Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

APLICABILIDADE DA TEORIA DE ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA NA PERFURAÇÃO DOS POÇOS DO PRÉ-SAL BRASILEIRO

Daniel Resemini

Projeto de Graduação Submetido ao Corpo Docente do Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientador: Paulo Couto

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março, 2012

APLICABILIDADE DA TEORIA DE ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA NA PERFURAÇÃO DOS POÇOS DO PRÉ-SAL BRASILEIRO

Daniel Resemini

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DO PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DO PETRÓLEO.

Aprovado por:

_____

Prof. Paulo Couto, Dr. Eng. – DEI/POLI/UFRJ

_____

Prof. José Roberto Ribas, Dr. Eng. – DEI/POLI/UFRJ

_____

Eng. Sandro Alves – Baker Hughes

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
Março de 2012

Resemini, Daniel

Aplicabilidade da Teoria de Energia Mecânica Específica na Perfuração dos Poços do Pré-Sal Brasileiro / Daniel Resemini – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012.

xiii, 69p.:il.;29,7cm.

Orientador: Paulo Couto

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Petróleo, 2012.

Referências Bibliográficas: p.68.

1.Energia Mecânica Específica. 2.Dissipação de Energia por Fenômenos Vibratórios 3.Eficiência da Perfuração de Poços de Petróleo. I. Couto, Paulo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia do Petróleo. III.Título.

Dedicatória

Apesar de todos erros que cometi e todos os erros que você cometeu, com ninguém mais eu vivi e compartilhei de tantos momentos bons e ruins. Com ninguém mais eu aprendi tanto quanto com você. E é por isso que meu maior agradecimento vai para você, na forma desse trabalho.

Meu maior professor na vida, meu professor desde sempre, esse trabalho é seu.

Espero que você goste, Pai.

Carinhosamente, do seu filho Dani.

Agradecimentos

Certamente devo agradecer à contribuição de todas as pessoas com quem convivi durante minha vida até esse momento. Cada convívio veio a contribuir e a acrescentar, de alguma forma, em quem me tornei.

Primeiramente à minha família, gostaria de agradecer ao apoio de meu irmão. Só ele sabe tudo que foi necessário ser enfrentado para que se pudesse chegar onde eu estou e onde muito em breve ele também estará. À minha tia e madrinha gostaria de agradecer a todo suporte que recebi, que foi tão importante para que eu pudesse realizar este trabalho com tranquilidade.

No meio acadêmico eu gostaria de agradecer ao Paulo Couto e ao Alexandre Leiras. Além de me passarem conhecimentos essenciais para a minha formação, foram além e realmente exerceram a função de educadores, dando conselhos e "puxões de orelha" sempre que necessário para meu amadurecimento. O Paulo, por ser um dos pouquíssimos professores de Petróleo, sempre esteve totalmente sobrecarregado mas, ainda assim, sempre se preocupou com cada aluno do curso, inclusive à mim. É comovente a maneira com a qual o Paulo dedica seu tempo ao curso. Já o Alexandre é, na minha opinião, o maior responsável pelo curso de Engenharia de Petróleo da UFRJ ser reconhecido como é hoje em dia e ter os mais altos conceitos perante qualquer orgão avaliador. Não sei o que seria do curso sem a participação dele, mas certamente não seria tão bom.

No ambiente profissional onde realizei meu estágio, na Baker Hughes, gostaria de agradecer principalmente ao Raul Krasuk, Luciana da Silva Costa Strachan e ao Sandro Alves. O Raul e a Luciana abriram as portas para que eu pudesse realizar essa experiência tão importante na formação do profissional, e sempre serviram como exemplo de profissionais que espero um dia me tornar. O Sandro me ajudou a realizar esse trabalho e, mesmo com todas as complicações quanto ao prazo que foram impostas à ele, nunca desistiu de me ajudar. Simplesmente não existem palavras para agradecer à toda contribuição e palavras de incentivo que me foram dadas por ele.

“Quem ousa, vence”

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

Aplicabilidade da Teoria de Energia Mecânica Específica na Perfuração dos Poços do Pré-Sal Brasileiro

Daniel Resemini

Março/2012

Orientador: Paulo Couto

Curso: Engenharia de Petróleo

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo da Energia Mecânica Específica de Perfuração através da análise de dados reais, obtidos durante a perfuração de um poço.

A metodologia utilizada foi a de comparar trechos do registro de vibrações, nos quais houve elevados níveis de severidade, com os mesmos trechos de profundidade dos gráficos de Parâmetros de Perfuração e de Energia Mecânica Específica. Isso visa validar o modelo pela confirmação da dissipação de Energia por esse mencanismo vibracional e, também, pela identificação do principal parâmetro causador dessa ineficiência na perfuração.

O estudo de caso demonstra essa relação entre a Energia Mecânica Específica e a incidência de Vibrações, apontando esta como um problema real e relevante a ser controlado durante a perfuração de um poço para se obter uma maior eficiência pelo menor dispêndio de energia.

Por fim, conclui-se que, a partir de lições aprendidas com registros de perfurações realizadas, o desenvolvimento contínuo de tecnologias mais avançadas aliado à melhores técnicas de perfuração é a forma válida, no ponto de vista científico, para uma evolução global da prática de perfuração de poços.

Palavras-chave: Energia Mecânica Específica, Perfuração de Poços, Eficiência da Perfuração.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Petroleum Engineer.

Applicability of the Mechanical Specific Energy Theory on the Brazilian Pre-Salt Drilling

Daniel Resemini

March/2012

Advisor: Paulo Couto

Course: Petroleum Engineering

This project aims to conduct a study of the Mechanical Specific Energy through the analysis of real data obtained during the drilling of a well.

The methodology used was to compare portions of the vibrations records, in which there were high levels of severity, with portions with the same depths of drilling parameters and Mechanical Specific Energy graphics. This is in order to validate the model through the confirmation of the dissipation of Energy by the vibrational mechanism and, also, by identifying the main parameter that causes this inefficiency on drilling.

The case study demonstrates this relation between the Mechanical Specific Energy and the incidence of Vibrations, pointing this as a real and relevant problem to be controlled during the drilling of a wellbore to obtain a greater efficiency through a lower expenditure of Energy.

Finally, it's concluded that, based on lessons learned from the records of drillings realized, the continued development of more advanced technologies allied to betters drilling techniques is the valid way, in the scientific point of view, for an overall development of the drilling practice.

Keywords: Mechanical Specific Energy, Wellbore Drilling, Drilling Efficiency.

SUMÁRIO

Lista de Figuras x

Lista de Tabelas xiii

Nomeclatura xiv

1) Introdução 1

1.1) Motivação 2

1.2) Objetivos 3

1.3) Metodologia 3

1.4) Organização do Texto 4

2) Fundamentação Teórica 5

2.1) Geologia do Petróleo 5

2.1.1) Geração do Petróleo 5

2.1.2) Rochas Geradoras, Reservatórios e Selantes 6

2.1.3) UCS, CCS 10

2.2) Perfuração de Poços 14

2.2.1) Coluna de Perfuração 15

2.2.2) Perfuração Direcional 17

2.2.3) Ferramentas de MWD 20

2.2.4) Motores 22

2.2.5) Rotary Steerables 26

2.2.6) Brocas 28

2.2.7) Vibrações 34

3) Energia Mecânica Específica de Perfuração 41

4) Estudo de Caso 54

5) Conclusões 65

6) Bibliografia 68

ANEXOS 69

Lista de Figuras

Figura 1: Estágios de Transformação da matéria orgânica em petróleo. (Fonte: THOMAS, J. E., *et al.)* 5

Figura 2: Tipos de rochas e composição granular. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide) 7

Figura 3: Falhas estruturais e camadas rochosas. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide) 9

Figura 4: Graus de compactação, cimentação e seleção de grãos. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide) 10

Figura 5: Grau de compactação x Profundidade da rocha. (Adaptado: Oil Field Familiarization Training Guide) 11

Figura 6: Gráfico de dispersão de valores de UCS x Profundidade obtido a partir do Perfil Sônico de um poço. 13

Figura 7: Componente do BHA e Forças Aplicadas (Fonte: Drilling Engineering Workbook) 16

Figura 8: Poços Direcionais. (Fonte: http://www.galpenergia.com/) 17

Figura 9: Sidetracks. (Oil Field Familiarization Training Guide) 18

Figura 10: Domo Salino. (Oil Field Familiarization Training Guide) 19

Figura 11: Blow out. (Oil Field Familiarization Training Guide) 19

Figura 12: Ferramenta de M/LWD realizando uma medição no poço (http://www.saftbatteries.com) 20

Figura 13: Relação entre MD e TVD (*www.glossary.oilfield.slb.com/)* 21

Figura 14: Motores de Fundo (Alterado: Drilling Engineering Workbook) 22

Figura 15: Configurações Rotor/Estator (Drilling Engineering Workbook) 22

Figura 16: Motor Flexionado (Apresentação Interna Baker Hughes) 23

Figura 17: Alternância Seção Tangente/Ganho de Ângulo. 24

Figura 18: Modos de Direcionamento com Motor (Apresentação Interna Baker Hughes) 25

Figura 19: Secção de um Rotary Steerable e a Força Resultante Aplicada sobre a Parede do Poço (Apresentação Interna Baker Hughes) 26

Figura 20: Build Forces com Rotary Steerable (Apresentação Interna Baker Hughes) 27

Figura 21: Broca Tricônica. (Apresentação Interna Baker Hughes) 29

Figura 22: Encaixe entre os Cortadores dos três cones de uma Broca Tricônica. (Drilling Engineering Workbook) 29

Figura 23: Visão seccional de uma Broca Tricônica. (Alterado: Drilling Engineering Workbook) 30

Figura 24: Configurações de Cortadores de uma Broca Tricônica. (Drilling Engineering Workbook) 31

Figura 25: Visão frontal de uma Broca PDC. (Apresentação Interna Baker Hughes). 32

Figura 26: Design para a auto-limpeza da Broca PDC. (Apresentação Interna Baker Hughes) 33

Figura 27: Vibração ao longo de uma Coluna de Perfuração. (Apresentação Interna Baker Hughes)..... 34

Figura 28: Vibração e pontos de nó. (Apresentação Interna Baker Hughes)..... 35

Figura 29: BHA com três tipos de vibrações (Apresentação Interna Baker Hughes)... 36

Figura 30: Marca feita por Whirl (Apresentação Interna Baker Hughes)..... 37

Figura 31: Zona de Estabilidade Vibracional (Apresentação Interna Baker Hughes) .. 38

Figura 32: Vibração medida na coluna ao longo do tempo (Apresentação Interna Baker Hughes) 39

Figura 33: Desmembramento de um sinal oscilatório complexo em outras ondas menos complexas (Apresentação Interna Baker Hughes)..... 40

Figura 34: Broca e Parâmetros de Perfuração (Apresentação Interna Baker Hughes) 41

Figura 35: Demonstração da Relação MSE x RPM. (Fonte: Koederitz W.L., 2005) 43

Figura 36: Demonstração da Relação MSE x WOB. (Fonte: Koederitz W.L., 2005).... 45

Figura 37: Eficiência Mecânica x Depth of Cut (Dupriest et al., 2004)..... 47

Figura 38: Sonda de Perfuração para Ensaio de Drill off Test (Fonte: Radford, 2009) 47

Figura 39: Aparato Experimental para Drill off Test (www.bakerhughes.com)..... 48

Figura 40: Resultados Drill off Test (Dupriest et al., 2004) 49

Figura 41: Curva Típica Drilloff Test (Alterado: Dupriest et al., 2004) 50

Figura 42: Gráfico com Parâmetros de Perfuração obtidos em Tempo Real (Dupriest et al., 2004)..... 52

Figura 43: Broca Danificada após Elevados Níveis de Severidade de Vibrações (Dupriest et al., 2004) 53

Figura 44: Gráfico de MSE x Profundidade. 55

Figura 45: Gráfico de RPM x Profundidade. 57

Figura 46: Gráfico de Torque x Profundidade. 58

Figura 47: Gráfico de WOB x Profundidade. 59

Figura 48: Gráfico de Severidade de Stick-Slip x Profundidade. 61

Figura 49: Gráfico de Severidade de Whirl x Profundidade. 62

Figura 50: Gráfico de Stick-Slip e Whirl combinados para intervalo de profundidade de 4750 à 4770 metros 63

Figura 51: Gráfico de MSE para intervalo de profundidade de 4750 à 4770 metros. .. 64

Figura 52: Esquema para processo de melhoria contínua 65

Lista de Tabelas

Tabela 1: Formações rochosas, permeabilidades e porosidades. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide) 7

Tabela 2: Tipos de Brocas e seus Valores Típicos de Coeficiente de Fricção..... 46

Nomeclatura

UCS Tensão Compressiva sem Confinamento.....[psi]

CCS Tensão Compressiva com Confinamento.....[psi]

WOB Peso sobre broca..... [lbf]

MSE Energia Mecânica Específica .....[psi]

MSE_{adj} Energia Mecânica Específica ajustada.....[psi]

ROP Taxa de penetração ..... [ft / h]

DP Diferencial de Pressão .....[psi]

EFF_m Eficiência Mecânica .....[percentual]

T Torque.....[kft.lb]

RPM Rotação da Coluna.....[rpm]

μ Coeficiente de fricção por escorregamento da broca

BHA *Bottom Hole Assembly*

MWD Measurement While Drilling

LWD *Logging while drilling*

1) Introdução

A partir do século XIX, com o surgimento de práticas modernas e o processo de urbanização bastante acelerado, necessidades energéticas surgiram. Alguns exemplos dessa demanda crescente seriam a evolução das indústrias automobilística e farmacêutica e a construção de usinas termoelétricas para o suprimento das cidades. Esses fatores impulsionaram a busca por uma ampla fonte de energia e, consequentemente, o desenvolvimento de toda uma indústria em torno disso.

Com isso, há uma busca crescente por reservatórios maiores, porém, normalmente estes se situam à profundidades muito maiores e possuem acesso muito mais complexo que os reservatórios menores. Para cumprir tal requisito técnico, inúmeras tecnologias vêm sendo desenvolvidas, consagrando a indústria do petróleo como uma indústria de elevados montantes de investimento em pesquisa.

Técnicas novas de perfuração vêm sendo implementadas paralelamente com a utilização de novas tecnologias de materiais, de sensores e de comunicação principalmente. Um exemplo disso são os poços direcionais, que atualmente possuem uma enorme acurácia, mesmo após milhares de metros perfurados, e isso só foi possível devido à uma comunicação mais constante entre ferramentas utilizadas na coluna de perfuração e os equipamentos de superfície.

O monitoramento em tempo real vêm sendo responsável também pela obtenção de dados úteis no monitoramento da performance da perfuração. Nesse contexto, a Teoria da energia Mecânica Específica de Perfuração se encaixa como um parâmetro muito útil para a avaliação direta da eficiência da perfuração, dando indícios claros de quais são os mecanismos causadores de ineficiência, sejam estes a vibração da coluna ou o desgaste da broca, auxiliando na mitigação do problema e poupando o dispêndio de custos desnecessários à perfuração.

1.1) Motivação

A indústria do petróleo sempre foi conhecida por estar envolvida com grandes montantes de capital, porém, com altíssimos riscos e custos associados à exploração, desenvolvimento e produção de um reservatório. A viabilidade econômica de um projeto tão complexo envolve diversos fatores e é tão volátil quanto a flutuação do preço do barril de petróleo.

A perfuração dos poços do Pré-Sal brasileiro veio como uma motivação para a busca e a aplicação de tecnologias de ponta, visando a viabilidade econômica do desenvolvimento dos campos de petróleo.

Estes campos, por se situarem à grandes profundidades, oferecem elevados riscos e custos à perfuração. Ao longo desta são encontradas formações muito duras e abrasivas, além da necessidade de uma perfuração em um curto espaço de tempo para evitar o colapso do poço provocado pela deformação plástica da rocha salina.

A Teoria da Energia Mecânica Específica de Perfuração já é bem aceita, tanto no meio acadêmico, pela publicação de diversos artigos, quanto na indústria, pela sua utilização e desenvolvimento de ferramentas com a função da medição de dados para a sua aplicação.

Com isso, a motivação desse trabalho é a verificação dos conceitos simples que a Teoria da Energia Mecânica Específica vem a propor e a sua aplicabilidade como parâmetro útil, quando acompanhada do monitoramento de todos os parâmetros de perfuração e dos níveis de vibração em tempo real, na tomada de decisões contra qualquer problema de ineficiência da perfuração, possibilitando uma resposta rápida e, dessa forma, uma representativa economia de custos.

1.2) Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é o de realizar um estudo da Energia Mecânica Específica de Perfuração através da análise de dados reais, obtidos durante a perfuração de um poço.

Para tanto, primeiramente será objetivada a Validação do Modelo de Energia Mecânica Específica a partir do Estudo de Caso, com a consequente identificação do Mecanismo responsável pela queda na Eficiência da Perfuração em um determinado trecho do poço através da verificação da influência dos Fenômenos de Vibração na queda da Eficiência da Perfuração.

O segundo objetivo é o de ressaltar a importância, tanto de um monitoramento dos parâmetros de perfuração em tempo real, quanto da inovação tecnológica de forma cíclica a partir das lições que podem ser aprendidas após a perfuração, pela análise desses parâmetros.

1.3) Metodologia

A metodologia utilizada para a elaboração do trabalho foi a de comparar dados gráficos dos Parâmetros de Perfuração, Severidade de Vibrações e Energia Mecânica Específica, para um determinado intervalo do poço. Os dados são provenientes de ferramentas que realizaram medições durante a perfuração do poço e foram organizados originalmente em uma tabela, que se encontra em anexo.

1.4) Organização do Texto

Para o cumprimento desse objetivo este trabalho foi dividido em cinco capítulos.

Os capítulos são:

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: Contêm um resumo de áreas de conhecimento básicas e necessárias para a elaboração e compreensão do trabalho. Estas áreas englobam conhecimentos de Geologia do Petróleo e de Perfuração de Poços.

Capítulo 3 – Energia Mecânica Específica: Consiste no núcleo teórico mais importante para a elaboração do trabalho. Este capítulo visa apresentar o modelo de Energia Mecânica Específica, expondo a sua aplicação na indústria e um resumo de diversos artigos acadêmicos publicados e apresentações sobre esse assunto.

Capítulo 4 – Estudo de Caso: Após a compreensão de toda a teoria necessária para a elaboração do trabalho, têm-se finalmente a seção com o estudo de caso. Nessa seção temos o trabalho propriamente dito, com um caso real de perfuração de um poço obtido a partir do registro proveniente da indústria e a análise técnica e crítica sobre este caso. Essa seção proporciona a visualização gráfica, visando elaborar uma comparação entre eles, objetivando a validação do modelo de Energia Mecânica Específica, a Análise quanto à Eficiência da Perfuração e quanto ao Mecanismo responsável pela dissipação de Energia durante a Perfuração.

Capítulo 5 – Na conclusão temos a exposição sintetizada da análise elaborada no estudo de caso, além de uma visão sobre a importância da técnica de MSE na redução dos custos associados à perfuração e na viabilidade econômica de poços. Ainda, visa publicar uma expectativa quanto à relevância dessa técnica no desenvolvimento contínuo de melhores técnicas e tecnologias, assim como no futuro da indústria do petróleo de uma forma mais geral.

