de perfuração;
    - 2 – Selo para utilização de fluido a base de ar;
    - 4 e 5 – Rolamentos com selo de borracha;
    - 6 e 7 – Rolamentos com selos mais resistentes. O 7 caracteriza o selo tipo *journal*, que é um selo metal-metal.

Os rolamentos não selados são lubrificados pelo fluido de perfuração e estão sujeitos a abrasão devido a entrada de sólidos presentes no fluido. Já os cones selados têm um lubrificante especial, aumentando a vida útil da broca. É importante ressaltar que a vida útil de uma broca tricônica está ligada ao número de revoluções, ao peso utilizado sobre a broca e ao desgaste inerente à perfuração. Os cones giram em torno do seu próprio eixo.

A Figura B.5 mostra a diferença entre as brocas tricônicas e as brocas de cortadores fixos. Tal diferença resulta em aplicação de parâmetros de perfuração diferenciados, análise de desgastes diferentes, e nas tricônicas, além do desgaste da estrutura cortante há o desgaste dos rolamentos que seguram os cones.

- 4° Dígito – Este último serve como uma descrição complementar, onde os caracteres são representados por letras, por exemplo:

---

<sup>14</sup> Calibre da broca.

- A – Aplicação para perfuração com fluido base ar;
- B – Selo de rolamento especial;
- C – Contém jato central;
- H – Aplicação em poço horizontal com RSS;
- M – Aplicação para motor de fundo etc.

***Brocas de cortadores fixos***

A classificação IADC para brocas de cortadores fixos também é feita com 4 dígitos [11]. Esse tipo de broca, assim como as tricônicas de inserto e dente de aço, possuem subdivisões, conforme exemplo na Tabela B.2.

**Tabela B.2:** Exemplo de classificação IADC para broca PDC M432.

1º Dígito	2º Dígito	3º Dígito	4º Dígito
M	4	3	2

- 1º Dígito – Letra M (Matrix) ou S (*Steel*) representa o tipo de material usado no corpo da broca.
- 2º Dígito – Se refere à quantidade de cortadores no caso de brocas de PDC e ao tamanho de diamante no caso das brocas de diamante, TSP e impregnada. Nestas últimas, o tamanho do diamante é expresso em quantidade de pedras por quilate (1 quilate = 200 mg). Quanto maior a quantidade de pedra por quilate menor o tamanho da pedra.

Broca PDC:

- 1 – Até 30 cortadores;
- 2 – De 31 a 40 cortadores;
- 3 – De 41 a 50 cortadores;
- 4 – 51 ou mais cortadores.

Brocas de diamante, TSP e impregnada:

- 6 – Menos de 3 pedras de diamante por quilate;
  - 7 – 3 a 7 pedras de diamante por quilate;
  - 8 – Mais de 7 pedras de diamante por quilate.
- 3º Dígito – Refere-se ao tamanho do cortador no caso das brocas de PDC e ao tipo de cortador no caso das brocas de diamante, TSP e impregnadas.

Broca PDC:

- 1 – Cortadores maiores que 24 mm de diâmetro. (Diâmetro usual 1” = 25,4 mm);
- 2 – Cortadores entre 14 mm e 24 mm;
- 3 – Cortadores entre 8 mm que 14 mm (diâmetro usual 13,3 mm e 13 mm);
- 4 - Cortadores ainda menores como os de 8 mm.

Brocas de diamante, TSP e impregnada:

- 1 – Diamante natural;
  - 2 – Refere-se a TSP (Thermally-stable diamond);
  - 3 – Combinação de diamante + TSP;
  - 4 – Broca impregnada.
- 4º Dígito – Refere-se à característica de comprimento de calibre e de tipo de broca.
    - 1 – Referente à broca de PDC ou brocas de TSP e diamante com aletas;
    - 2, 3, 4 – Refere-se ao comprimento do calibre em ordem crescente para todos os tipos de brocas com cortadores fixos. Brocas para turbina, impregnadas, têm calibre longo, assumem a nomenclatura 4.

Este código IADC é de difícil memorização prejudicando a identificação das características da broca de imediato em programa de brocas. Pensando nisso, o corpo técnico da Petrobras elaborou um código mais simples e eficiente para as brocas PDC, como por exemplo, o código M0813 o qual:

- 1º Dígito – Letra M (Matrix) ou S (*Steel*) representa o tipo de material usado no corpo da broca;
- 2º e 3º Dígitos – Representam o nº de aletas;
- 4º e 5º Dígitos– Representam o diâmetro dos cortadores em quantidade predominante. Se forem cortadores diferentes, mas em mesma quantidade, 50% e 50%, considera-se o tamanho do cortador de maior diâmetro.

Sendo assim, uma broca M0813 contém 8 lâminas e maioria de cortadores de 13 mm.

### ***Brocas com novas tecnologias***

Hoje com o avanço da tecnologia surgiram brocas com cortadores mistos e brocas híbridas. Exemplo de uma broca mista é a *Kymera*, Figura B.6, da companhia Baker Hughes que possui estruturas cortantes de brocas PDC e cones de brocas tricônicas.