2) Fundamentação Teórica

2.1) Geologia do Petróleo

2.1.1) Geração do Petróleo

O petróleo é o resultado da ocorrência de alguns fatores ao mesmo tempo. Para que se forme o petróleo é necessário que haja matéria orgânica depositada juntamente com sedimentos, sofrendo pela atuação termodinâmica ao longo de um tempo geológico.

Esse processo termodinâmico se dá por conta do soterramento dessa matéria orgânica e sedimentar, devido às dinâmicas geológicas, aproximando-se de camadas mais interiores da crosta terrestre, onde há mais calor e maior pressão.

A Figura 1 mostra a transformação da matéria orgânica em nos diversos constituintes do petróleo, ocorrida em quatro estágios:

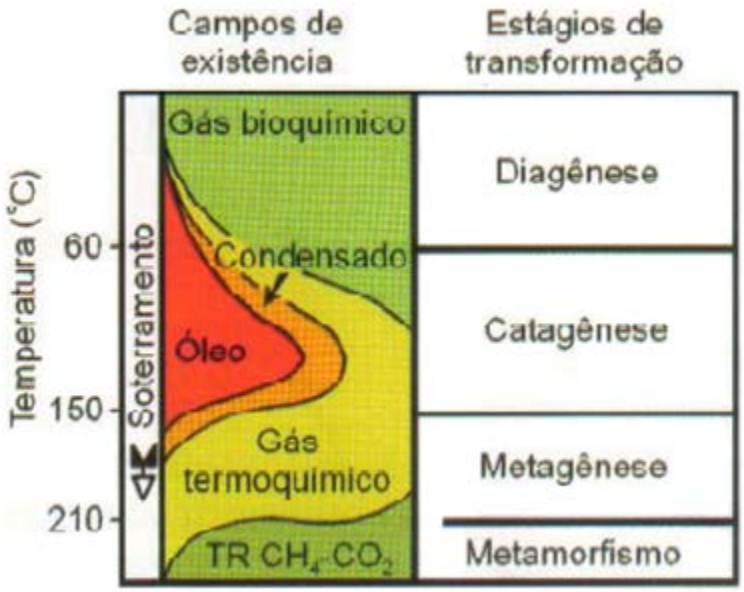


Figura 1: Estágios de Transformação da matéria orgânica em petróleo. (Fonte: THOMAS, J. E., et al.)

Uma vez que a temperatura é função da profundidade de soterramento, e este é função do tempo geológico, pela análise da imagem acima é possível perceber que há um período ideal para a ocorrência do óleo.

A esse período atribui-se o nome de janela de ocorrência do petróleo. Antes desta não há formação de hidrocarbonetos e depois desta as condições termodinâmicas são severas demais para a existância dessas longas e complexas estruturas moleculares, degradando-as principalmente em grafite, gás carbônico e alguns resíduos de metano.

2.1.2) Rochas Geradoras, Reservatórios e Selantes

O processo de soterramento de um pacote sedimentar ocorre ao longo de um período de tempo da ordem de grandeza de milhares a milhões de anos e à esse tempo de escala bem maior ao que estamos acostumados a lidar damos o nome de tempo geológico.

É importante entender a intercalação de camadas ou pacotes sedimentares como uma sucessão ocorrida de acordo com o período geológico no qual cada um desses pacotes iniciou e terminou sua formação. Um marco para o início do processo sedimentar característico de uma certa rocha sedimentar consiste na superfície inferior do pacote sedimentar, sendo esta exatamente a superfície de contato entre essa camada e a camada sedimentar inferior (mais antiga) enquanto o término de um processo sedimentar consiste na interface de contato superior dessa camada com a camada sedimentar superior (mais recente) .

Essas alternâncias de processos sedimentares não são apenas bastante complexos como também de fundamental importância na lógica da geração e disponibilização do petróleo em uma rocha reservatório.

Um processo sedimentar depende do agente atuante (vento, mar, rio, etc.) e da intensidade com o qual este ocorre e, assim, cada tipo de rocha sedimentar depende fortemente desses fatores também. Dessa forma, é possível evidenciar o processo sedimentar ocorrido, de acordo com as características que esse processo deixou na rocha gerada, principalemente por alguns fatores como o tamanho dos grãos, o grau de arredondamento e a variedade de seleção de grãos. Essas principais características primárias darão origem à características secundárias, mas de igual importância que são o grau de porosidade e o grau de permeabilidade de uma rocha.

A Figura 2 mostra os diferentes tipos de rochas a partir de seus constituintes granulares:

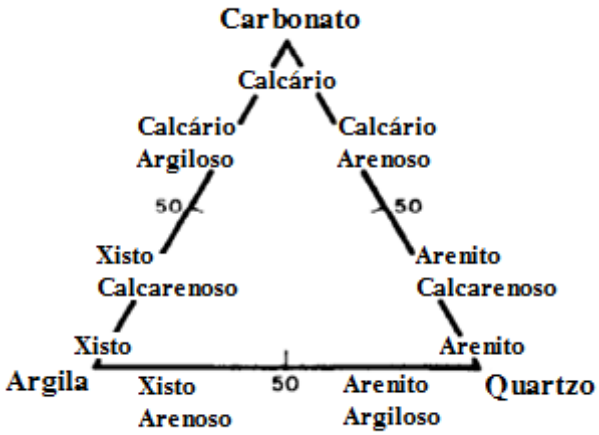


Figura 2: Tipos de rochas e composição granular. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide)

A porosidade de um determinado volume de rocha consiste na razão entre o "volume de poros" ou "volume de vazios" e o volume total da rocha, enquanto a permeabilidade está relacionada ao grau de conectividade ou de interligação entre esses poros. Portanto, podemos nos deparar com os mais diversos cenários permo-porosos de acordo com o tipo de sedimento em questão e isso depende basicamente do processo sedimentar gerador de tal rocha.

Segue abaixo a Tabela 1 com alguns exemplos de Formações Rochosas encontradas em algumas localidades dos Estados Unidos e suas Porosidades e Permeabilidades:

Tabela 1: Formações rochosas, permeabilidades e porosidades. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide)

Formações	Estado	Campo	Porosidade (%)	Permeabilidade (md)
Woodbine (Arenito)	Texas	East Texas	22.1	3390
Woodbine (Arenito)	Texas	East Texas	19.7	192
Wilcox (Arenito)	Oklahoma	Oklahoma City	16.9	677
Gloyd (Folhelho)	Texas	Rodessa	20	130
San Andres (Folhelho)	Texas	Goldsmith	12	50

Para o petróleo estar disponível para sua produção a partir da sua rocha reservatório nos tempos atuais, é necessário ter ocorrido uma sequência de processos geológicos combinados com características físico-químicas nos quais os produtos sejam rochas ideais para a geração, a migração, a acumulação e a selagem do petróleo.

A rocha geradora deve ser abundante em matéria orgânica e deve ser a primeira a ser formada, estando portanto, em uma situação ideal, abaixo da rocha de migração, da rocha de acumulação ou rocha reservatório desse sistema petrolífero.

A rocha de migração deve, além de estar situada entre a rocha geradora e a rocha reservatório, possuir ótimas características de permeabilidade e de porosidade para que o fluxo do petróleo ocorra livremente por dentro desta, assim como disponibilizar de fraturas e outros mecanismos de facilitação desse deslocamento.

Já a rocha onde ocorrerá a acumulação, conhecida como rocha reservatório, deve ser também bastante permo-porosa, de forma a ter conectividade possibilitando a chegada do óleo migrado e espaço vazio o suficiente para acumular grandes quantidades deste. Esta rocha deve estar situada acima da rocha de migração e abaixo da rocha selante.

A rocha selante recebe esse nome devido exatamente às suas características permo-porosas que, por possuir valores muito baixos, funciona de fato como um selo à interface superior do reservatório, impedindo que o fluxo de migração do petróleo que já atingira a rocha reservatório continue para camadas mais superiores.

A figura 3, abaixo, mostra como falhas estruturais funcionam no aprisionamento da migração do petróleo:

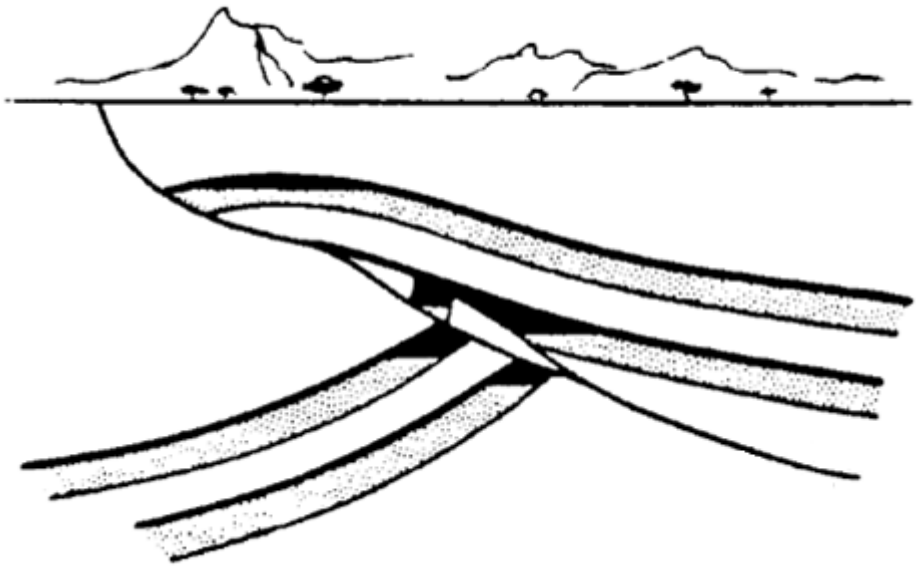


Figura 3: Falhas estruturais e camadas rochosas. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide)

2.1.3) UCS, CCS

A geologia aplicada ao petróleo não se limita, porém, apenas à geração, migração e aprisionamento deste. Uma vez que para se acessar um reservatório de petróleo tem-se de perfurar camadas de rochas, o conhecimento das propriedades físicas das rochas também é de grande auxílio no desempenho da perfuração. Como já fora explicado anteriormente, cada tipo de rocha sedimentar passa por um diferente processo de formação, a partir do processo erosivo, do agente de carreamento dos seus grãos e, dessa forma, dos consequentes graus de arredondamento e de seleção de grãos.

A Figura 4 demonstra uma escala microscópica as diferentes combinações entre compactação, cimentação e seleção dos grãos que compõe uma rocha:

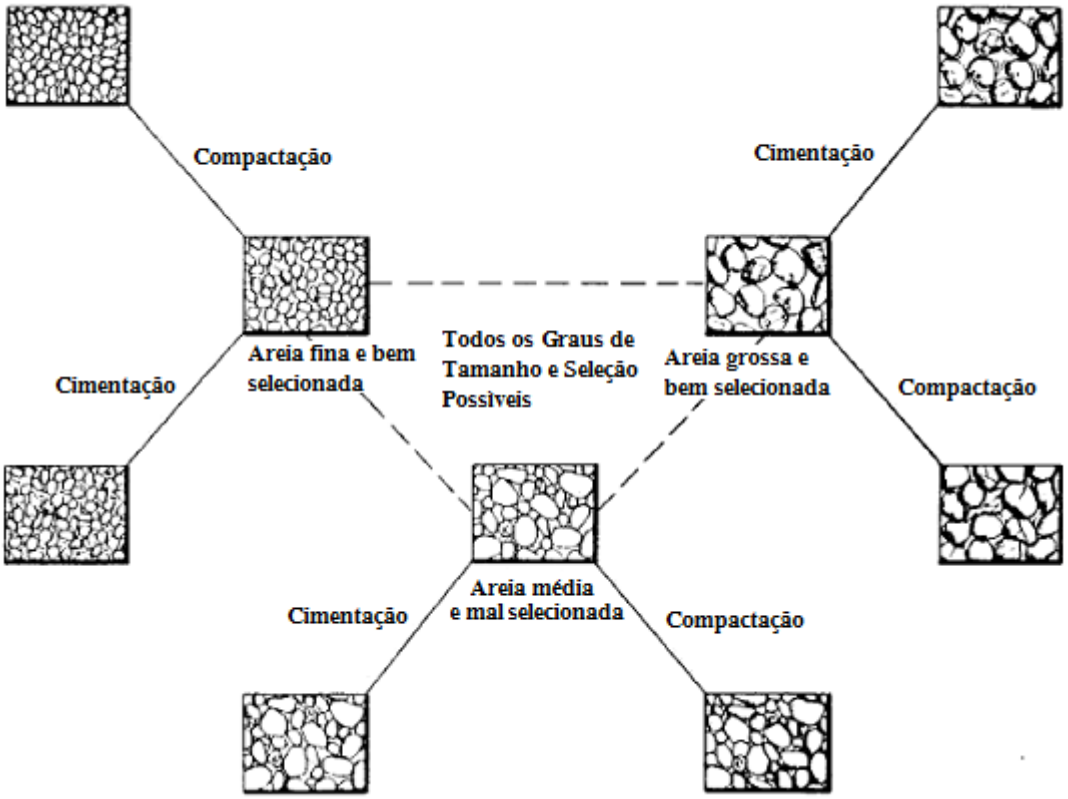


Figura 4: Graus de compactação, cimentação e seleção de grãos. (Fonte: Oil Field Familiarization Training Guide)

As características físicas mais evidentes são a porosidade e a permeabilidade da rocha. Porém, para efeito de performance de perfuração, uma outra característica física fundamental da rocha é o seu grau de dureza. Este pode ser medido de acordo com a escala Mohr, variando desde materiais bastante “macios” como o talco até o material conhecido por sua extrema dureza, o diamante.

O grau de dureza de uma rocha está, não unicamente mas, diretamente relacionado ao grau de compactação desta rocha. O grau de compactação, por sua vez, intuitivamente, depende da profundidade na qual esta rocha se encontra e, portanto, a quantidade de tensão aplicada sobre esta por todas as camadas superiores à ela. A tensão de sobrecarga aplicada sobre um volume de rocha ajuda a agregar os seus grãos e, com isso, maior será a tensão compressiva com confinamento (CCS) dessa rocha.

A Figura 5, abaixo, ilustra o grau de compactação de uma rocha, vista em escala miscroscópica, de acordo com o grau de soterramento desta:

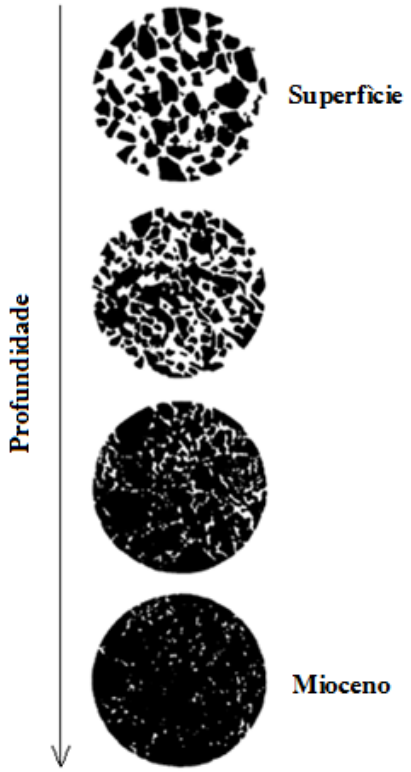


Figura 5: Grau de compactação x Profundidade da rocha. (Adaptado: Oil Field Familiarization Training Guide)

A tensão de compressão de um material é, por definição, o valor no qual, ao submeter-se um corpo de prova constituído deste material à um ensaio de compressão axial em laboratório, o corpo de prova irá falhar completamente. (Fonte: Wikipédia)

Porém, ao analisarmos uma rocha em ensaios de laboratório, esta não se encontra submetida às mesmas condições de tensões que se encontrava antes de ser extraída.

Afim de uma melhor compreensão sobre a resistência das rochas foram realizados diversos experimentos de ensaios de perfuração em laboratórios de companhias petrolíferas.

Os resultados comprovaram que sempre havia uma diferença entre os valores da tensão da rocha testada em laboratório e os valores de campo. À essa diferença foi atribuída, corretamente, a tensão adicional que a tensão de sobrecarga proporciona à rocha, limitando o número de trincas e dificultando a propagação de fissuras.

Mas, mesmo a nível industrial, a obtenção de valores de CCS não é simples e depende, no seu modelo mais próximo e aceito, da obtenção dos valores de UCS para a litologia de interesse.

Os valores de UCS podem ser obtidos através da utilização de uma ferramenta emissora e receptora de onda sonora, realizando um perfil sônico da sequência de rochas de interesse. Os dados provenientes dessa ferramenta são tratados e utilizados em um programa que calcula o UCS diretamente a partir da Equação 1.1:

$$UCS = 1.2 \times (1000 / DTs)^4 + 60.5 \times (1000 / DTs)^2 \quad (1.1)$$

Onde o UCS é a tensão compressiva sem confinamento e o DTs é o tempo de defasagem entre emissão e recepção da onda sonora.

A Figura 6 mostra os dados de UCS para um campo real, obtidos a partir do perfil sônico:

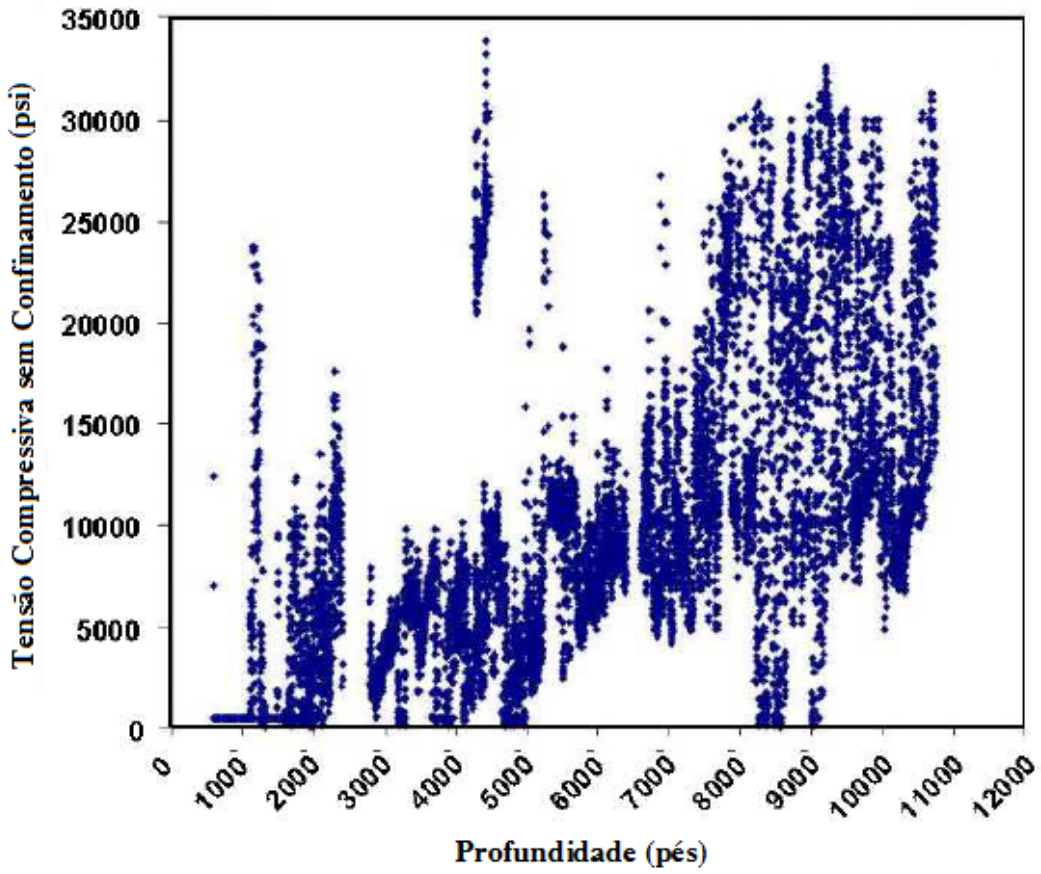


Figura 6: Gráfico de dispersão de valores de UCS x Profundidade obtido a partir do Perfil Sônico de um poço.

É importante perceber a tendência de aumento dos valores de UCS conforme ocorre o aumento da profundidade do poço.

Outro ponto importante de se notar nesse gráfico é o de que, em determinadas profundidades (aproximadamente nos 4200m, por exemplo), os valores de UCS se tornam grandes demais em comparação com os valores nos seus contornos. Isso, naturalmente, se deve à uma possível mudança de litologia da rocha que estava sendo perfurada nessa profundidade, uma vez que o UCS não é exclusivamente função da profundidade, mas também do tipo de rocha.

Enquanto o UCS pode ser obtido de forma confiável através da utilização de ferramentas, o CCS é calculado a partir de um modelo amplamente aceito na indústria. A tensão compressiva com confinamento pode ser representada pela Equação 1.2:

$$CCS = UCS + DP + (2 \times DP \times \sin FA) / (1 - \sin FA) \qquad (1.2)$$

Onde CCS é a tensão compressiva com confinamento, UCS é a tensão compressiva sem confinamento, DP é a pressão diferencial, FA é o ângulo de fricção interno da rocha.

2.2) Perfuração de Poços

Uma vez que a fase de exploração de um lote, seja onshore ou offshore, tenha como resultado a constatação de um campo de petróleo, o próximo passo no projeto de desenvolvimento desse campo passa-se a ser a perfuração de poços para acessar o seu reservatório.

A eficiência de um projeto de desenvolvimento de um reservatório de petróleo conta com diversos fatores de sucesso. Logo anteriormente à perfuração do poço propriamente dita, geólogos e engenheiros trabalham juntos na seleção das melhores coordenadas das cabeças dos poços que visarão explotar o campo, assim como as coordenadas de latitude, longitude e profundidade onde cada um desses poços deverá atingir no final da perfuração, de modo a acessar os pontos mais interessantes no ponto de vista geofísico (porosidade e permeabilidade) e de acumulação de óleo.

Já na fase de perfuração, para um projeto bem elaborado, visando a maior eficiência através do menor tempo gasto com essa etapa, engenheiros de brocas fazem a seleção dos tipos de brocas, engenheiros de perfuração fazem a escolha dos melhores parâmetros de perfuração para cada fase do poço, assim como engenheiros de fluidos de perfuração selecionam os fluidos mais adequados para as mesmas fases, a partir do conhecimento dos diferentes tipos de rochas que deverão ser atravessados.

Outro fator muito importante quando se tem em vista de fato a melhor “navegação” e, com isso, a maior eficiência no acesso às reservas é através da utilização da tecnologia de ferramentas de geonavegação, e de ferramentas de medições dos mais diversos tipos, como as ferramentas de LWD e de MWD, sempre de acordo com a lógica orçamentária do projeto como um todo.

Na perfuração de poços os parâmetros manipulados são o peso sobre a broca (WOB – Weight On Bit), a rotação da coluna (Medida em RPM) e a vazão do fluido de perfuração. Cada um desses parâmetros tem uma função específica e, para o bom funcionamento da perfuração, levando em consideração o tempo esperado para a operação, a remoção e elevação dos detritos das rochas perfuradas, a minimização dos danos aos componentes da coluna de perfuração, entre outros objetivos, esses parâmetros devem possuir intensidades bem definidas de acordo com um projeto prévio à perfuração em si.

2.2.1) Coluna de Perfuração

A coluna de perfuração é o meio físico com o qual a sonda de perfuração transfere energia da superfície para a broca e o fundo do poço. Esta é composta por drillpipes, drillcollars, ferramentas de MWD, motores de fundo, rotary steerables, etc.

O comprimento da coluna pode variar de apenas algumas centenas de metros à milhares de metros com a adição de todos esses componentes mas, ainda assim, esta deve ser capaz de resistir à todas as dinâmicas da perfuração, como o carregamento de peso, os esforços de flexão, torção, elevados níveis de vibração, torque, pressões internas e externas e ainda assim manterem suas capacidades operacionais.

O posicionamento de cada elemento integrante da coluna de perfuração segue uma lógica própria de acordo com a função de cada um desses componentes. Ferramentas de medição de dinâmicas de perfuração devem estar próximas a broca, assim como o motor de fundo, responsável pelo fornecimento e transmissão de energia rotacional à broca, por exemplo.

Portanto, normalmente há uma grande concentração desses componentes de maior tecnologia empregada (eletrônica, de automação, etc), como motores ou conjuntos de ferramentas, nas proximidades da broca, enquanto outros componentes (de menor tecnologia empregada), como os drillpipes e drillcollars por exemplo, localizados mais distantemente da broca.

À esse conjunto de ferramentas, motores e outros componentes de elevada tecnologia eletrônica e mecânica dá-se o nome de BHA.

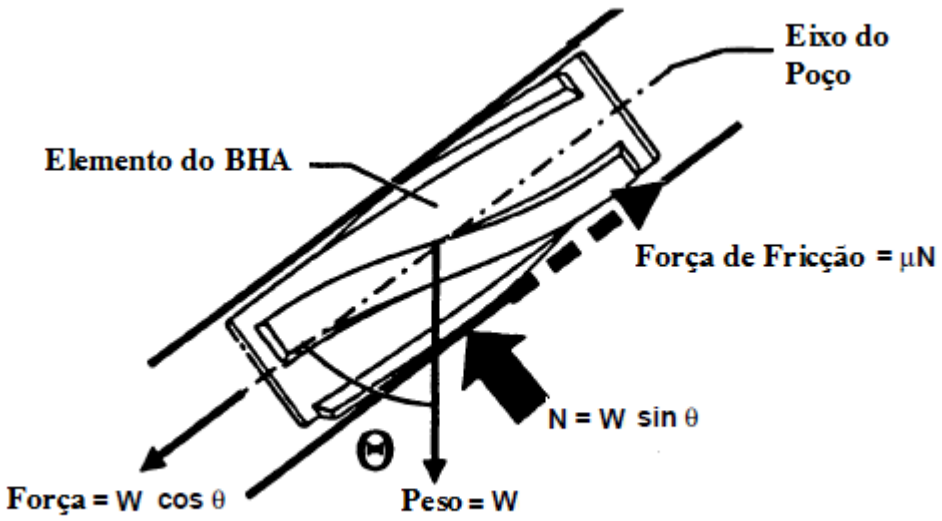


Figura 7: Componente do BHA e Forças Aplicadas (Fonte: Drilling Engineering Workbook)

É possível perceber, a partir da Figura 7, as diversas forças atuantes em um componente do BHA que está apoiado sobre a parede do poço. É importante ressaltar que as mesmas forças atuam sobre outros elementos da coluna, como drillpipes por exemplo, uma vez que estejam em contato com a parede do poço também.

Um ponto muito importante de ser observado é o de que a figura não conta com forças consequentes da rotação da coluna.

O peso do elemento do BHA aliado à inclinação do poço naquela localidade resulta em outras componentes ortogonais. Pode-se notar que a Força Normal reage à componente do peso perpendicular ao eixo do poço e que a Força de Fricção (ou Arrasto) depende apenas da magnitude da Força Normal e do Coeficiente de Fricção entre o elemento do BHA e a parede do poço.

Logo, ao extrapolarmos as forças deste elemento à coluna toda, fica bastante claro que o Arrasto da coluna de perfuração depende basicamente da combinação entre o Peso, a inclinação do poço e o Coeficiente de Fricção entre o elemento do BHA e a parede do poço.

Ou seja, quanto maior o Peso em um poço de grandes inclinações, maior será a Força Normal e consequentemente maior será o Arrasto. Com isso, maior será a perda (ou dissipação) dissipação da Energia que está sendo dada à coluna, na superfície, pela atuação da Força de Arrasto.

2.2.2) Perfuração Direcional

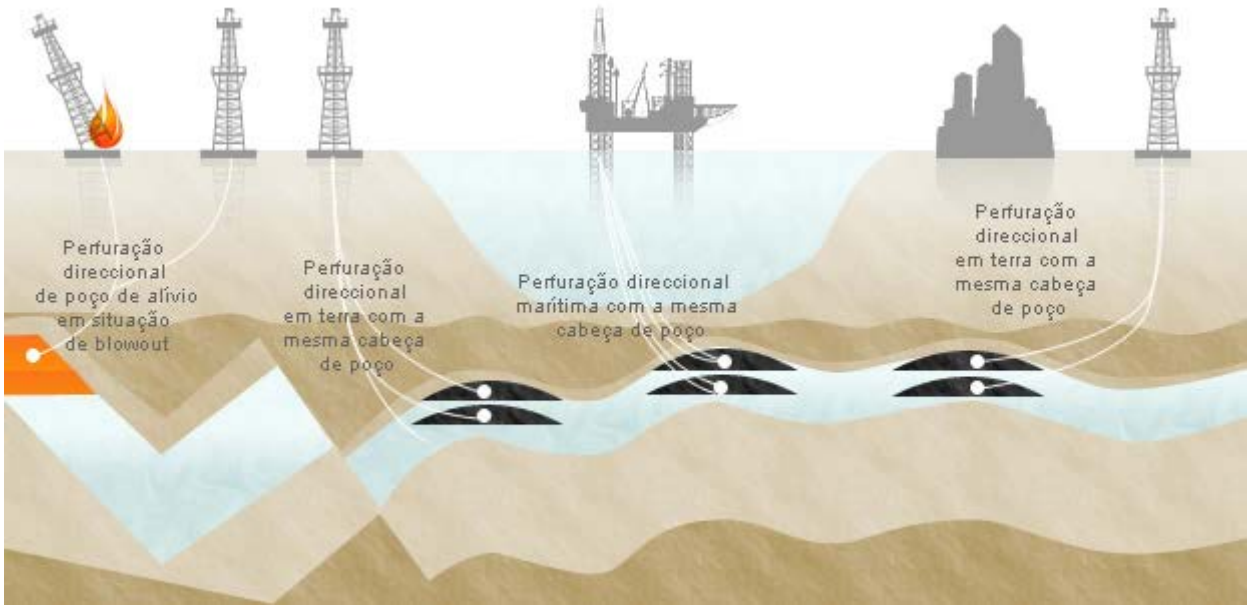


Figura 8: Poços Direcionais. (Fonte: http://www.galpenergia.com/)

Pode não ser muito intuitivo dizer um bom motivo de se utilizar um poço com uma trajetória curva em detrimento de um poço em linha reta entre a sonda e o objetivo final, no reservatório. Porém, na verdade, o direcionamento de poços talvez tenha sido um dos maiores adventos da engenharia de petróleo de todos os tempos. Isso se deve às diversas aplicações que um poço direcional pode ter (Figura 8) assim como os inúmeros benefícios que este pode proporcionar no desenvolvimento de um campo e quanto ao acesso de um reservatório.

Alguns dos motivos para se direcionar um poço:

Sidetracks (Figura 9): São poços secundários, desviados em relação a trajetória do poço original. Os sidetracks podem simplesmente ser utilizados para o desvio de uma zona obstruída, contornando-a e posteriormente retornando à trajetória inicial. Podem também ser utilizados na simples intenção de se acessar múltiplos objetivos dentro de um reservatório a partir de apenas um poço original, representando uma economia do tempo da perfuração de cada poço para cada objetivo.

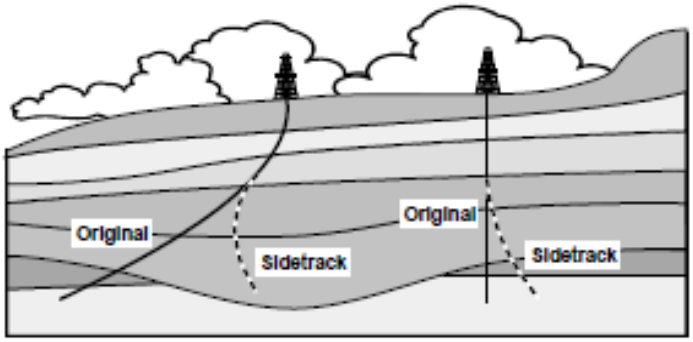


Figura 9: Sidetracks. (Oil Field Familiarization Training Guide)

Perfuração de domos salinos (Figura 10): Um poço direcional pode representar uma grande vantagem ao se contornar um domo salino ao invés de simplesmente atravessá-lo diretamente. Isso se deve basicamente à todas as características negativas que a perfuração de sal impõe.

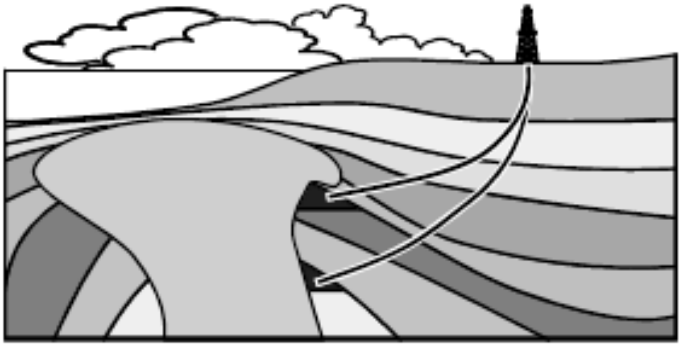


Figura 10: Domo Salino. (Oil Field Familiarization Training Guide)

Poços de alívio (Figura 11): Uma vez que um poço tenha sofrido um blowout, um poço direcional pode ser perfurado paralelamente ao poço acidentado para o bombeio de água, fluido de perfuração ou pasta de cimento objetivando estancar o vazamento e bloquear o poço com cimento.

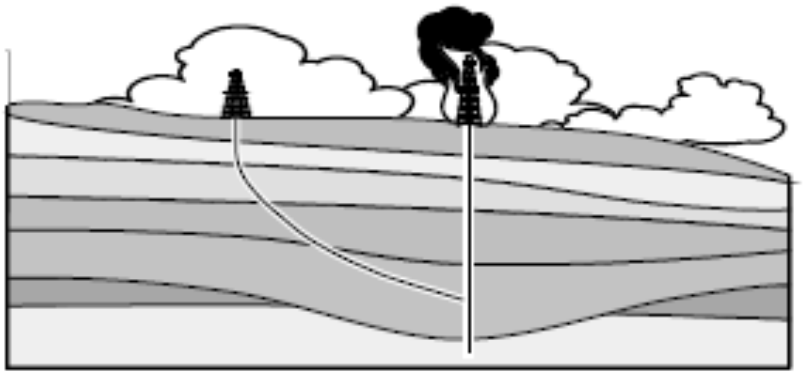


Figura 11: Blow out. (Oil Field Familiarization Training Guide)

2.2.3) Ferramentas de MWD

Uma vez que pretende-se perfurar um poço com uma trajetória específica, ainda que seja simplesmente vertical, é fundamental o acompanhamento de dados importantes como o Azimute, a Inclinação e a Profundidade do poço de forma mais contínua possível.

Essa tomada desses dados combinados é chamada de survey. As ferramentas mais antigas, quando tiravam um survey, chegavam a demorar horas ou até dias para o recolhimento dessas informações. Isso era bastante prejudicial ao conhecimento da trajetória do poço, pois, depois de todos esse tempo, frequentemente o poço já havia alterado de certa forma sua estrutura, seja pelo desmoronamento de folhelhos que absorveram água, deformação do sal ou até mesmo pelo colapso da parede.

As ferramentas de MWD (Measurement While Drilling - Figura 12) se mostram hoje fundamentais para todos esses propósitos, pois, além de medirem a Inclinação e o Azimute do poço, também fazem medições de Pressão e Temperatura e se comunicam de forma bi-direcional com a sonda de perfuração, transmitindo e recebendo dados quase em tempo real através de mecanismos de pulsos de pressão no fluido de perfuração.

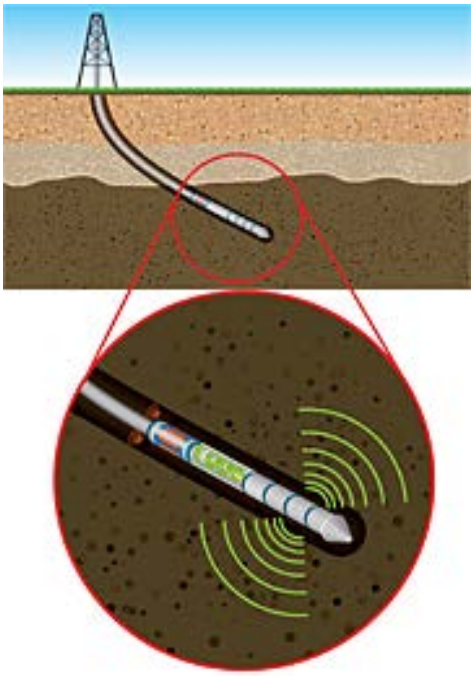


Figura 12: Ferramenta de M/LWD realizando uma medição no poço (http://www.saftbatteries.com)

Além de dados de posicionamento, há tipos de ferramentas que são responsáveis por medições de parâmetros da formação ao seu redor, como: Resistividade, Porosidade, Perfil Sônico e Raios Gamma. Nesse caso, essas ferramentas tomam o nome de ferramentas de LWD (Logging While Drilling).

É importante ressaltar que para a referência do posicionamento do poço existem dois tipos de profundidades medidas: A profundidade medida (MD – Measured Depth) e a profundidade vertical verdadeira (TVD – True Vertical Depth). A distinção entre as duas pode ser observada na Figura 13:

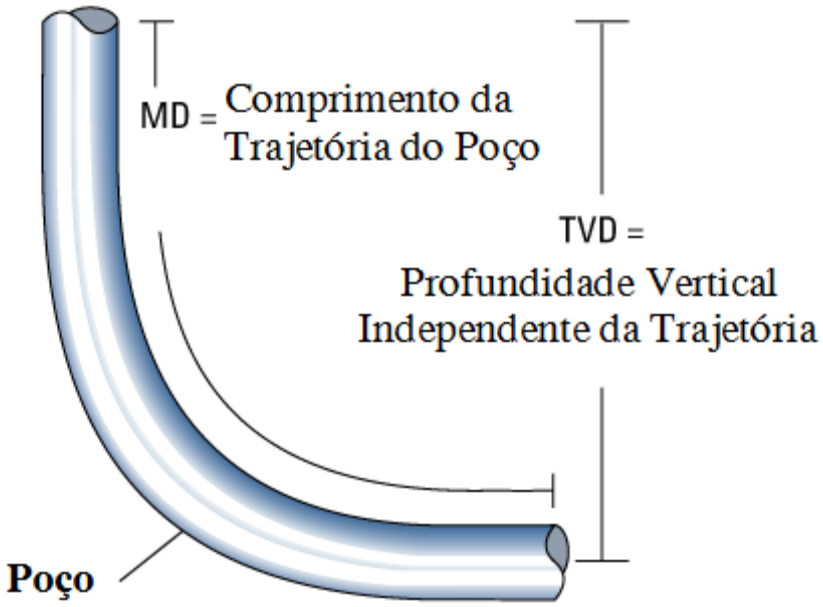


Figura 13: Relação entre MD e TVD (*www.glossary.oilfield.slb.com/)*

2.2.4) Motores

A principal função dos motores de fundo é a de incrementar a rotação resultante da broca. A Figura 14 demonstra a rotação que é induzida a partir do escoamento do fluido de perfuração pelo interior do motor.