**Figura B.6: Broca Kymera. Fonte: Baker Hughes.**

Exemplo de broca híbrida é a *FuseTek* da companhia NOV a qual é uma broca do tipo PDC porém, a medida que seus cortadores vão se desgastando passam a expor diamantes característicos de brocas impregnadas [13]. Ou seja, ela é uma broca PDC, que com seu desgaste, se transforma em impregnada.

### ***Desgaste de Brocas Tricônicas e PDC***

O IADC, além de criar uma nomenclatura para identificação das brocas, criou uma codificação para os desgastes das brocas, feito quando a broca é retirada do poço. Esta análise serve como base de informação para futuros programas de brocas avaliando a eficiência da broca em um dado cenário de perfuração. Tais informações registradas ajudam a companhia a escolher melhor a broca e ajudam os fabricantes a aprimorarem seus produtos aumentando a resistência em formações abrasivas, por exemplo. O código é dividido em 8 campos (Tabela B.3):

- Nível de desgaste dos cortadores (campos 1 e 2), Figura B.7 para tricônicas e Figura B.8 para PDC;
- Características do desgaste na estrutura cortante e/ou no corpo da broca e jatos (campos 3 e 7);
- Localização principal onde ocorre o desgaste na broca (campo 4), Figura B.9 para brocas PDC;
- Desgaste de rolamentos e selos (campo 5), no caso das tricônicas;
- Perda de calibre da broca (campo 6);
- Motivo de retirada (campo 8).

A interpretação do nível de desgaste, entre 0 (broca nova) e 8 (máximo desgaste), é diferente para as brocas tricônicas e cortadores fixos em função da diferença de suas estruturas cortantes, apesar de mesma linha de raciocínio.

A altura do desgaste do dente é um dos dados que o Modelo de Ohara utiliza para prever a ROP. As brocas PDC não possuem dentes, possuem cortadores que são fixados ao corpo da broca. Sua escala de desgaste (Figura B.8) divide o raio da broca em áreas interna e externa. Os dois terços de cortadores mais próximos do centro da broca são

considerados cortadores internos, primeira informação do código de desgaste da broca, enquanto o um terço restante são os externos, segunda informação do desgaste.

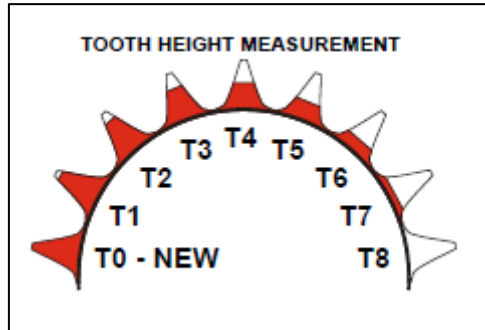


Figura B.7: Interpretação de desgaste de cortadores de brocas tricônicas [14].

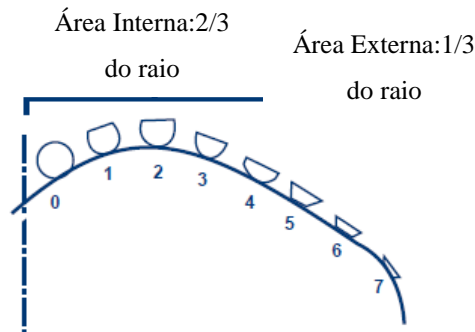


Figura B.8: Interpretação de desgaste de cortadores de brocas PDC.

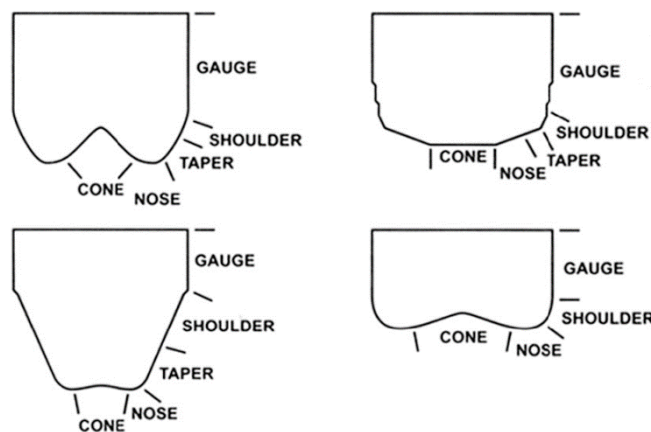
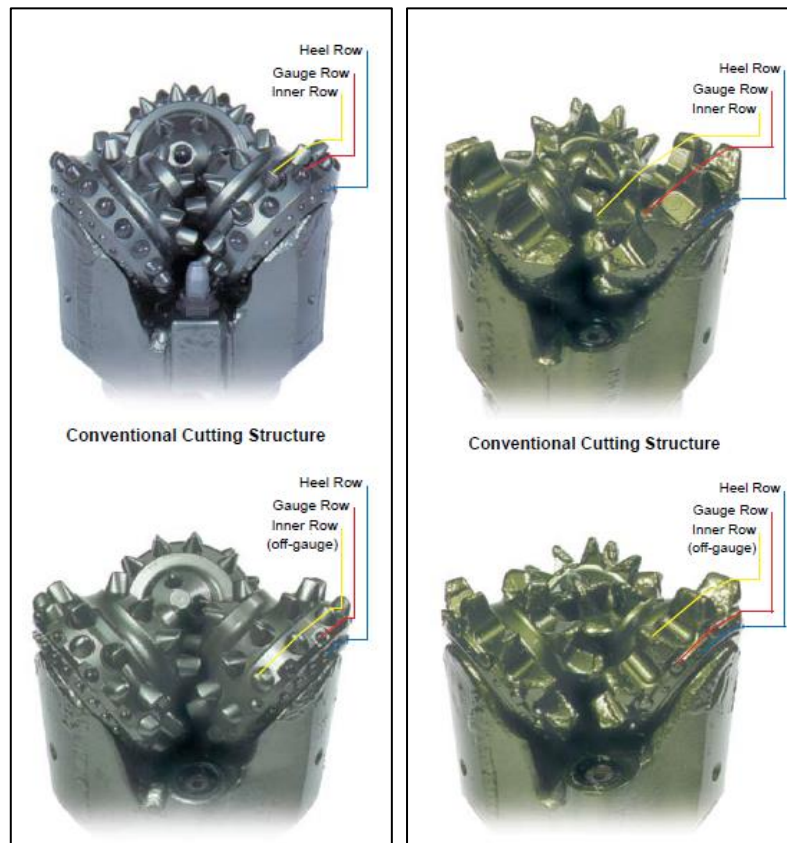