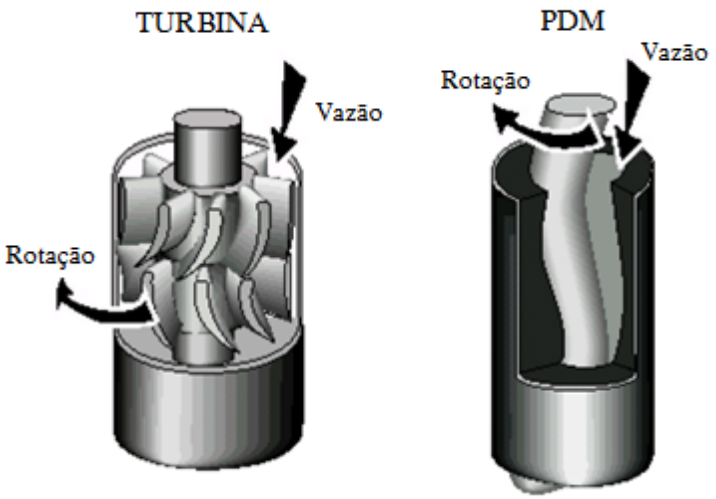


Figura 14: Motores de Fundo (Alterado: Drilling Engineering Workbook)

É possível perceber que enquanto a parte exterior consiste em um elemento preso à coluna de perfuração, a parte interior possui liberdade para rotacionar. Essa rotação é transmitida à broca de forma a se acrescentar à rotação da coluna. Tanto para as turbinas quanto para os motores operados por rotor/estator, a configuração de seus elementos é de fundamental relevância no resultado Torque/Potência. A Figura 15 mostra alguns tipos de configurações para rotor e estator.

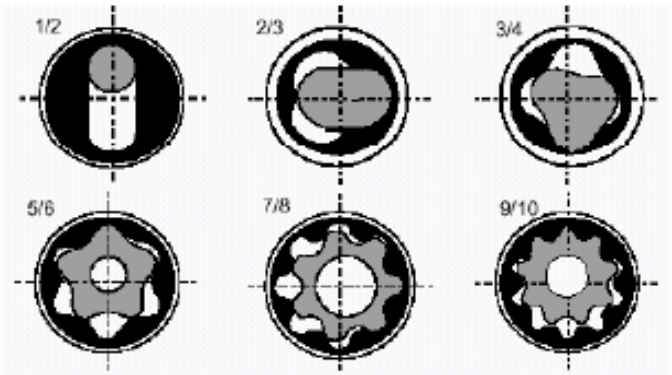


Figura 15: Configurações Rotor/Estator (Drilling Engineering Workbook)

Os motores também podem ser ajustados a partir de um mecanismo flexível para impor direcionamento ao poço durante a perfuração. Esse ajuste é feito somente em superfície uma vez que não conta com nenhum mecanismo automatizado. Portanto, uma vez flexionado de uma determinada angulação, deve-se retirar a coluna de perfuração inteira para que se possa fazer um novo ajuste, quando necessário.

A Figura 16 ilustra a perfuração direcional de um poço a partir de um motor de fundo flexionado:

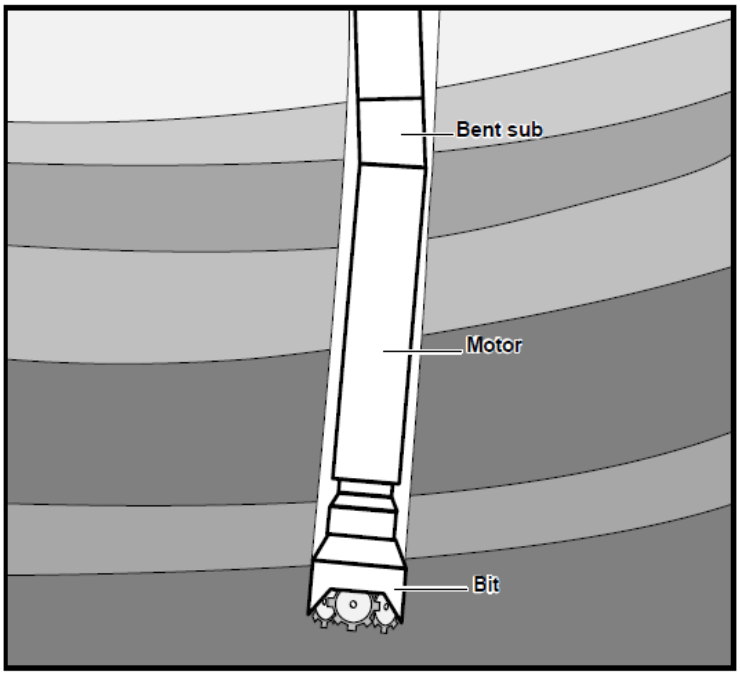


Figura 16: Motor Flexionado (Apresentação Interna Baker Hughes)

Esse mecanismo proporciona uma inclinação, em todo o conjunto a partir deste até a broca, em relação ao resto da coluna. Dessa forma, monitorando e controlando em qual sentido esse conjunto está direcionado torna-se possível o direcionamento da perfuração.

É importante ressaltar que o direcionamento de um poço pode requerer seções retas alternadas por seções curvas e, de fato, os motores possuem capacidade para ambas as funções mesmo já tendo sido ajustados em superfície para uma angulação. A Figura 17, abaixo, demonstra como essa alternância:

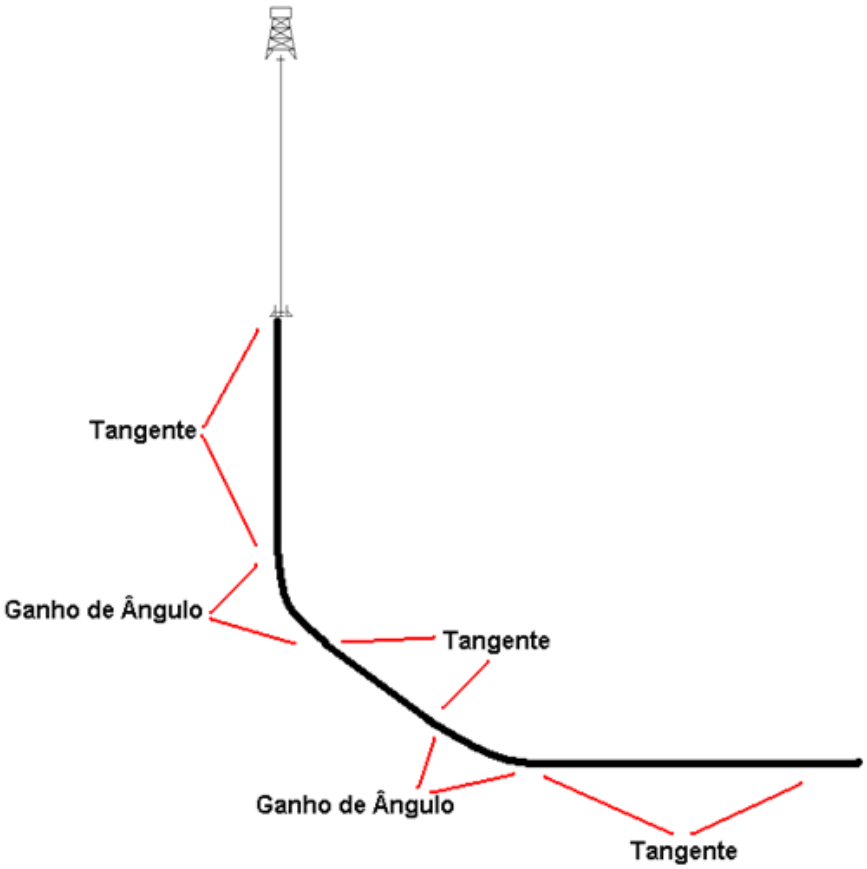


Figura 17: Alternância Seção Tangente/Ganho de Ângulo.

Essa sucessão de direcionamentos pode ser feita basicamente através da rotação da coluna como um todo (rotação da coluna e rotação do motor) para as seções tangentes e da rotação exclusiva do motor para o direcionamento de uma curvatura.

A Figura 18 ilustra esses dois modos de direcionamento com motor de fundo:

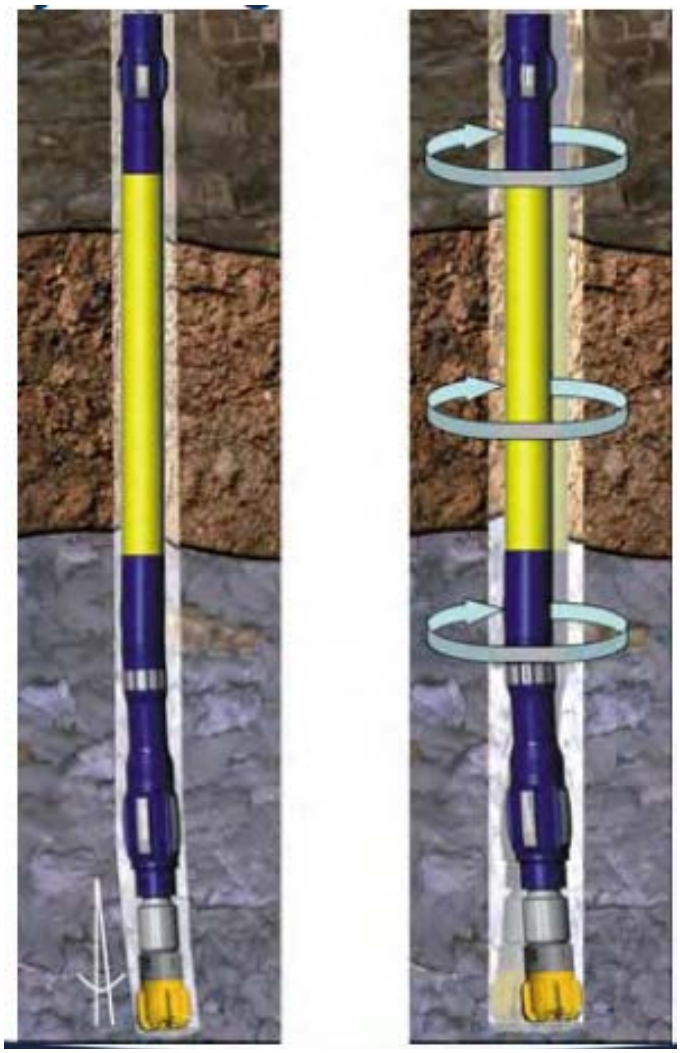


Figura 18: Modos de Direcionamento com Motor (Apresentação Interna Baker Hughes)

2.2.5) Rotary Steerables

Com a necessidade de executar a perfuração de forma mais contínua, eficiente e com melhor capacidade de direcionamento, os Rotary Steerables foram introduzidos na indústria do petróleo de forma revolucionária perante a tecnologia anterior.

Essas ferramentas consistem em um componente do BHA colocado propositalmente próximo à broca, de forma a garantir o direcionamento e operam divididas em duas partes, uma fixa e outra móvel.

Durante a perfuração, a parte interior da ferramenta permanece presa ao resto da coluna e, portanto, é rotacionada com esta, transmitindo a rotação até a broca. Enquanto isso, a parte exterior da ferramenta desliza livremente ao redor da parte interior, a partir de um mecanismo de rolamento, e se apóia na parede do poço através de três aletas metálicas móveis, operadas hidráulicamente para expandirem ou retraírem de acordo com a intenção de direcionamento.

Essas aletas são o as verdadeiras responsáveis pelo direcionamento da ferramenta, uma vez que a combinação entre expansão/retração de cada aleta provoca uma força resultante na parede do poço (Figura 19) e, consequentemente, na broca.

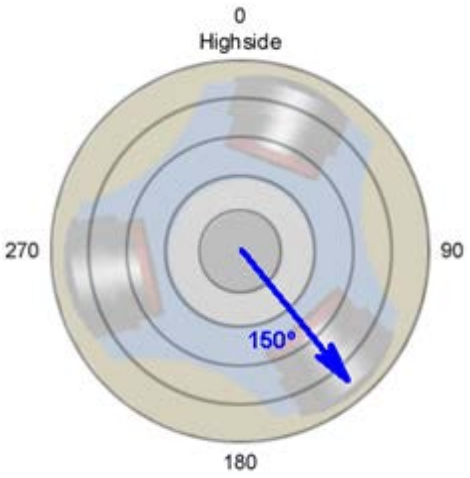


Figura 19: Secção de um Rotary Steerable e a Força Resultante Aplicada sobre a Parede do Poço (Apresentação Interna Baker Hughes)

O direcionamento, porém, não se resume apenas à direção resultante na qual o poço seguirá perfurado. Outro importante fator a ser considerado é a intensidade na qual se direciona em um determinado sentido. Isso também é determinado pela expansão/retração das aletas uma vez que para a mesma resultante pode-se ter diferentes combinações entre elas. AFigura 20 abaixo exemplifica quatro poços perfurados na mesma direção, mas com intensidades diferentes.

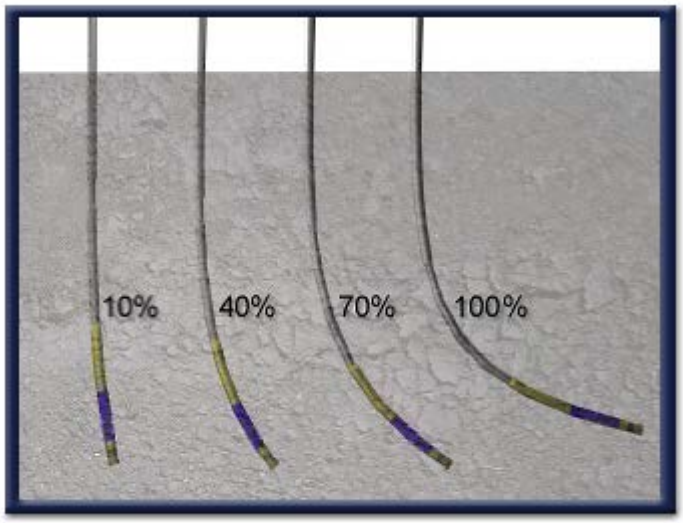


Figura 20: Build Forces com Rotary Steerable (Apresentação Interna Baker Hughes)

2.2.6) Brocas

Um dos equipamentos mais conhecidos da indústria do petróleo são as brocas. Isso certamente se deve ao papel fundamental que esses componentes tão essenciais desempenham na perfuração de poços.

As primeiras brocas a serem testadas para a perfuração de poços de petróleo datam de aproximadamente 1909. Estas consistiam em um tipo de broca bicônica na qual os cones não interagiam entre si, sendo menos eficientes e gerando recorrentes problemas na questão da auto-limpeza e na prevenção do "enceramento" (bit-balling).

A indústria do petróleo possui atualmente alguns tipos de brocas diferentes que foram desenvolvidas de forma a atender de forma eficiente aos diversos tipos litológicos encontrados em poços pelo mundo. Dentre estas, as mais relevantes são as brocas tricônicas, as brocas do tipo PDC (Polycrystalline Diamond Compact Bits) e as brocas com insertos de diamantes.

De uma forma mais geral o ponto principal de divergência entre esses tipos de brocas consiste no mecanismo de perfuração que cada uma utiliza.

Enquanto as brocas tricônicas desempenham a perfuração através de uma lógica de trituração da rocha pela aplicação de tensão sobre esta pelos seus cortadores e o seu consequente esmigalhamento, as brocas do tipo PDC atuam pelo mecanismo de raspagem da rocha através dos seus insertos de tungstênio. Logo, brocas do tipo tricônica são ótimas para a perfuração de rochas mais macias, como arenitos, enquanto que as do tipo PDC são melhores para a perfuração de rochas duras, como carbonatos.

As brocas com insertos de diamantes, ou simplesmente brocas diamantadas, também funcionam pelo mecanismo de raspagem. Porém, na maior parte dos casos, só são utilizadas quando as brocas de PDC não são consideradas aptas à esse tipo de perfuração. Isso ocorre com frequência em casos de perfuração de rochas extremamente duras, como as margas ou outras de origem vulcânica.

A introdução da utilização de três cones (Figura 21) ao invés de apenas dois se deu, pois, dessa forma, utilizando geometrias diferentes para cada cone (Figura 22), os cortadores da broca se completam, resolvendo os problemas de limpeza e de eficiência na taxa de penetração/revolução da broca, outrora pertinentes.

Figura 21: Broca Tricônica. (Apresentação Interna Baker Hughes)

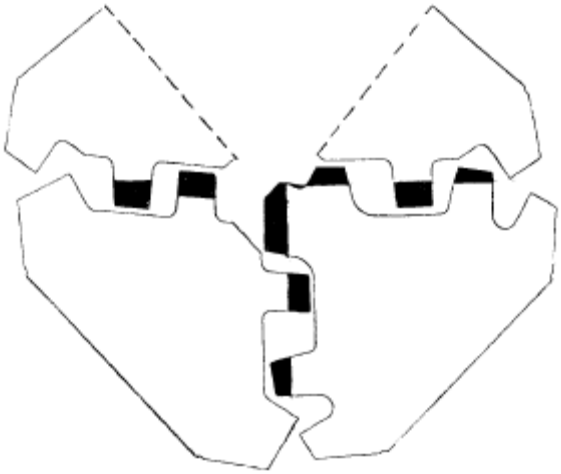


Figura 22: Encaixe entre os Cortadores dos três cones de uma Broca Tricônica. (Drilling Engineering Workbook)

Atualmente, com o advento da computação e com a utilização de simuladores e de modelos computacionais, certamente tornou-se muito mais fácil projetar esse padrão de encaixe entre os cones. As brocas modernas possuem uma geometria projetada de forma a beneficiar o escoamento do fluido de perfuração por entre seus cones e cortadores, removendo os detritos de rocha de forma muito mais eficiente e ajudando na manutenção da sua limpeza, prevenindo de forma mais eficaz o enceramento.

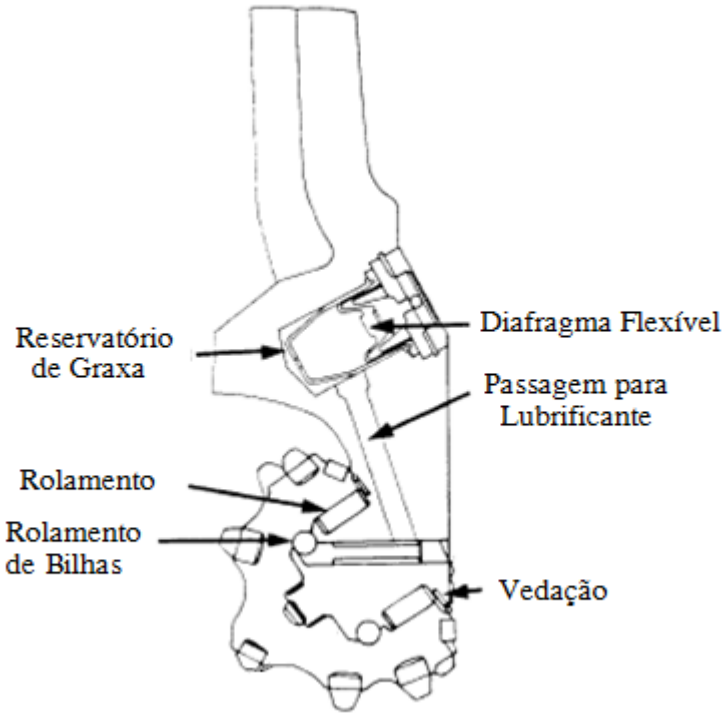


Figura 23: Visão seccional de uma Broca Tricônica. (Alterado: Drilling Engineering Workbook)

A Figura 23, acima, ilustra os principais componentes internos de uma broca tricônica moderna.

É possível perceber todo um sistema de lubrificação desenvolvido de forma a garantir um bom funcionamento do rolamento do cone.

Esse mecanismo desempenha essa função através de um reservatório de graxa, de um diafragma flexível com a função de êmbolo e de um canal para a aplicação direta e automática no rolamento.

É importante falar também sobre a estrutura dos cortadores de uma broca tricônica. Essa estrutura pode conter mais ou menos cortadores (Figura 24) de acordo com o projeto de perfuração do poço, levando em consideração as características físicas das rochas previstas no trajeto do poço.

Figura 24: Configurações de Cortadores de uma Broca Tricônica. (Drilling Engineering Workbook)

Uma vez que a tensão sobre cada um desses cortadores é basicamente a razão entre o peso aplicado sobre a broca e a área total de contato entre os cortadores e a rocha e que, para uma rocha muito dura o peso requerido pode atingir valores muito elevados, logo, para que a tensão sobre cada cortador não atinja o limite de escoamento do material (aço, liga aço-tungstênio), é desejável a distribuição desse peso sobre uma área de contato maior e, consequentemente, um número maior de cortadores. Na mesma linha de raciocínio, ao se esperar por rochas mais macias durante o percurso da perfuração pode-se dimensionar essa estrutura com menor número de cortadores.

Desde sua introdução na indústria do petróleo, em 1976, a broca de PDC (Figura 25) ganhou confiabilidade através da recorrência de bons resultados.

Possuindo um desempenho melhor que as brocas tricônicas em formações mais duras e abrasivas, a inserção das brocas de PDC garantiu o acesso à reservatórios que poderiam ser considerados até mesmo inviáveis de serem perfurados apenas com o emprego da tecnologia anterior.

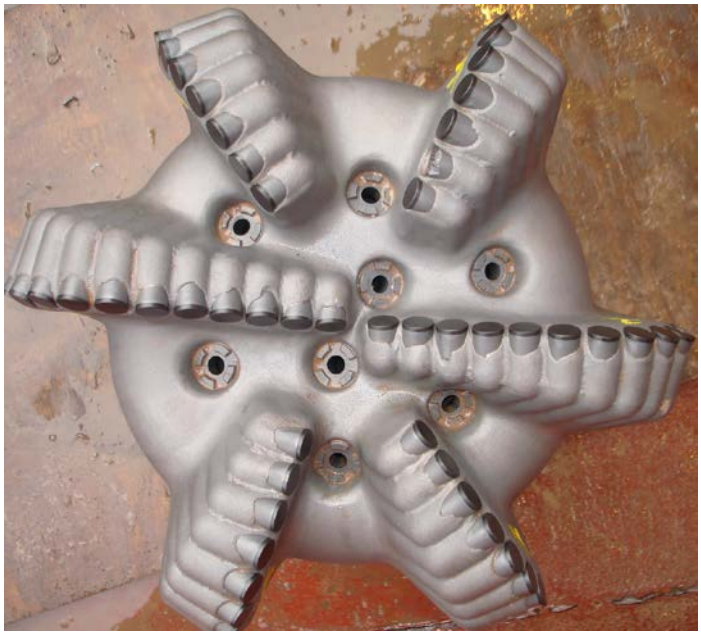


Figura 25: Visão frontal de uma Broca PDC. (Apresentação Interna Baker Hughes)

Porém, levando em conta as dinâmicas da perfuração, as brocas PDC possuem seu desempenho bastante afetado pelos fenômenos de vibração. Isso se deve ao seu mecanismo de perfuração se basear no cisalhamento da rocha.

As brocas PDC mais modernas são projetadas visando uma maior estabilidade quanto à vibração. Com isso, características como a quantidade de aletas, o tamanho dos cortadores, o arranjo hidráulicovisando a auto-limpeza (Figura 26) e o tipo de cortador foram manipuladas e tornaram as brocas PDC não só muito mais estáveis como também, consequentemente, mais duráveis e com maior taxa de penetração.

Outro fator que aumenta bastante a confiabilidade quanto à utilização da broca de PDC em detrimento à broca Tricônica é a ausência de partes móveis. Esse simples fator reduz bastante a frequência de falhas da broca.

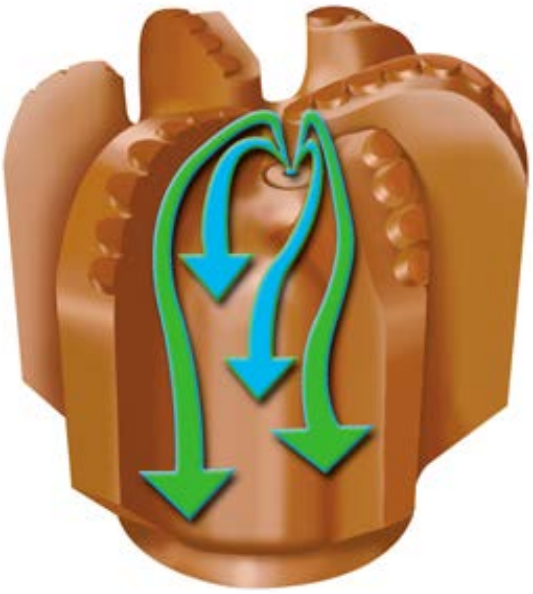


Figura 26: Design para a auto-limpeza da Broca PDC.
(Apresentação Interna Baker Hughes)

2.2.7)Vibrações

Durante a perfuração de um poço, conforme a broca atinge profundidades cada vez maiores, a coluna de perfuração se comporta como uma “corda”, presa na extremidade superior à mesa rotativa e apoiada no fundo do poço através da broca. Isso pode ser notado a partir da Figura 27:

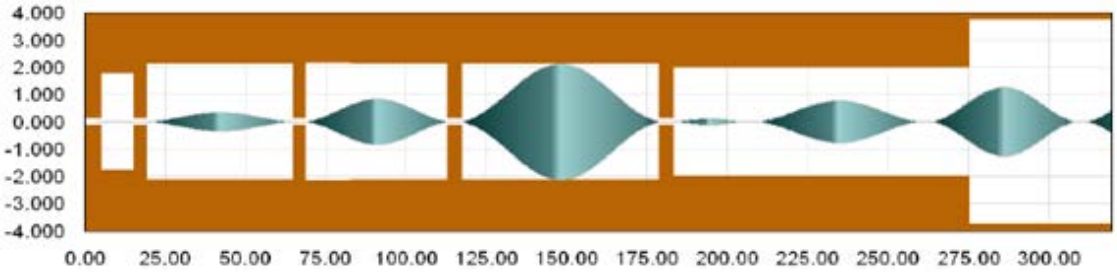


Figura 27: Vibração ao longo de uma Coluna de Perfuração. (Apresentação Interna Baker Hughes)

Com isso, conforme a energia é dada ao sistema, por meio da aplicação de peso sobre a broca e, também, da rotação da coluna, os pontos que possuem maiores graus de liberdade, por não estarem devidamente estabilizados, e os pontos mais sucetíveis geometricamente ou menos resistentes às tensões oscilantes, acabam por entrar em vibração.

Outras (não menos importantes) causa de vibrações são a interação da broca com o fundo do poço, o grau de agitação do motor de fundo, a ação de reciprocação das bombas de fluido de perfuração e a própria interação da coluna de perfuração com a parede do poço.

É importante ressaltar que qualquer objeto possui uma frequência natural e isso não ocorre de forma diferente para uma coluna de perfuração. Composta por diversos componentes, desde drill-pipes, drill-collars à ferramentas de MWD, esta possui uma frequência natural variável ao longo de seu comprimento. Quando a coluna de perfuração, em algum ponto de sua extensão, é excitada em sua frequência natural ocorre um outro fenômeno também bastante conhecido, a ressonância.

A ressonância causa amplitudes de vibração que crescem rapidamente ao longo de um curto intervalo de tempo. A ressonância é algo totalmente indesejado na perfuração de um poço, pois, intensifica a severidade das vibrações, causando danos muito grandes à qualquer componentes da coluna.

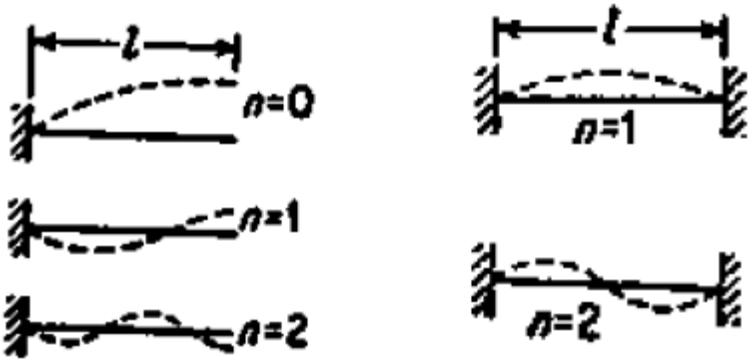


Figura 28: Vibração e pontos de nó. (Apresentação Interna Baker Hughes)

Por isso, é de fundamental importância, em um projeto de perfuração, a análise dos pontos de estabilidade da coluna. Esses pontos são conhecidos como “nós” e neles as vibrações se encontram “confinadas” e, portanto, a deformação devido à vibração é nula. Esses nós podem ser percebidos na Figura 28.

Essa análise visa localizar ou realocar os pontos de “nós” da coluna de perfuração por meio de softwares que modelam computacionalmente as características geométricas e físicas da coluna. Ao ser detectado um ponto crítico, dados os parâmetros de perfuração almejados, pode-se então solucionar esse problema através da aplicação de estabilizadores.

Os tipos de vibrações que podem ser experimentados em uma coluna de perfuração são, a partir da Figura 29: (1) o “Bit Bounce”; (2) o “Whirl” e; (3) o “Stick-Slip”.

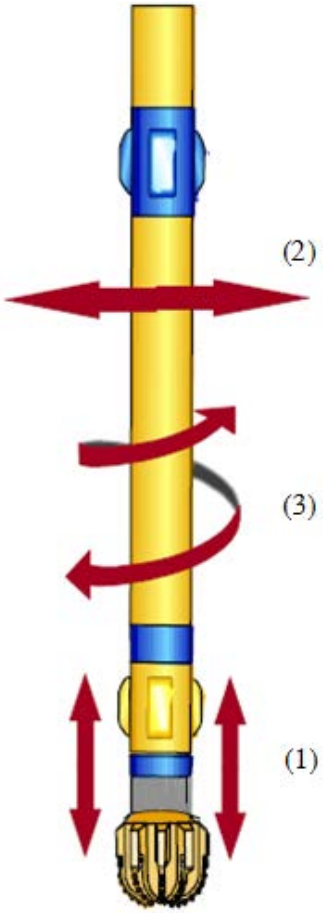


Figura 29: BHA com três tipos de vibrações (Apresentação Interna Baker Hughes)

(1) Bit Bounce:

Esse tipo de vibração consiste em uma oscilação axial na qual a coluna “sobe e desce” de forma alternada, batendo no fundo do poço, provocando danos aos cortadores da broca.

(2) Whirl:

Nesse caso a coluna oscila lateralmente, batendo nas paredes do poço e danificando, principalmente, os componentes do BHA, sendo estas as ferramentas de MWD assim como as ferramentas de direcionamento do poço e outras.

O Whirl provoca também uma perfuração ineficiente por conta da broca não estar girando em torno de seu centro geométrico.

A Figura 30, abaixo, mostra o efeito que o fenômeno vibracional de whirl causa no fundo do poço.

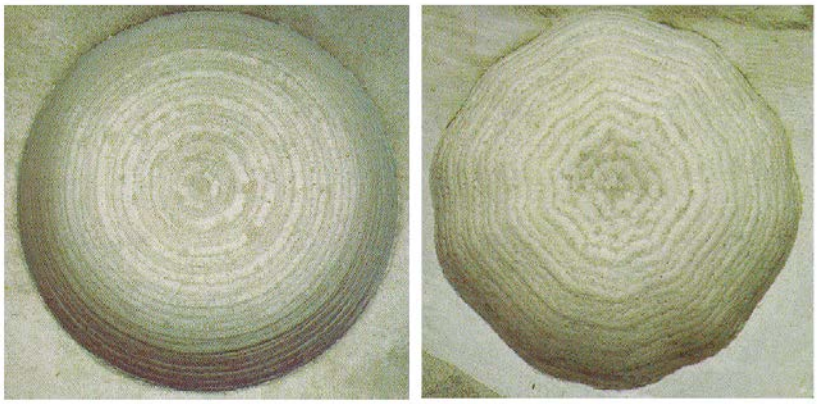


Figura 30: Marca feita por Whirl (Apresentação Interna Baker Hughes)

(3) Stick-Slip:

Este é, sem dúvidas, o tipo de vibração mais danoso à coluna de perfuração e seus componentes e, com isso, é evitado à todo custo durante a perfuração de um poço. Esse fenômeno vibracional consiste na vibração torsional da coluna de perfuração e pode atingir uma velocidade de propagação de até 2900 m/s. Contudo, sua ocorrência, por ser provocada pela combinação de parâmetros de perfuração, pode ser prevista pela utilização de softwares.

Um exemplo dessa simulação pode ser vista na Figura 31, no qual com elevado peso e à baixas velocidades rotacionais da coluna há ocorrência de stick-slip.

Figura 31: Zona de Estabilidade Vibracional (Apresentação Interna Baker Hughes)

O gráfico também nos mostra a ocorrência do fenômeno de whirl, à um baixo peso sobre a broca combinado à elevadas velocidades rotacionais da coluna.

Porém, percebe-se, também, uma zona na qual nenhum desses dois tipos de vibração ocorrem e, por isso, atribui-se à essa região de combinações de peso e rotação o nome de Zona de Estabilidade. É de fundamental importância, durante uma operação de perfuração, a definição da Zona de Estabilidade da coluna utilizada, pois, esse conhecimento torna a perfuração muito mais segura e eficiente, uma vez que pode-se utilizar sempre combinações de peso e rotação contidos nessa região.

É importante salientar que cada coluna, por empregar componentes diferentes em localizações diferentes na coluna, possui regiões de Stick-Slip, Whirl e Zonas de Estabilidade únicas.

As vibrações de uma coluna nunca ocorrem de forma tão padronizada em relação à uma amplitude sempre constante ou um período facilmente determinável (Figura 32).

Isso se deve, além das dimensões variáveis dos componentes que constituem a coluna, às dinâmicas de perfuração extremamente inconstantes devido à contínua oscilação dos valores dos parâmetros de perfuração, assim como das consequentes reações elásticas da coluna.

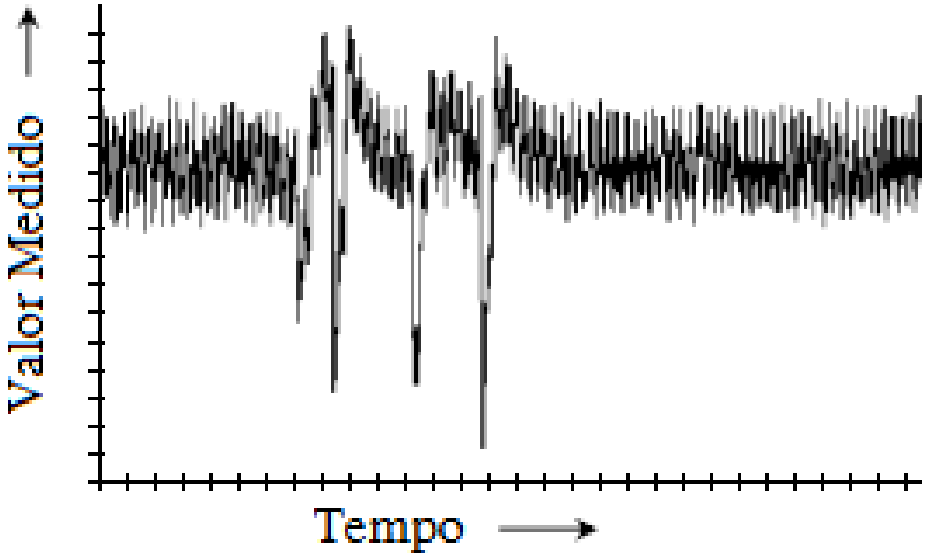


Figura 32: Vibração medida na coluna ao longo do tempo (Apresentação Interna Baker Hughes)

Com isso, torna-se não-trivial a determinação dos tipos de vibrações que ocorrem na coluna em tempo real. Porém, graças aos modelos numéricos mais modernos e também da utilização de processadores para o tratamento desses tipos de dados, é possível converter um sinal complexo como o da figura acima em vários componentes desse sinal (Figura 33).

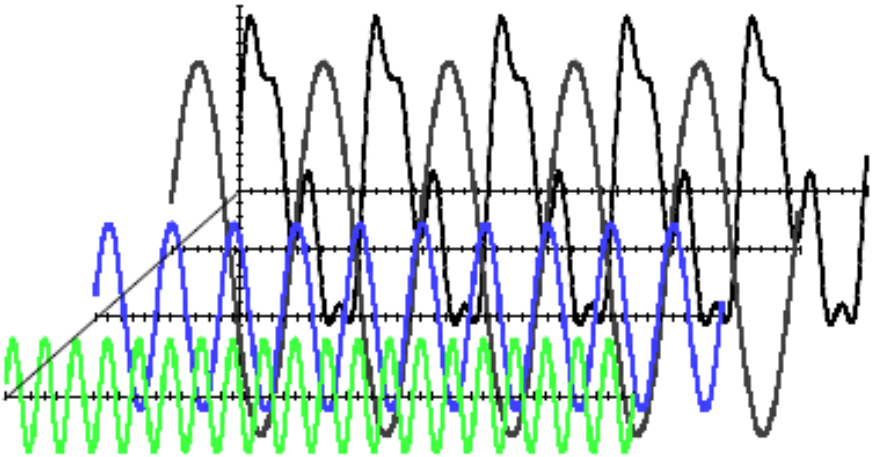


Figura 33: Desmembramento de um sinal oscilatório complexo em outras ondas menos complexas (Apresentação Interna Baker Hughes)

Portanto, isolando-se cada componente integrante desse sinal, torna-se possível determinar quais tipos de vibrações estão ocorrendo na coluna de perfuração e, desse modo, pode-se tomar medidas remediadoras para o controle desse fenômeno tão danoso aos componentes da coluna.

3) Energia Mecânica Específica de Perfuração

A performance de uma perfuração é difícil de ser determinada de forma única e objetiva. O conceito de energia mecânica específica foi introduzido por Teale, em 1964, visando quantificar a eficiência da perfuração através da junção de princípios de conservação de energia, de características da broca e de características físicas das rochas.