Figura B.9: Localização de desgaste em brocas PDC [15].

Nas tricônicas, Figura B.10, a fileira externa são os dentes ou insertos mais próximos ao corpo da broca. Os demais cortadores, indo em direção ao centro da broca, são considerados como parte da fileira interna.



**Figura B.10: Estruturas cortantes das brocas tricônicas, inserto de tungstênio e dente de aço respectivamente [14].**

**Tabela B.3: Classificação de desgaste de brocas IADC.**

CODIFICAÇÃO DOS DESGASTES DE BROCAS							
D				R	O	Observações	
Estrutura Cortante		Desgaste Principal		Rolamento ou Selos	Calibre 1/16"	Outro Desgaste	Motivo da Retirada
Interna	Externa	Característica	Localização				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
5	8	IQ	M	E	2	IL	TP
<b>(1) ESTRUTURA CORTANTE INTERNA</b>				<b>(2) ESTRUTURA CORTANTE EXTERNA</b>			
2/3 Internos da Estrutura Cortante				1/3 Externo da Estrutura Cortante			
<b>BROCAS DENTE DE AÇO</b> - Uma medida linear do desgaste dos dentes devido à abrasão ou dano. Ex.: <b>0</b> - Nenhuma perda, desgaste e/ou quebra de insertos. <b>8</b> - Todos os insertos perdidos, desgastados e/ou quebrados.				<b>BROCAS DE INSERTO</b> - Uma medida linear de perda, desgaste ou quebra dos insertos. Ex.: <b>0</b> - Nenhuma perda, desgaste e/ou quebra de insertos. <b>8</b> - Todos os insertos perdidos, desgastados e/ou quebrados.		<b>BROCAS DE DIAMANTE, PDC e TSP</b> - Uma medida linear da perda, desgaste ou quebra dos cortadores. Ex.: <b>0</b> - Nenhuma perda, desgaste e/ou quebra dos cortadores. <b>8</b> - Todos os cortadores perdidos, desgastados e/ou quebrados.	
<b>(3) DESGASTE PRINCIPAL</b>				<b>(4) LOCALIZAÇÃO</b>		<b>(8) MOTIVO DE RETIRADA DA BROCA</b>	
Estes códigos também são usados na coluna (7). English - <b>Português</b> - Por extenso em português				<b>BROCAS DE CONES</b> N I Fileira Interna M M Fileira do Meio G E Fileira Externa A T Todas as Fileiras		English - <b>Português</b> - Por extenso em português WC AM Aguardar Melhoria de Tempo BU EN Broca Encerada HR BF Tempo de Broca Fundo CM CL Para Condicionar Lama CM CM Aumento do Custo/Metro CT DP Cortou Cimento HR DU Por Dúvida DSF FC Falha da Coluna DTF FF Falha de Ferramenta de Fundo DMF FM Falha de Motor de Fundo / Rotary Steerable FP FO Para Foto PN JO Jato Obstruído BHA MB Para Mudança de BHA FM MF Mudança de Formação CP MP Mudança de Projeto LOG PE Para Perfilagem TD PF Profundidade Final do Poço/Fase HP PP Problemas de Poço LIH QJ Queda do Jato PP QP Queda de Pressão TW RD Reversão com Desconexão RIG RS Reparo de Sonda CP TE Para Testemunhar DST TF Para Teste de Formação TQ TO Por Torque PR TP Por Taxa de Penetração WO WO Furo na coluna	
SS AA Desgaste por Auto-Afiação SD AD Aba da Perna Desgastada - AE Aleta erodida SP AQ Aba da Perna Quebrada PN BE Bocal do Jato Erodido RG CA Cone com Calibre Arredondado QR CD Cone c/ Desgaste Descentralizado EC CE Cone Erodido CI CI Cone com Interferência LC CP Cone Perdido BC CQ Cone Quebrado CC CT Cone Trincado - DC Descolamento do cortador WT DD Dentes Desgastados CT DL Dentes Lascados FC DP Desgaste Plano nos Dentes BT DQ Dentes Quebrados CR DT Cone c/ Desgaste p/ Testemunho TR EG Desgaste por Engrenagem BU EN Desgaste por Enceramento - FL Falha de Liga do Cortador WT ID Insertos/Cortadores Desgastados OG IG Insertos/Cortadores Girados CT IL Insertos/Cortadores Lascados LT IP Insertos/Cortadores Perdidos BT IQ Insertos/Cortadores Quebrados LN JP Jato Perdido RO MA Marca em Forma de Anel JD MF Marca de Ferro JD MI Marca de Inserto NO NC Nenhuma Característica de Desgaste PB PE Perna Empenada BL PQ Perna Quebrada RR** RR Broca Reutilizável CD* TR Cone Travado HC TT Trinca no Inserto ou Desintegração do Cortador p/ Temperatura				<b>BROCAS DE DIAMANTE</b> C C Cone N N Nariz T P Pescoço S O Ombro G G Calibre A T Todas as Áreas <b>CONE # OU # CONES #s</b> 1 2 3			
				<b>(5) ROLAMENTOS / SELOS</b>			
				<b>ROLAMENTOS NÃO SELADOS</b> - Uma escala linear estimando a vida útil do rolamento já utilizado. Ex.: <b>0</b> = Nenhuma vida utilizada <b>8</b> = Toda vida útil utilizada <b>ROLAMENTOS SELADOS</b> E E Indica Todos os Selos Efetivos F F Indica Um ou Mais Selos Falhos X D Indica Broca de Diamante			
				<b>(6) CALIBRE</b>			
				Ex.: <b>0</b> = Nenhuma perda de calibre <b>1</b> = 1/16" de perda de calibre <b>2</b> = 2/16" de perda de calibre...			
				<b>(7) OUTRO DESGASTE</b>			
				Códigos usados a partir da coluna (3).			
<b>OBSERVAÇÕES GERAIS</b>							
Seguindo o método Petrobrás, temos: 1) Iniciar a medida do desgaste dos cortadores do centro para a periferia. 2) Considerar desgaste igual a 8 quando o PDC estiver tangente à superfície da aleta da broca. 3) O nariz é composto pelo cortador posicionado na parte mais alta da aleta e seus vizinhos. A escolha da quantidade de cortadores vizinhos vai depender da conicidade da broca e do bom senso do técnico.							