Nesse modelo, a idéia principal é a de que um determinado volume de um determinado tipo de rocha requer uma determinável quantidade de energia para ser destruído. Ou seja, em uma situação hipotética, para um conjunto de amostras de um mesmo tipo de rocha, perfeitamente homogêneas e de mesmo volume, o tempo para serem totalmente destruídas, quando submetidas à uma mesma energia de perfuração, deve ser o mesmo.

Segundo Teale, a perfuração de uma rocha consiste na combinação de dois mecanismos principais: A Intrusão, na qual os cortadores da broca são contínuamente pressionados contra a rocha para criar pontos com altas concentrações de tensão e a consequente ruptura do material; e o Corte, no qual é dado à broca um movimento lateral para quebrar os fragmentos da rocha.

Esses dois mecanismos de perfuração atuam de forma virtualmente simultânea e, enquanto o mecanismo de Intrusão é beneficiado pelo Peso sobre a Broca, o mecanismo de Corte o é pela Rotação desta, conforme pode ser visto na Figura 34:

Figura 34: Broca e Parâmetros de Perfuração (Apresentação Interna Baker Hughes)

Por causa da maioria dos dados de campo serem dados na forma de medições de superfície de Peso sobre a Broca, Rotação da Coluna e Taxa de Penetração, um coeficiente específico de fricção rotacional (μ) para cada tipo de broca foi introduzido para expressar o Torque como uma função do Peso sobre a Broca (Caicedo, Hector U. 2005).

$$\mu = 36 \times \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{D} \times \mathrm{WOB}} \tag{3.1}$$

Onde T é o Torque (pé-lbf), D é o Diâmetro da Broca (pol) e WOB é o Peso sobre a Broca (lbf).

Com isso, pode-se introduzir a Equação de Teale para a Energia Mecânica Específica:

$$MSE = \frac{WOB}{A} + \frac{120 \times \pi \times RPM \times T}{A \times ROP} \tag{3.2}$$

Onde MSE é a Energia Mecânica Específica (psi), RPM é a Rotação da Coluna (rpm), ROP é a Taxa de Penetração (pé/hora) e A é a Área do Poço.

Essa relação é obtida a partir da derivação do trabalho, realizado para escavar um determinado volume de rocha, pelo volume escavado. Ainda, pode-se separar a equação 3.2 em dois termos, um em relação ao trabalho Intrusivo e o outro em relação ao trabalho rotativo:

$$MSE_t = \frac{WOB}{A} \tag{3.3}$$

$$MSE_r = \frac{120 \times \pi \times RPM \times T}{A \times ROP} \tag{3.4}$$

Onde MSEt é a Energia Intrusiva e MSEr é a Energia Rotativa.

Com o intuito de demonstrar graficamente essa relação entre a Energia Mecânica Específica com a Rotação da Coluna, segue a Figura 35:

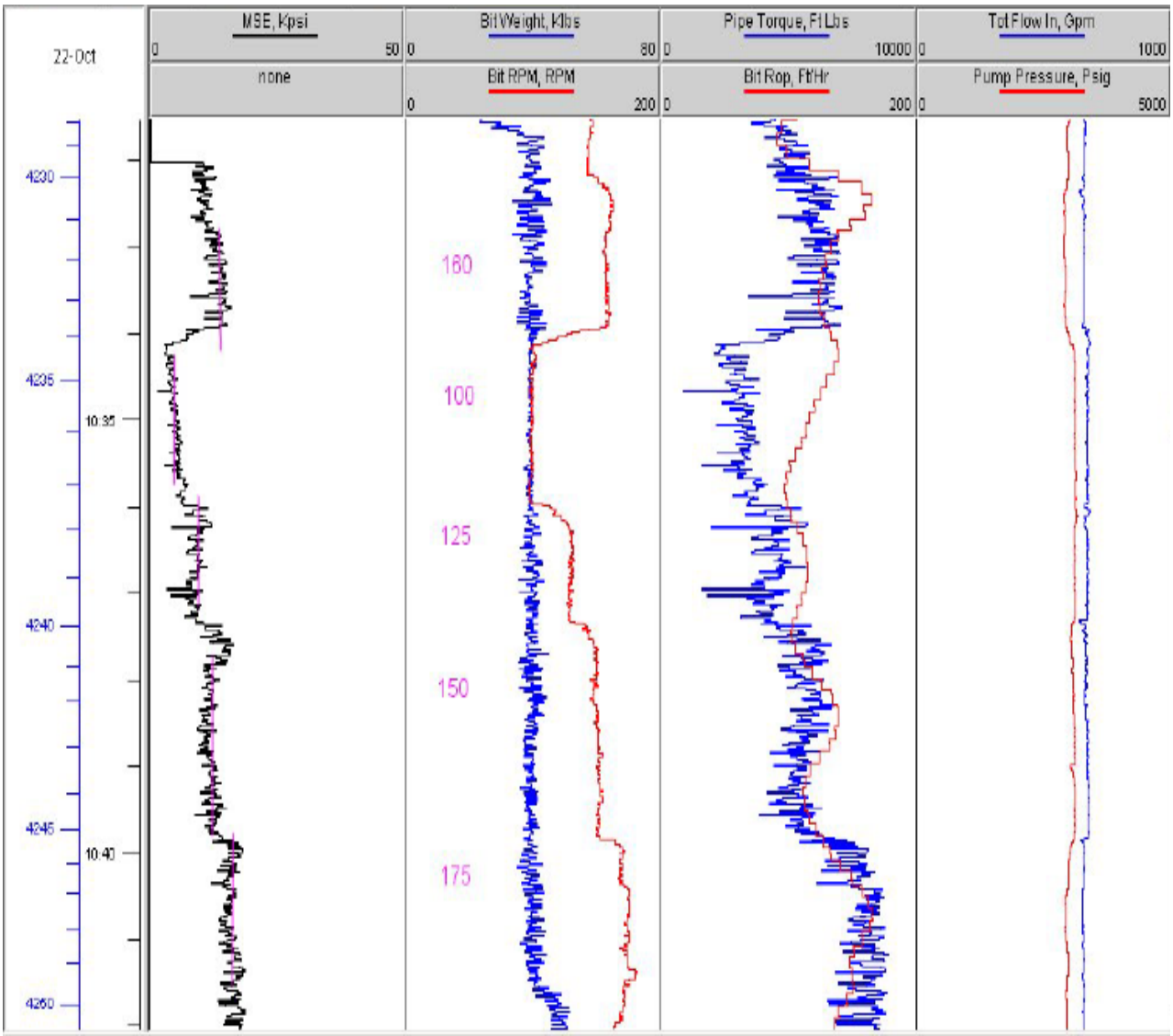


Figura 35: Demonstração da Relação MSE x RPM. (Fonte: Koederitz W.L., 2005)

O que pode ser notado a partir de uma análise do gráfico exposto na Figura 35 é que, com a queda dos valores da curva referente à rotação da broca, há uma queda no valor da Energia Mecânica Específica. Isso pode ser facilmente compreendido a partir da relação direta que a Energia Específica tem com a Rotação, evidenciada na Equação 3.2.

Teale também introduziu o conceito de Energia Mecânica Específica Mínima e de Eficiência Mecânica Máxima. A Eficiência Mecânica para qualquer tipo de broca é dada por:

$$EFF_m = \frac{MSE_{\min}}{MSE} \times 100 \tag{3.3}$$

Onde MSE_{min} é a Energia Mecânica Específica Mínima.

A Energia Mínima é atingida quando a Energia Específica é aproximadamente igual à Tensão Compressiva com Confinamento da rocha (CCS):

$$MSE_{\min} = CCS \tag{3.4}$$

Logo, a partir da Esquação 3.4, a Equação 3.3 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$EFF_m = \frac{CCS}{MSE} \times 100 \tag{3.5}$$

Com isso, combinando as Equação 3.2 com a Equação 3.5 pode-se expressar, o Torque para um tipo particular de broca, perfurando à uma dada ROP, em um determinado tipo de rocha (CCS):

$$T = \left(\frac{CCS}{EFF_m} - \frac{4 \times WOB}{\pi \times D^2} \right) \times \left(\frac{D^2 \times ROP}{480 \times RPM} \right) \tag{3.5}$$

No gráfico da Figura 36 pode-se notar a relação que o Peso sobre a Broca provoca na Energia Mecânica Específica. Com valores próximos de 20 klbs para o Peso sobre a Broca, o DOC se torna insuficiente para manter uma boa Eficiência Mecânica da Broca, resultando em um aumento da MSE.

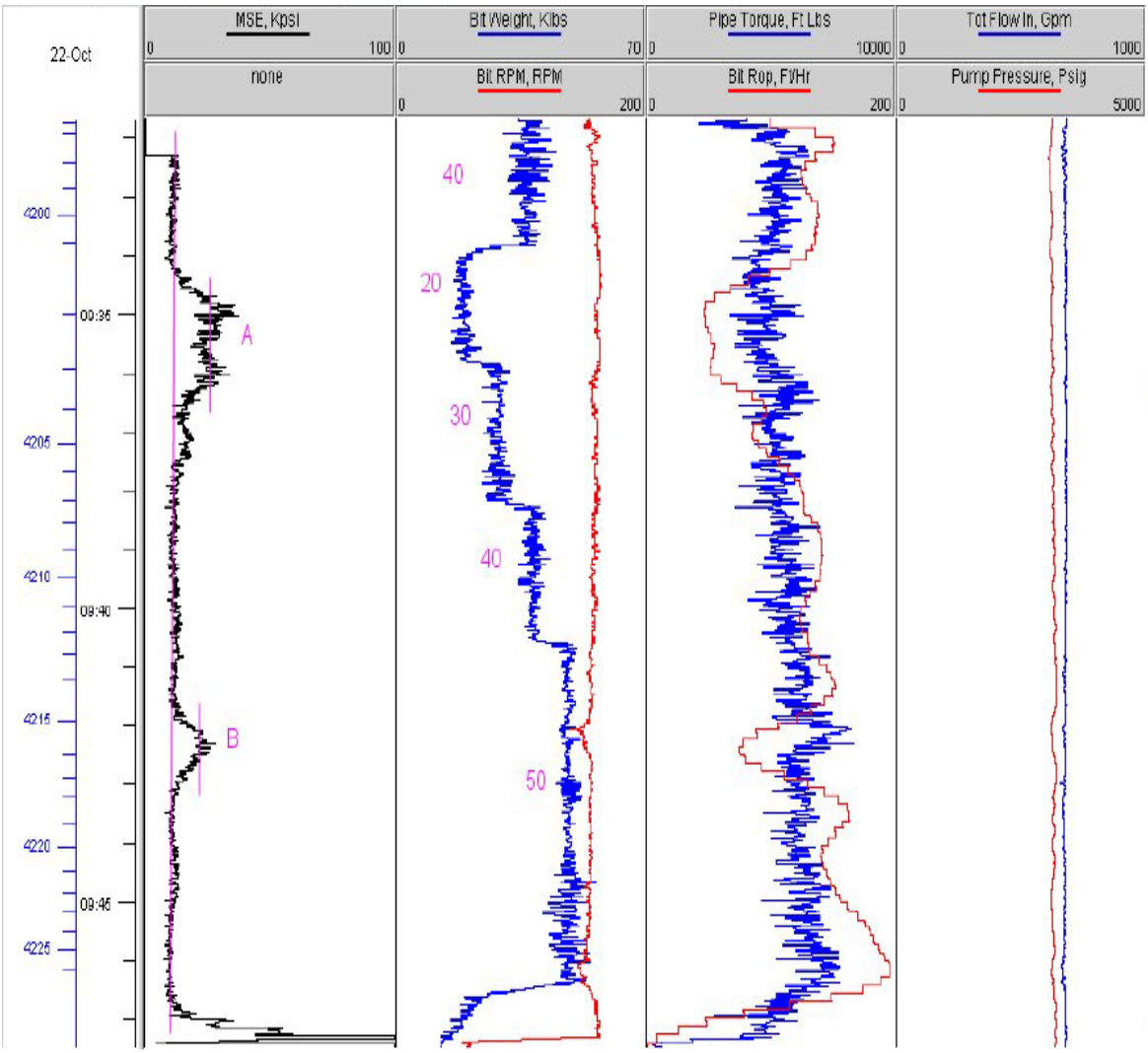


Figura 36: Demonstração da Relação MSE x WOB. (Fonte: Koederitz W.L., 2005)

A partir da Equação de Teale para a Energia Mecânica Específica, pode-se solucionar esta para a ROP, substituindo a MSE em termos da Eficiência Mecânica e o Torque em função do Peso sobre a Broca. Com isso, chega-se a:

$$ROP = \frac{13.33 \times \mu \times RPM}{D \times \left(\frac{CCS}{EFF_m \times WOB} - \frac{1}{A} \right)} \tag{3.6}$$

A importância dessa relação é bastante simples: pode-se realizar uma previsão da ROP de um determinado trecho do poço combinando parâmetros de perfuração (WOB e RPM), dados da Broca (Diâmetro, Coeficiente de Fricção e Eficiência Mecânica e a Área do Poço) e dados da Rocha (CCS, obtido a partir da perfilagem, poços de correlação, etc.).

Essa previsão da ROP é útil pois, logicamente, o Tempo de Perfuração Esperado para o poço é o somatório do produto entre a ROP e a Espessura para cada camada de rocha, de acordo com a equação 3.7, abaixo:

$$Tempo_Perfuração = \sum_{i=1}^{n} ROP_i \times Espessura_i \tag{3.7}$$

A Tabela 2 e a Figura 37 mostram, respectivamente, valores característicos de Coeficiente de Fricção (μ) e de Eficiência Mecânica (EFF_m) para os diversos tipos de brocas:

Tabela 2: Tipos de Brocas e seus Valores Típicos de Coeficiente de Fricção

Tipo de Broca	Valores Típicos de μ
Tricônica de Aço	0.15 - 0.26
Insertos de Tungstênio	0.12 - 0.26
PDC	0.6 - 2.0
Impregnada	0.3 - 0.6

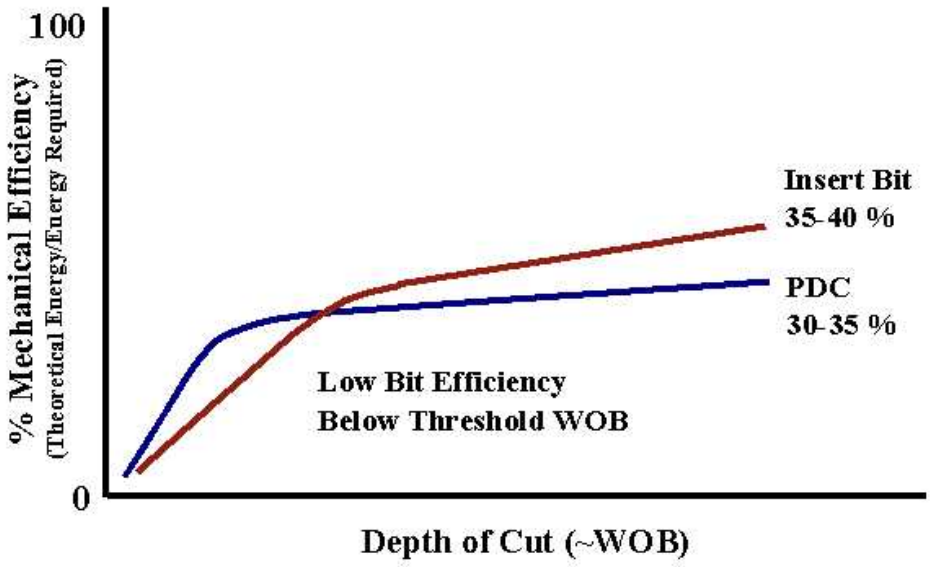


Figura 37: Eficiência Mecânica x Depth of Cut (Dupriest et al., 2004)

Esses valores são obtidos de diversos tipos de testes realizados a partir de um aparatos experimentais em escala real, tanto no campo Figura 37 quanto em laboratórios Figura 39:

Figura 38: Sonda de Perfuração para Ensaio de Drill off Test (Fonte: Radford, 2009)

Figura 39: Aparato Experimental para Drill off Test (www.bakerhughes.com)

Esses testes experimentais são úteis também para a obtenção de parâmetros ótimos para cada tipo de broca. O teste mais comumente aceito e realizado é o “Drill off Test”.

O Drill off Test consiste em um teste de aplicação de conceitos de Energia Mecânica Específica para verificar o desempenho da broca.

Neste teste o objetivo é simplesmente obter-se uma dispersão de valores para a ROP dos diversos valores de Peso sobre a Broca.

A metodologia que este teste utiliza é a de aplicar um elevado Peso sobre a Broca, travar o topo da coluna para impedir o seu avanço enquanto circula-se fluido e a rotaciona-se a coluna. Com isso, conforme a broca perfura o corpo de prova rochoso, a coluna de perfuração simplesmente se alonga enquanto que o Peso sobre a Broca declina.

O gráfico abaixo demonstra três Drill off Tests, cada um com uma Velocidade de Rotação da Coluna diferente, realizados com uma broca de Insertos de Tungstênio.

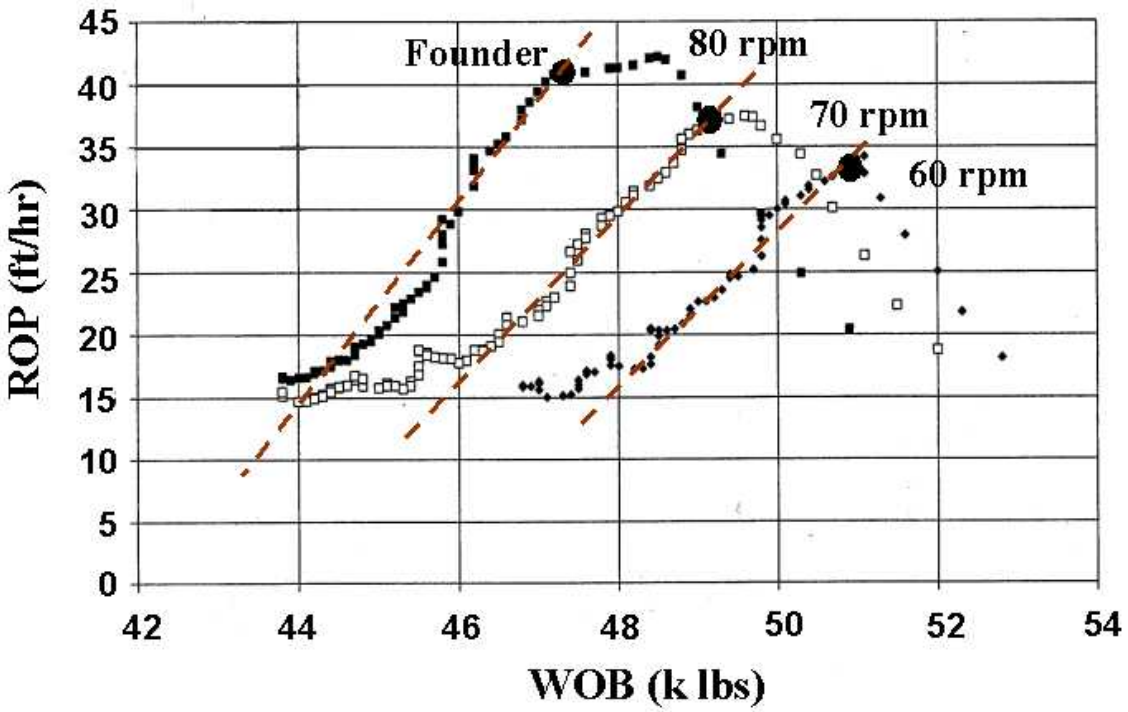


Figura 40: Resultados Drill off Test (Dupriest et al., 2004)

É importante perceber que há um ponto onde a ROP possui valor máximo em relação aos outros pontos da dispersão. Esse ponto é chamado de “Founder Point” e é o ponto onde a ROP é maximizada para uma determinada broca, rodando à uma determinada Velocidade de Rotação e para todos os valores de Peso possíveis.