### *Área dos jatos*

Para que o fluido passe pela broca, elas possuem orifícios. Estes orifícios são chamados de jatos da broca. O somatório da área dos jatos, *Total Flow Area* (TFA), considera que os jatos possuam geometria circular. Para entendimento do cálculo dessa área, no campo expresso em  $\text{pol}^2$ , segue exemplo:

Considerando uma broca com 3 jatos de 16, isto significa que cada jato da broca tem  $16/32 \text{ pol}^2$ , logo fazendo-se o somatório de 3 áreas de círculo,  $\sum_{i=1}^3 \frac{\pi D^2}{4}$ , o TFA dessa broca será de  $0,589 \text{ pol}^2$ . Esse dado é utilizado para cálculo em um parâmetro do Modelo de Ohara.

### **B.2.2 Ferramentas de perfuração**

A perfuração de um poço pode ser feita em dois modos: rotativo e deslizante (do inglês, *sliding drilling*) [16]. No primeiro, a coluna gira, no segundo, não há giro da coluna, sendo o giro da broca provido pelo motor de fundo ou turbina. Esse caso ocorre quando se deseja perfurar um poço em que haja trechos com ganho e perda de ângulo, por exemplo.

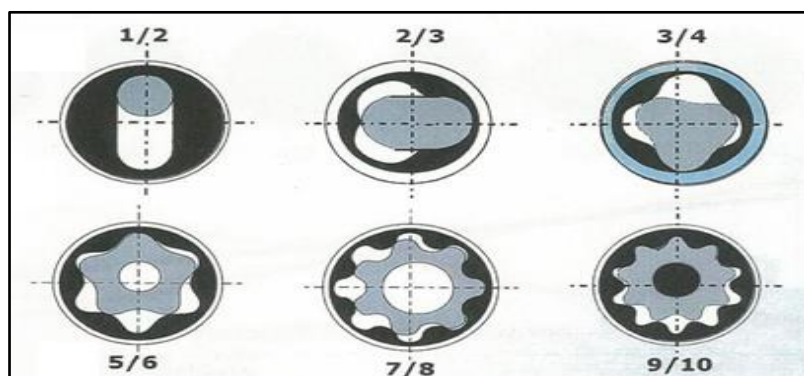
Como visto anteriormente, há equipamentos de superfície capazes de girar a coluna de perfuração. Porém, não é garantido que o giro aplicado na superfície seja o que chega integralmente ao fundo. Além disso, os equipamentos de superfície possuem limitações operacionais e o responsável pela perfuração não pode aplicar qualquer parâmetro, devendo respeitar os limites impostos pelo fabricante. Outra questão é a aplicação de elevados valores de rotação na coluna podendo gerar vibrações na coluna de perfuração podendo danificar as ferramentas do BHA. Nestas ocasiões o uso de um motor de fundo é recomendado diminuindo o valor da RPM aplicada na coluna de perfuração.

O motor de fundo baseia-se no conceito deslocamento positivo (tipo Moineaux), conectado logo acima da broca e movimentado pelo fluxo de fluido de perfuração que circula em seu interior. Sua principal função é transmitir rotação e torque à broca independentemente da rotação da coluna. Em outras palavras, transforma energia

hidráulica em mecânica. A quantidade de energia hidráulica que se transforma em giro da coluna é indicada pelo fator de revolução (FR) do motor, que é o número de revoluções que o equipamento de fundo é capaz de fornecer para cada 1 gpm de vazão (rev./gal).

Sendo assim, o motor de fundo tem como principais funções prover maior potência a broca de perfuração, permitir a realização de poços direcionais, também utilizado em poços verticais para, por exemplo, minimizar o desgaste da coluna de perfuração em contato com a parede de poço, mitigar vibração, podendo aplicar na coluna menor rpm.

O FR varia de motor para motor em virtude do conjunto motor e estator. A potência do motor de fundo é fornecida por esse conjunto. Tanto o rotor quanto o estator possuem lóbulos helicoidais que se misturam formando uma cavidade helicoidal selada. O fluxo de fluido através desta cavidade fornece giro ao rotor. O estator sempre tem um lóbulo a mais que o rotor, Figura B.11.



**Figura B.11: Exemplos de configurações rotor e estator de motores de fundo [16].**

A potência e o torque do motor aumentam com o aumento do comprimento da seção de potência. Quanto maior o número de módulos, maior será o torque do motor e menor a sua velocidade de rotação.

As turbinas, assim como os motores de fundo, têm como função prover maior potência à broca transformando energia hidráulica em mecânica. No entanto, o conceito de

deslocamento positivo, não se aplica. Uma turbina se assemelha mais a uma centrífuga ou a uma bomba axial. As turbinas, similarmente aos motores de fundo, são compostas por uma seção de potência, onde se encontra o conjunto rotor/estator. Entretanto, a grande diferença com relação ao deslocamento positivo é que o rotor é formado por hélice ou lâminas que giram à medida que o fluido de perfuração é bombeado através delas. As turbinas têm maior perda de carga necessitando de bombas de lama mais potentes nas sondas de perfuração. Trabalham com menor faixa de vazão.

Tanto turbinas como motores de fundo apresentam uma grande variedade, seja o diâmetro do corpo da ferramenta seja o FR. Dessa forma, supondo um motor de fundo de 8 ½”, com FR de 1,2 rev/gal, perfurando com 600 gpm, ele fornece a broca 720 rpm que se somam a rpm de superfície.

Há diversos tipos de brocas de perfuração. A seleção de um dado tipo tem influência direta na escolha de que equipamento de perfuração a ser colocado no BHA. O uso de uma turbina está diretamente associado ao uso de brocas impregnadas. A boa prática da indústria recomenda a aplicação desse conjunto de perfuração impregnada mais turbina, em áreas com formações geológicas bastante duras como, por exemplo, carbonatos e grupamento de rochas ígneas. Dessa forma, o uso se torna mais frequente nas fases mais profundas de perfuração, 12 ¼” e 8 ½”.

Por último o *Rotary Steerable System* (RSS). Esse sistema permite que a coluna gire o tempo todo, inclusive em trechos de mudança de trajetória, ao contrário do motor de fundo e turbina que perfuram em modo deslizante. Há na indústria dois tipos: *point the bit* e *push the bit* [16]. No primeiro, a broca é deslocada com relação ao resto da coluna para execução da trajetória desejada, enquanto no segundo tipo uma força é aplicada contra o poço para que a broca alcance a trajetória correta.

### **B.2.3 Ferramentas de M/LWD**

As ferramentas de M/LWD possuem sensores que fornecem aos responsáveis pela perfuração inúmeras informações que o auxiliam na escolha dos melhores parâmetros de perfuração. Desde informações sobre a formação geológica através de perfis elétricos

e composição dos fluidos em seu interior (perfis raio gama, densidade, neutrão, tempo de trânsito, resistividade etc.), dados dos parâmetros de perfuração que estão efetivamente aplicados à broca e até informações sobre a trajetória do poço (inclinação, azimute).

O envio dessas informações é realizado por meio de pulsos de pressão no fluido de perfuração, os quais são detectados por um aparelho de medição e transformados em um sinal eletrônico. Este sinal é processado e apresentado em forma numérica nas telas dos sistemas de monitoramento auxiliando os responsáveis pela perfuração e geólogos quanto a melhor prática de perfuração e avaliação geológica do intervalo atravessado, principalmente quando dentro do reservatório.

Com o passar do tempo, o notável avanço tecnológico permite hoje que essas ferramentas registrem, por exemplo, a pressão de poros, permitindo assim a análise de uma maior probabilidade de zonas anormalmente pressurizadas. A maior aquisição de dados em um curto espaço de tempo ajuda na tomada de decisão acelerando a curva de aprendizado de perfuração em uma dada região.