Apesar de, após diversas combinações entre Velocidade de Rotação e Peso, além do conhecimento do Founder Point, o acompanhamento em tempo real da tendência da Energia Mecânica Específica ao longo da perfuração de um poço ainda é a forma mais objetiva de se obter uma avaliação mais precisa quanto à eficiência do sistema de perfuração como um todo.

Isso se deve, pois, há uma enorme quantidade de fatores que podem influenciar o desempenho da perfuração. Como já fora citado anteriormente, os fenômenos de vibração, por exemplo, são grandes responsáveis pela dissipação da Energia Mecânica que é dada ao sistema a partir da Superfície.

Brocas tendem a transferir apenas uma parte da Energia que lhes é dada para o processo de destruição da rocha.

A Figura 41, abaixo, demonstra um clássico exemplo de curva obtida a partir de um Drilloff Test:

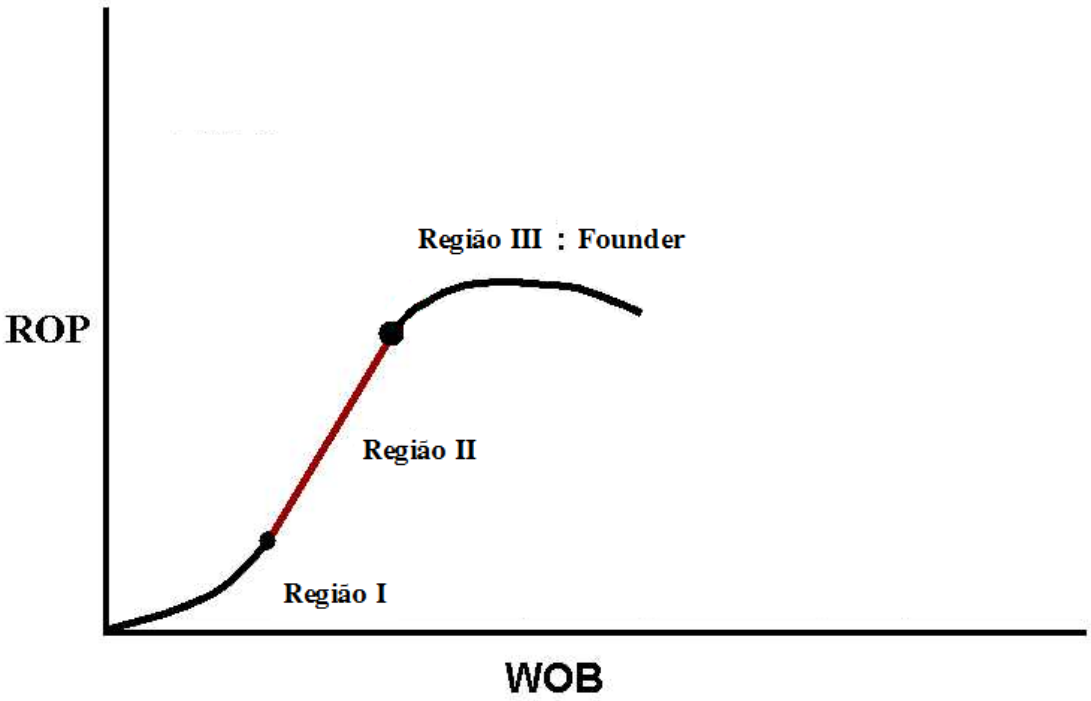


Figura 41: Curva Típica de um Drilloff Test (Alterado: Dupriest et al., 2005)

Região I: Devido aos baixos valores de WOB, a DOC se encontra insuficiente para um bom rendimento da broca. Por isso, nessa região, a broca possui baixa Eficiência Mecânica. Isso mostra a importância de manter a broca com a maior interação possível com a formação, através da aplicação de peso.

Região II: A relação entre a aplicação de peso e o ganho na ROP é diretamente proporcional nessa região da curva do drilloff test. A angulação desse trecho linear é o próprio coeficiente de fricção (μ). Esta também representa o grau de agressividade da broca. Nessa porção de valores, a Eficiência Mecânica da broca é máxima, obtendo níveis próximos de 30 – 40%.

Região III: O terceiro segmento da curva de drilloff test se inicia no Founder Point. Neste, algum mecanismo impede que a broca continue repassando a Energia que lhe é dada de forma linear para a destruição da rocha. Esse mecanismo pode ser, por exemplo, uma má limpeza da broca devido à problemas de hidráulica consequentes da elevada aplicação de peso sobre esta.

Quando a broca opera no seu pico de eficiência (30 – 40%), os valores de MSE chegam a ser até três vezes maiores que os valores de CCS.

Com isso, visando obter valores mais próximos entre MSE e CCS, para a comparação e a consequente análise de desempenho, introduziu-se o conceito de Energia Mecânica Específica Ajustada, que pode ser relacionada com a Energia Mecânica Específica através da Eficiência Mecânica da Broca.

$$MSE_{adj} = MSE \times EFF_m \tag{3.8}$$

Onde MSE_{adj} é a Energia Mecânica Específica Ajustada.

Na utilização em campo a Eficiência Mecânica da broca toma um valor constante e médio de 35%. Isso não interfere de forma significativa na análise qualitativa da Energia Mecânica Específica Ajustada, uma vez que esta deve ser analisada quanto à sua tendência de valores.

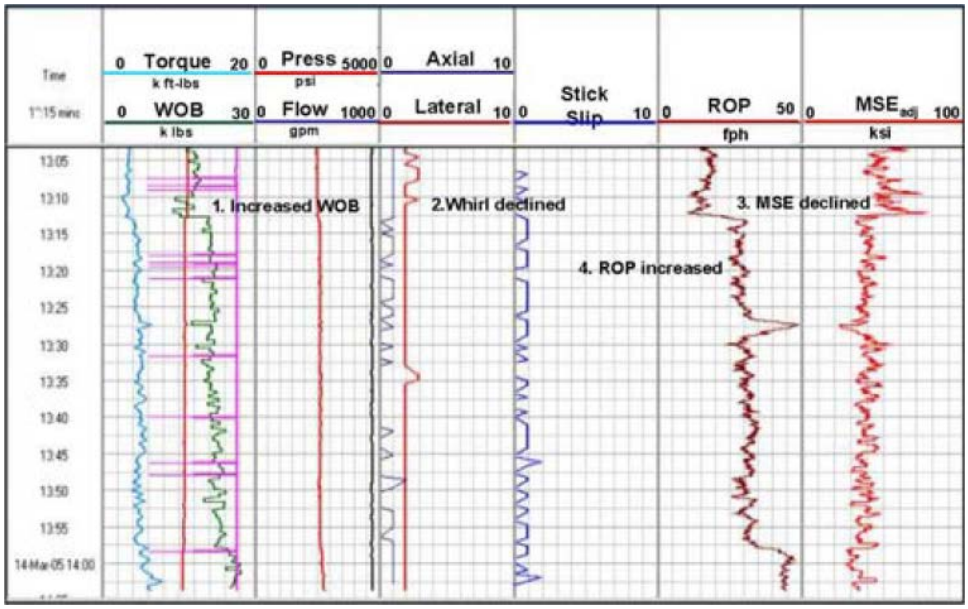


Figura 42: Gráfico com Parâmetros de Perfuração obtidos em Tempo Real (Dupriest et al., 2004)

A **Figura 42**, acima, mostra um caso no qual ocorria elevado nível de Whirl e a Tendência da curva de Energia Mecânica oscilava entre valores elevados. Porém, com o aumento do Peso sobre a Broca, o Whirl foi controlado, reduzindo sua severidade. Essa redução do Whirl teve um impacto imediato na redução da Tendência de valores da curva de Energia Mecânica Específica, pois a perfuração se tornou muito mais eficiente.

Com isso, a Energia dada à ao sistema de perfuração, a partir da superfície, foi menos dissipada pela coluna e, consequentemente mais utilizada pela broca, resultando em um aumento da ROP.

O Enceramento da Broca ou o próprio Desgaste que ocorre naturalmente com o uso desta também consistem em recorrentes causas de perda da Eficiência da Perfuração. Isso torna muito importante a detecção desses problemas, com o intuito de mitigar o mais rapidamente possível durante o acompanhamento de dados de parâmetros de perfuração em tempo real.

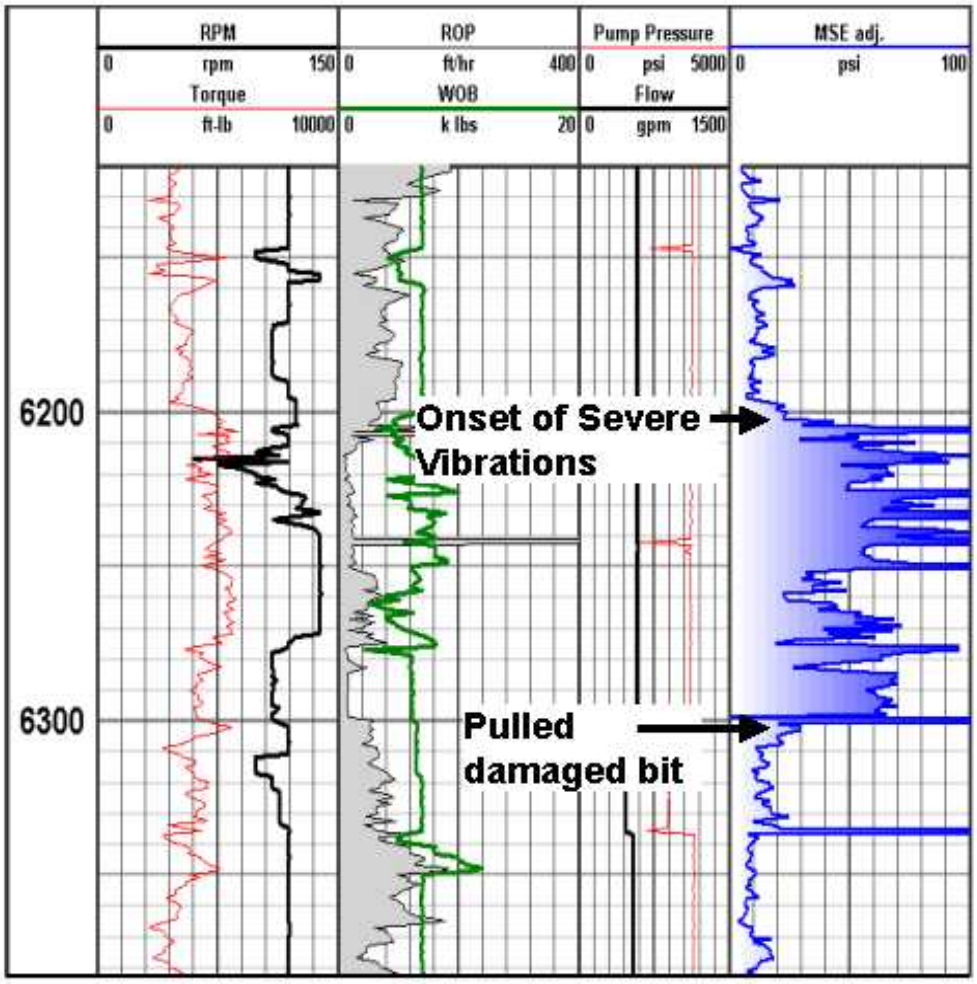


Figura 43: Broca Danificada após Elevados Níveis de Severidade de Vibrações (Dupriest et al., 2004)

O Gráfico acima (**Figura 43**) demonstra um caso onde é possível perceber a ocorrência concomitante de um aumento na Tendência de Valores de Energia Mecânica Específica em paralelo à uma diminuição brusca nos valores da ROP.

Nesse gráfico também pode-se notar uma oscilação nos valores do Peso sobre a broca. Todos esses fatores juntos indicam claramente a ocorrência de Vibrações Severas durante a perfuração do trecho entre 6200 e 6300m do poço.

Com isso, foi necessário trocar a broca, que já se encontrava danificada. Após essa troca a ROP volta a atingir elevados patamares.

4) Estudo de Caso

O principal objetivo desse estudo de caso é justamente o de analisar a tendência de valores da Energia Mecânica ao longo da perfuração, visando identificar quais as causas que provocam a queda na eficiência da perfuração.

Para isso, este estudo de caso contará com dados gráficos de cada um desses objetos de análise (MSE, Peso, Rotação, Torque e ainda Vibrações), para cada profundidade do poço, com valores obtidos tanto na superfície quanto no fundo, em operações reais de perfuração, e isso possibilitará o isolamento de intervalos de interesse à essa análise.

Os parâmetros provenientes do fundo do poço naturalmente vêm de medições realizadas através de ferramentas de M/LWD enquanto que os valores de superfície são obtidos de forma mais imediata, como o registro de dados da rotação da mesa rotativa ou do peso no gancho.

É importante ressaltar que os dados, originalmente organizados em planilhas, foram tratados e plotados em gráficos para que a vizualização e compreensão da tendência de valores se tornasse mais imediata e clara.

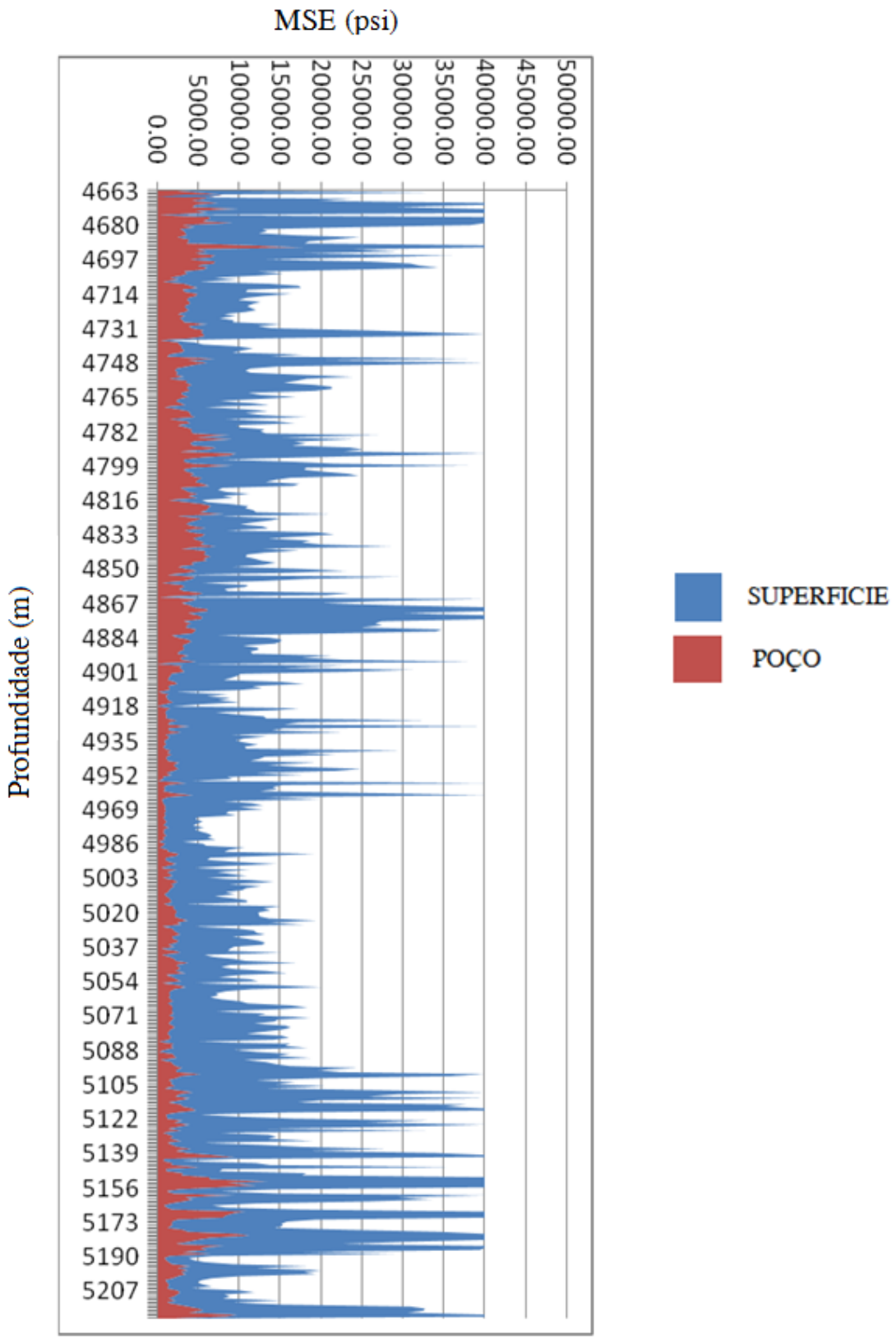


Figura 44: Gráfico de MSE x Profundidade.

O gráfico anterior, exibido na Figura 44, consiste em um registro da MSE de superfície, da MSE de fundo do poço, versus as profundidades da perfuração nos momentos em que os dados foram obtidos.

A primeira análise obtida a partir desse gráfico é a de que os valores da MSE de superfície são sempre superiores aos valores da MSE de fundo do poço .

Tomando conceitos de conservação de energia, a MSE de superfície é a energia que é dada ao sistema primáriamente enquanto que a MSE de fundo do poço é a energia medida no destino final, o fundo do poço. Logo, fica bastante evidente a percepção de que há dissipação de MSE ao longo da coluna de perfuração, que é o meio compreendido entre os dois pontos de obtenção de dados.

Uma vez que já fora explicado anteriormente todas as forças atuantes em cada elemento do BHA, assim como da coluna, fica bastante evidente que isso é não somente bastante aceitável, como perfeitamente coerente de se ocorrer.

Elementos como a fricção da coluna com a parede do poço, os fenômenos de vibração e até mesmo a lubricidade do fluido de perfuração e seu contato com a coluna são todos “contribuintes” para esse “consumo” de MSE.