Dessa forma, reduz-se o tempo de perfuração, conseqüentemente o custo operacional. No entanto, essas ferramentas são utilizadas dependendo do orçamento do projeto de perfuração. Poços em lâminas d'água profundas possuem, em geral, orçamentos maiores que poços em terra, uma vez que, para o Brasil, por exemplo, as maiores reservas de óleo e gás se encontram no mar, logo a rentabilidade esperada permite maiores gastos exploratórios. Sendo assim, nem sempre os profissionais no campo têm todas as informações disponíveis para melhor tomada de decisão.

É importante ressaltar que essas medições não são feitas na profundidade da broca. Os sensores dessas ferramentas ficam afastados da extremidade da coluna de perfuração. Esse afastamento é denominado *offset* das ferramentas. Sendo assim, primeiro perfura-se o intervalo e somente depois é que os dados relativos à geologia da região são adquiridos.

### ***Perfil densidade***

A densidade de uma formação ( $\rho_b$ ) pode ser obtida através de medições diretas, através de operações de testemunho que coletam do poço extensas amostras de formação a serem posteriormente analisadas em laboratório ou através de perfis de densidade descidos na perfilagem do poço ou em ferramentas de L/MWD provendo o dado em tempo real. No entanto, há fatores que limitam o uso desse perfil como:

- Normalmente corrido apenas nas zonas de interesse;
- Grandes imprecisões em poços alargados;
- Disponível somente a partir da profundidade do revestimento de superfície.

Esta última é comum a todos os perfis fazendo com que os valores para as formações superficiais sejam arbitrados em virtude da ausência de dados. Valores que podem ser utilizados nestes trechos mais superficiais, em que os sedimentos são mais porosos e menos consolidados, geralmente variam de 1,5 a 1,95 g/cm<sup>3</sup> [17].

Quando esse perfil não é descido, a densidade pode ser calculada através de correlações matemáticas baseadas nos dados disponíveis.

#### ***7.1.1.1 Perfil Sônico (DT)***

Da física fundamental sabe-se que a velocidade do som varia segundo o meio em que suas ondas se propagam,  $V_{sólidos} > V_{líquidos} > V_{gases}$ .

Maior velocidade de propagação significa menor tempo gasto para que uma onda percorra um intervalo. A vantagem maior do perfil sônico provém da relação direta que existe entre o tempo de trânsito de uma onda sonora em uma rocha e sua porosidade [17].

#### ***Perfil Neutrão (NPHI)***

Existem diversos tipos de perfis neutrão. Eles se distinguem pelo método utilizado na detecção de nêutrons. Os nêutrons são partículas destituídas de carga elétrica, com

massa quase idêntica a do átomo de hidrogênio. Sendo partículas neutras, elas podem penetrar profundamente na matéria, atingindo os núcleos dos elementos que compõem a rocha [17].

Esse perfil registra diretamente as porosidades das rochas, tanto em poço aberto como em poço revestido, desde que as camadas estudadas detenham água. Quando as rochas são portadoras de gás ou hidrocarbonetos leves, ocorre uma diminuição nas porosidades calculadas com estes perfis, em relação ao sônico ou densidade.

Quando sob as mesmas condições de temperatura e pressão, e para um mesmo volume de rocha analisado, a presença de gás ou hidrocarboneto leve, reduz sensivelmente a densidade de hidrogênio, quando comparada a óleo e água. Assim menor a densidade de hidrogênio, menor a quantidade de água na rocha e assim menor o valor registrado pelo perfil neutrão em relação ao sônico e/ou densidade. Para o presente estudo somente utilizam-se os registros do perfil neutrão para análise de correlações matemáticas para cálculo de UCS, *Unconfined Compressive Strength*, desconsiderando qualquer influência do fluido dentro da rocha.

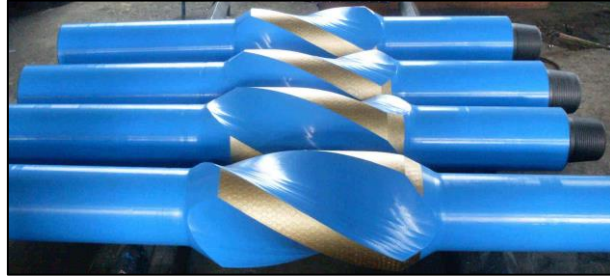
#### **B.2.4 Outros componentes do BHA**

O BHA é montado de acordo com o tipo de trajetória do poço e interesses geológicos. Além de motores de fundo e ferramentas de M/LWD, há outros componentes.

Os *Heavy Weight Drill Pipe* (HWDP) são tubos de transição entre os tubos de perfuração e comandos. Ao contrário dos tubos de perfuração, podem trabalhar em compressão. Os comandos são tubos pesados com função de propiciar peso sobre broca, prover rigidez à coluna de perfuração (dificuldades para trechos de poços direcionais de ganho ou perda de ângulo, podendo ser lisos ou espiralados, evitando problemas com aprisionamento da coluna por diferencial de pressão, Capítulo 2).

Estabilizadores tem como função a centralização da coluna de perfuração. Reduzem o contato do comando com a parede do poço (ajuda a evitar prisão por diferencial), concentra o peso do BHA na broca. Além disso, provê rigidez ao BHA evitando alto

momento fletor ajudando na definição dos 3 pontos de geometria e mantém o calibre do poço, contanto que não esteja dentro de um cenário abrasivo que desgasta rapidamente as lâminas do estabilizador. Possuem diversos modelos e desenhos como, por exemplo, o tipo espiralado, Figura B.12.



**Figura B.12: Estabilizador do tipo integral espiralado.**

O *roller reamer* (escareador) é uma ferramenta utilizada para manter o calibre do poço, uniformizando sua geometria. Dessa forma, ela influencia na aplicação dos parâmetros de perfuração, uma vez que um poço mais íntegro permite a maior transferência dos parâmetros aplicados na superfície à broca.

## APÊNDICE C – COEFICIENTES GERADOS NA PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DO MODELO DE OHARA

Simulação	Coeficientes					
	b1	b2	b3	b4	b5	b6
1	47,95	-0,6	-0,81	-26,52	0,66	1,82
2	58,35	-0,59	-1,6	-32,77	0,45	1,66
3	31,13	-0,39	7,42	-14,96	1,32	1,94
4	50,4	-0,48	-1,42	-28,1	0,56	1,78
5	39,26	-0,45	5,13	-20,5	0,97	1,96
6	51,46	-0,56	-1,14	-28,85	0,52	1,78

Simulação	Coeficientes					
	b1	b2	b3	b4	b5	b6
7	37,71	-0,47	0	-20,33	0,87	1,96
8	96,31	-1,23	-2,34	-54,02	0,17	0
9	70,4	-1,2	12,1	-35,64	1,38	0
10	81,94	-1,34	0	-44,84	0,65	0

Simulação	Coeficientes					
	b1	b2	b3	b4	b5	b6
11	0,21	-0,88	-0,4	0,42	1,4	1,46
12	0,52	-0,88	-0,4	1,01	1,4	-0,18
13	-5,52	-0,88	-0,4	4,14	1,4	-90,51
14	-0,17	-0,47	-10,12	-0,29	1,11	2,09
15	0,27	-0,47	-10,1	0,57	1,11	-0,26
16	-8,4	-0,46	-9,89	5,12	1,13	-130,2
17	1,15	-0,32	9,77	2,25	1,71	2,16
18	1,61	-0,32	9,77	3,13	1,71	-0,27
19	-7,34	-0,32	9,76	7,76	1,71	-134,2
20	-0,72	-0,24	2,09	-1,35	0,44	2,78
21	-0,12	-0,24	2,09	-0,21	0,44	-0,35
22	-16,44	-0,24	2,09	8,37	0,44	-146,1
23	0,86	0,01	12,4	1,66	1,42	3,16
24	1,55	0,01	12,4	2,96	1,42	-0,39
25	-17,02	0,01	12,4	12,72	1,42	-166,6
26	-0,27	-0,1	4,67	-0,48	0,73	3,41
27	0,48	-0,1	4,67	0,92	0,73	-0,43
28	-19,54	-0,1	4,67	11,45	0,73	-179,4

Simulação	Coeficientes					
	b1	b2	b3	b4	b5	b6
29	-1102,2	-1,11	-12,1	569,94	1,17	0
30	-60,09	-1,03	-12,55	29,55	0,8	-0,17

Coeficientes com valor “zero” são coeficientes gerados para parâmetros que foram desconsiderados durante alguma simulação (casos de  $X_3$  e  $X_6$ ).

## APÊNDICE D – EXEMPLO DE TRATAMENTO DE DADOS ATRAVÉS DE MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE *OUTLIERS*

Como exemplo a análise de *outliers* feita para os dados de rpm na broca durante a perfuração da Corrida C utilizando o método “Box-Plot”, Tabela D.1.

**Tabela D.1: Variáveis calculadas para aplicação do método “Box-Plot” para verificação de *outliers* em dados de rpm na broca.**

RPM na Broca	
Mediana	120,58
Quartil 1	100,77
Quartil 3	120,97
$dq = (Q3 - Q1)$	20,20
$Q1 - 1,5dq$	70,47
$Q3 + 1,5dq$	151,27

Verificam-se que registros de rpm na broca abaixo de 70,47 e acima de 151,27 são considerados *outliers*. Antes da aplicação do método ressalta-se a realização de um tratamento prévio dos dados sendo identificado um registro de rpm na broca “zero”. Esse dado foi substituído pela média aritmética dos cinco registros acima e cinco registros abaixo. Feita essa breve alteração, a Tabela D.2 apresenta dados de rpm na broca de um trecho da perfuração da Corrida C onde duas linhas de registro foram identificadas como *outliers*.

**Tabela D.2: Dados de rpm de um trecho de perfuração da Corrida C.**

Profundidade	RPM na Broca	Outlier
X.119	79,69	não
X.120	89,87	não
X.121	89,87	não
X.122	89,91	não
X.123	100,04	não
X.124	23,27	Outlier
X.125	100,04	não
X.126	100,06	não
X.127	100,1	não
X.128	57,86	Outlier
X.129	79,72	não
X.130	79,7	não
X.131	89,91	não
X.132	89,89	não
X.133	100,02	não

Ressalta-se que o registro “zero” foi alterado porque o BHA não possui elemento que forneça giro a broca, motor de fundo ou turbina, logo a perfuração é em modo rotativo.

Antes de prosseguir com o tratamento, afirmar se um registro é realmente ou não um *outlier* buscou-se identificar *outliers* na mesma linha de registro para os demais parâmetros de perfuração e perfis elétricos (Tabela D.3) uma vez que a variação de parâmetro pode ser na verdade um fenômeno peculiar para um momento da operação.

**Tabela D.3: Identificação de *outliers* em demais parâmetros de perfuração e perfis elétricos.**

Profundidade	RPM na Broca	Outlier	(g/cm3)	Outlier	Sônico	Outlier	NPHI	ROP (m/h)	Outlier	PSB (klbf)	Outlier	Vazão	Outlier
X.119	79,69	não	2,73	não	51,28	não	2,45	0,93	não	38,29	não	550	Outlier
X.120	89,87	não	2,71	não	50,16	não	3,20	14,39	não	31,28	não	550	Outlier
X.121	89,87	não	2,74	não	51,60	não	3,08	3,03	não	37,27	não	549	Outlier
X.122	89,91	não	2,71	não	49,87	não	1,89	2,18	não	37,42	não	549	Outlier
X.123	100,04	não	2,68	não	51,70	não	3,73	2,18	não	23,91	não	549	Outlier
X.124	23,27	Outlier	2,70	não	52,35	não	3,55	8,5	não	30,21	não	549	Outlier
X.125	100,04	não	2,70	não	50,71	não	3,53	3,39	não	26,44	não	550	Outlier
X.126	100,06	não	2,65	não	53,69	não	4,02	2,61	não	35,04	não	550	Outlier
X.127	100,1	não	2,68	não	51,81	não	4,64	1,6	não	34,73	não	549	Outlier
X.128	57,86	Outlier	2,68	não	50,72	não	3,39	1,59	não	37,88	não	549	Outlier
X.129	79,72	não	2,72	não	51,53	não	2,62	2,08	não	43,94	não	549	Outlier
X.130	79,7	não	2,71	não	51,53	não	3,16	2,08	não	27,44	não	549	Outlier
X.131	89,91	não	2,66	não	51,68	não	3,12	9,48	não	34,2	não	550	Outlier
X.132	89,89	não	2,66	não	52,54	não	3,76	5,39	não	32,97	não	495	Outlier
X.133	100,02	não	2,69	não	52,38	não	3,79	4,59	não	28,28	não	495	Outlier

Para o intervalo perfurado, de X.119 à X.133 os valores de vazão foram identificados como *outliers*. Isto porque o dq calculado foi muito pequeno diminuindo a janela entre Q1 e Q3, Tabela D.4. Com base na experiência do autor os dados de vazão não foram considerados *outliers*, uma vez que a vazão em brocas de menores diâmetros possui uma pequena faixa de alteração de valores. Para corridas com problemas de poço, a alteração pode ser maior, porém não é o caso das corridas estudadas.

**Tabela D.4: Variáveis calculadas para aplicação do método “Box-Plot” para verificação de *outliers* em dados de vazão.**

Vazão	
Mediana	574,32
Quartil 1	574,00
Quartil 3	574,62
$dq = (Q3-Q1)$	0,62
$Q1 - 1,5dq$	573,07
$Q3+1,5dq$	575,55

O PSB e os perfis elétricos não apresentaram quaisquer registros de anomalias. Por fim, verificou-se a frequência desses possíveis *outliers* na Corrida D onde não se observou representatividade. Sendo assim os dois registros foram considerados *outliers*. O aumento do conjunto de dados no tempo pode fazer com que um dado em um primeiro momento seja considerado um *outlier*, mas à medida que aumente sua frequência com a realização de novas corridas ele possa deixar de ser sendo recolocado no conjunto de dados.

Assim foi substituído o registro de X.124 pelo valor encontrado a partir do cálculo da média aritmética dos cinco metros acima e cinco metros abaixo. Para substituição desse *outlier* utilizaram-se os dados de rpm na broca de X.119 à X.123, enquanto abaixo os dados utilizados são X.125 à X.127, X.129 e X.130, não considerando a profundidade X.128 que também foi identificada como um *outlier*. Já em X.128 utilizou-se os registros X.129 à X.133, X.125 à X.127, X.122 e X.123.

Posteriormente esse conjunto de dados foi inserido no modelo proposto para adaptação do Modelo de Ohara para uso em brocas de cortadores fixos (Tabela D.5).

**Tabela D.5: Dados de rpm na broca tratados.**

<b>Profundidade</b>	<b>RPM na Broca</b>	<b>Outlier</b>
X.119	79,69	não
X.120	89,87	não
X.121	89,87	não
X.122	89,91	não
X.123	100,04	não
X.124	90,9	não
X.125	100,04	não
X.126	100,06	não
X.127	100,1	não
X.128	92,94	não
X.129	79,72	não
X.130	79,7	não
X.131	89,91	não
X.132	89,89	não
X.133	100,02	não