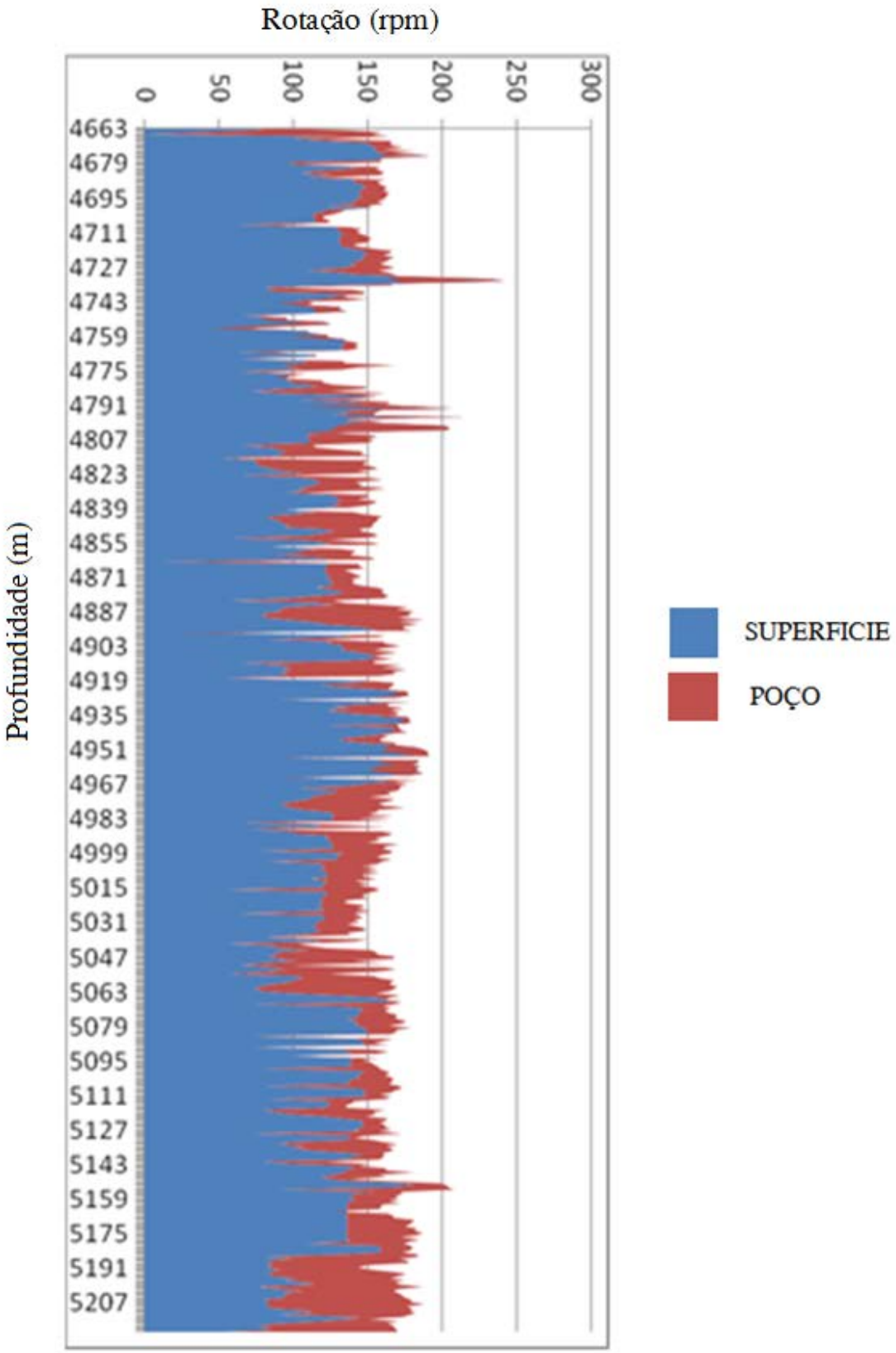


Figura 45: Gráfico de RPM x Profundidade.

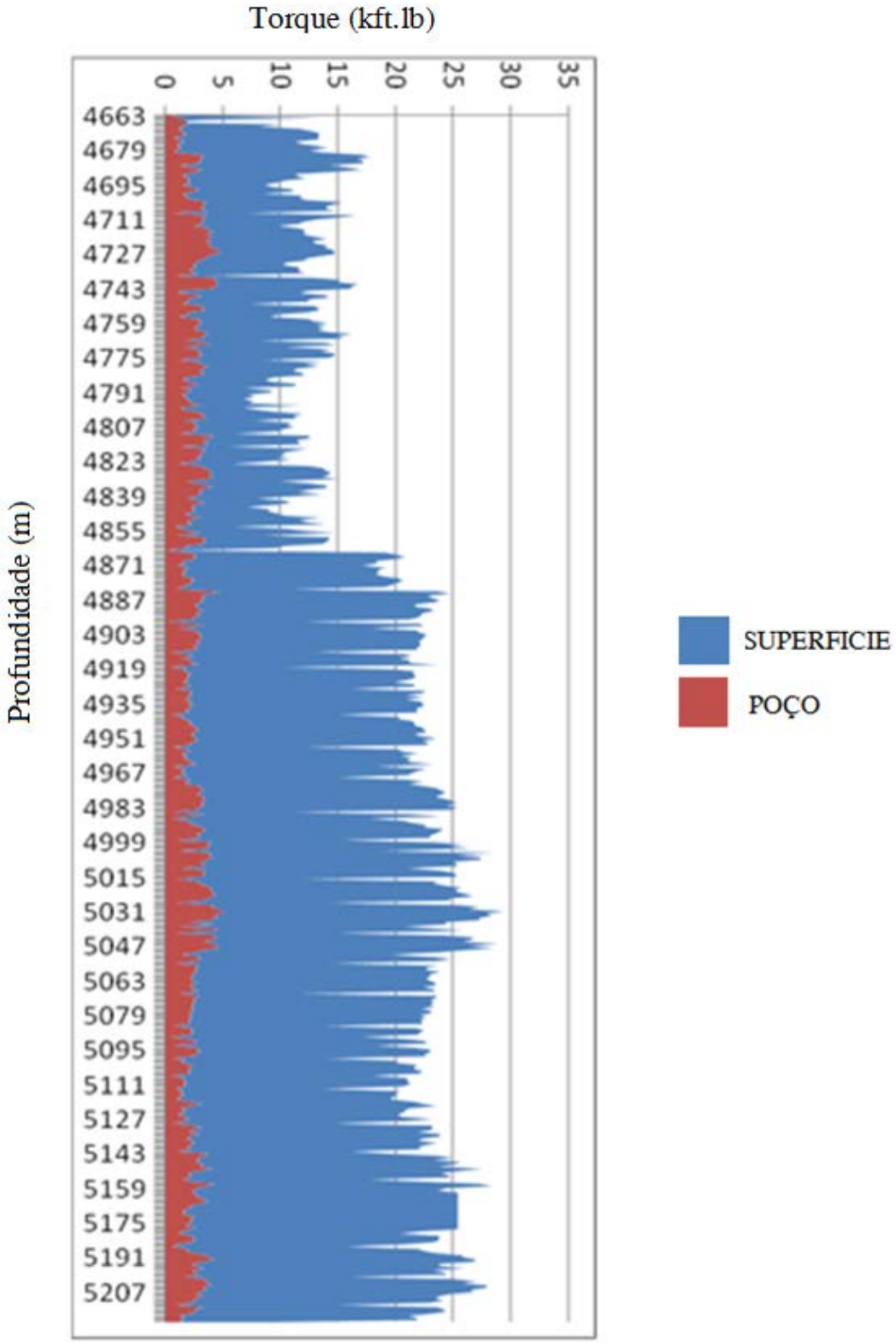


Figura 46: Gráfico de Torque x Profundidade.

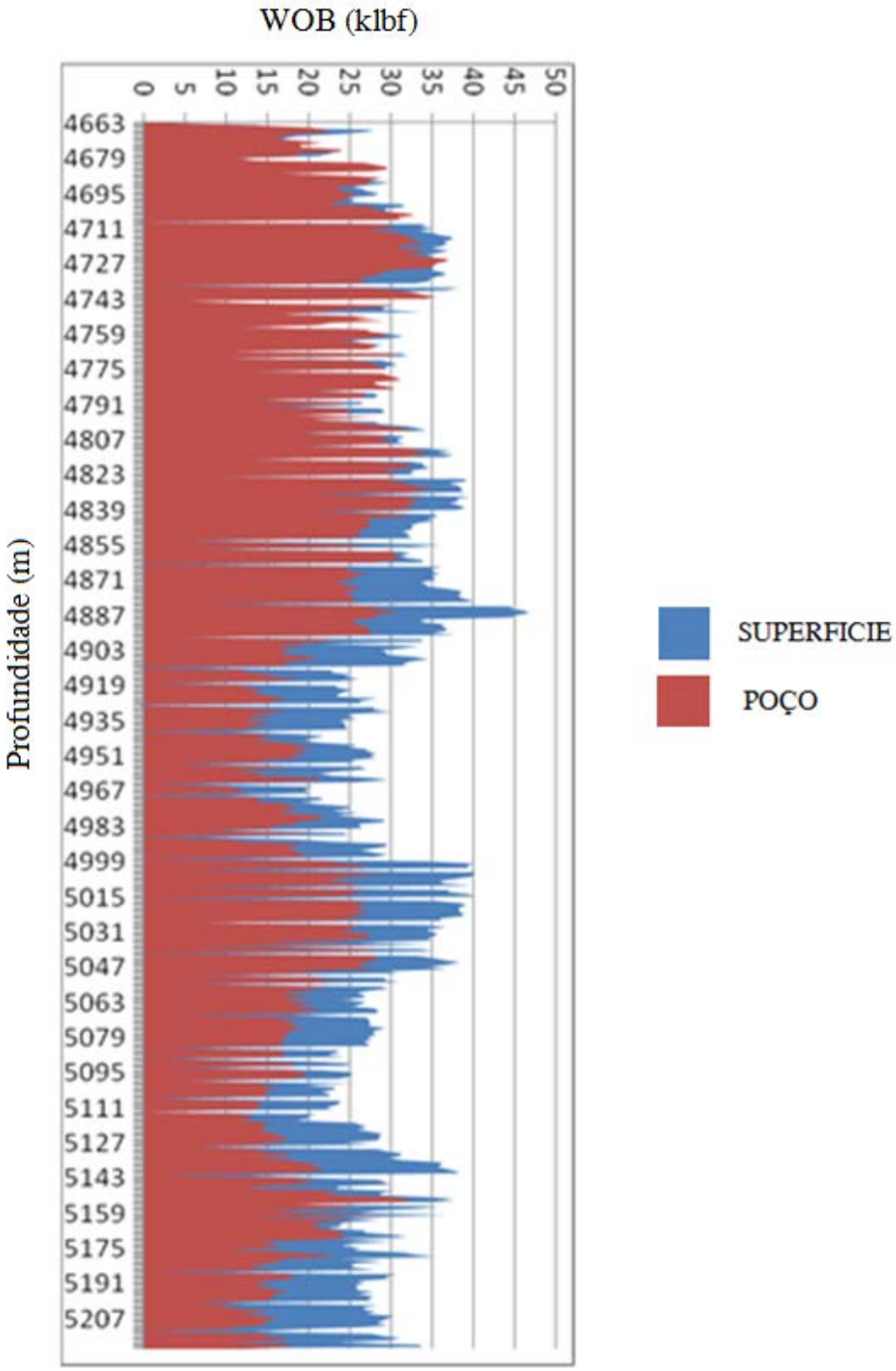


Figura 47: Gráfico de WOB x Profundidade.

A partir dos três gráficos anteriores (Figura 45,Figura 46 e Figura 47) podemos verificar que os valores de RPM de superfície e de fundo do poço se encontram muito próximos. Isso também ocorre para os valores de WOB de superfície e de fundo do poço.

Porém, ao repararmos nos valores de Torque para a superfície, estes se encontram muito superiores aos valores de fundo do poço. Isso naturalmente se deve ao fato de que a coluna consome boa parte do torque inicialmente disponível na superfície, fazendo com que apenas uma pequena parcela deste se encontre disponível à broca.

É natural de se esperar que ocorra o surgimento de vibrações, também, pelo movimento torsional da broca aliado às oscilações nos valores do torque, que podem ser percebidos na Figura 46. O tipo de vibração favorecido por este mecanismo é o Stick-Slip, pois, conforme os cortadores da broca cisalham uma porção adicioinal do fundo do poço, dependendo da intercalação entre formações duras e macias, ocorrem picos de Torque, que são transmitidos através da coluna de forma torsional, caracterizando esse tipo de vibração.

Foi preferencial a análise dos dados de apenas dois tipos de vibrações: Stick-Slip e Whirl; de acordo com a significância dos valores atingidos por estas em relação aos outros tipos de vibrações na perfuração desse poço.

Conforme já fora comentado anteriormente, sensores captam as dinâmicas oscilatórias em todos os eixos e, a partir de um tratamento de dados, nos fornecem os níveis de severidade para cada tipo de vibração. Esses dados virão a seguir, estando detalhados de acordo com os níveis de vibração atingidos para cada profundidade.

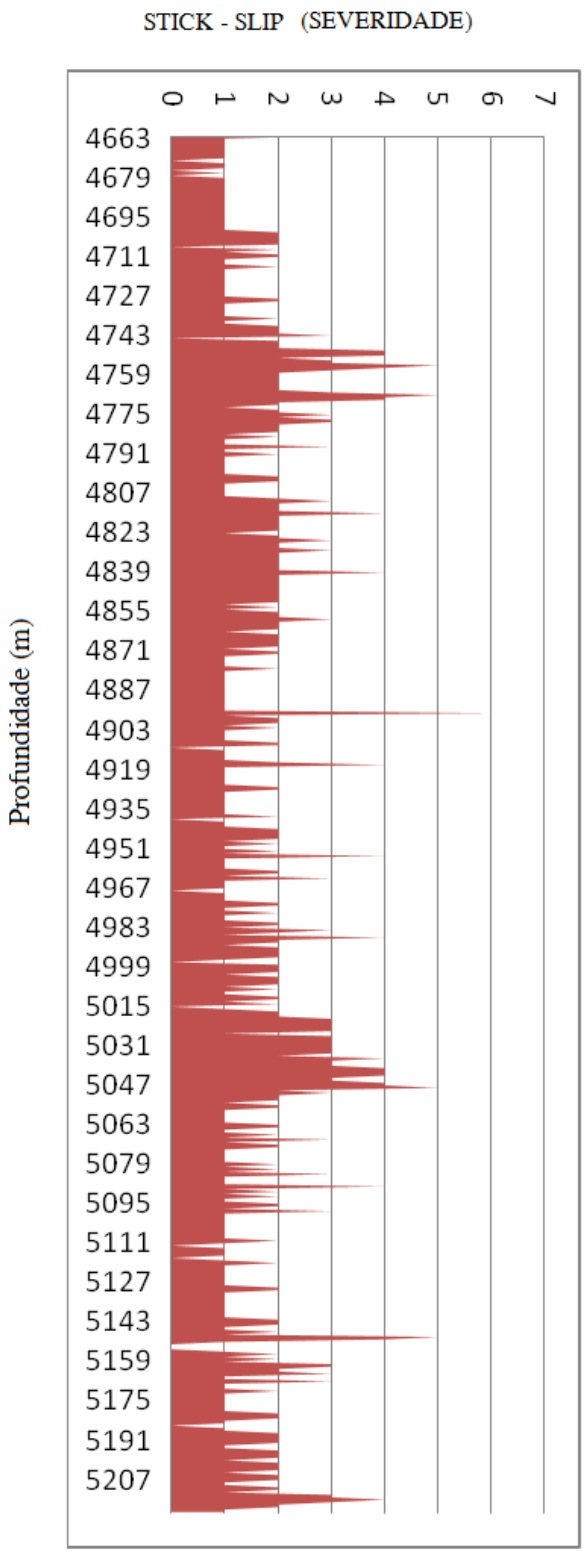


Figura 48: Gráfico de Severidade de Stick-Slip x Profundidade.

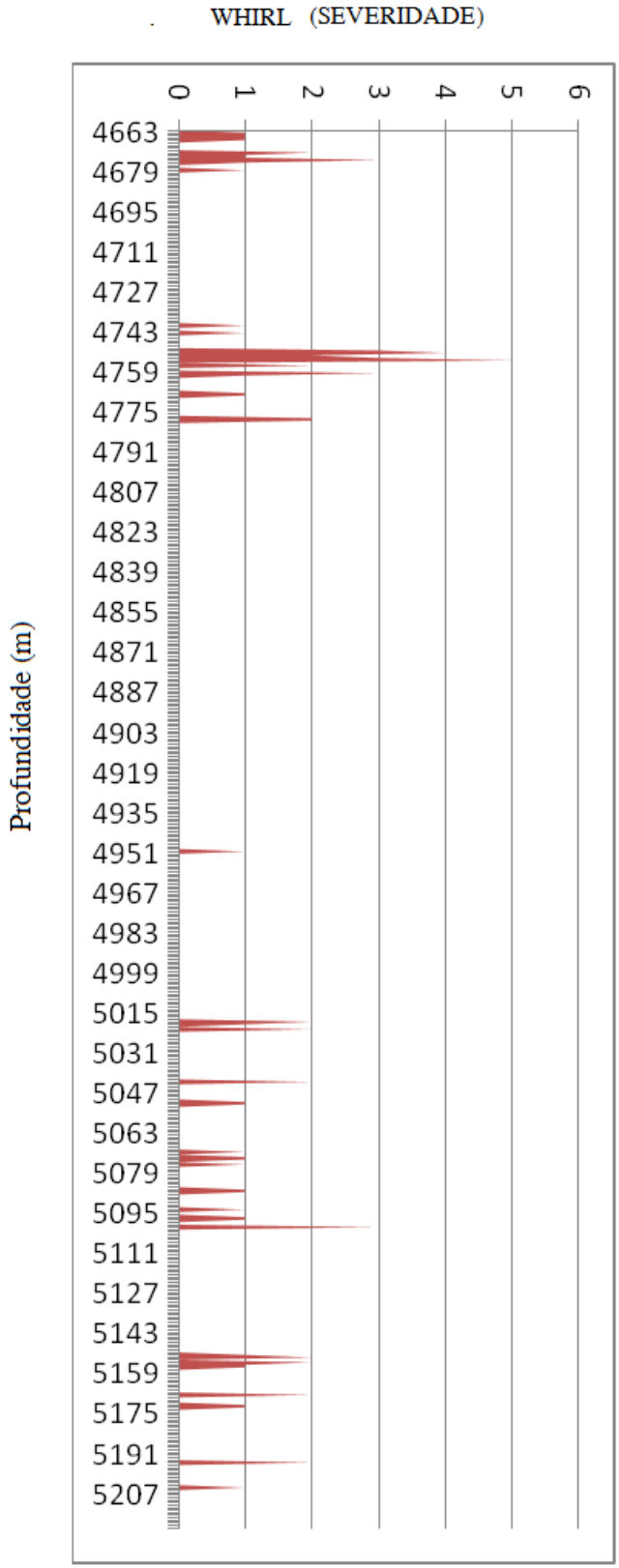


Figura 49: Gráfico de Severidade de Whirl x Profundidade.

É importante ressaltar a relevância que o acompanhamento dos níveis de severidade das vibrações possui:

Com elevados níveis de severidade de vibrações há um enorme gasto de energia, que é dissipada através dessas oscilações pela coluna, afetando de forma direta a eficiência da perfuração, que passa a disponibilizar de menos Energia Mecânica Específica no fundo do poço.

Além disso, as ferramentas de M/LWD possuem circuitos eletrônicos muito sensíveis e calibrados para executarem um bom serviço uma vez dentro do poço. Para a garantia de um bom funcionamento, cada ferramenta costuma ter um limite de tempo para cada nível de vibração. Esse tempo costuma ser ilimitado para níveis muito baixos, como o nível 1 ou 2, mas, normalmente, deve ser bem curto, como apenas 1 hora ou 30 minutos, para níveis elevados como os níveis 6 ou 7.

Com base nos gráficos anteriores de Stick-Slip e de Whirl (Figura 48 e Figura 49) podemos perceber que é, aproximadamente, no intervalo entre 4750m e 4770m de profundidade do poço onde ocorrem os níveis mais elevados de ambos os tipos de vibrações.

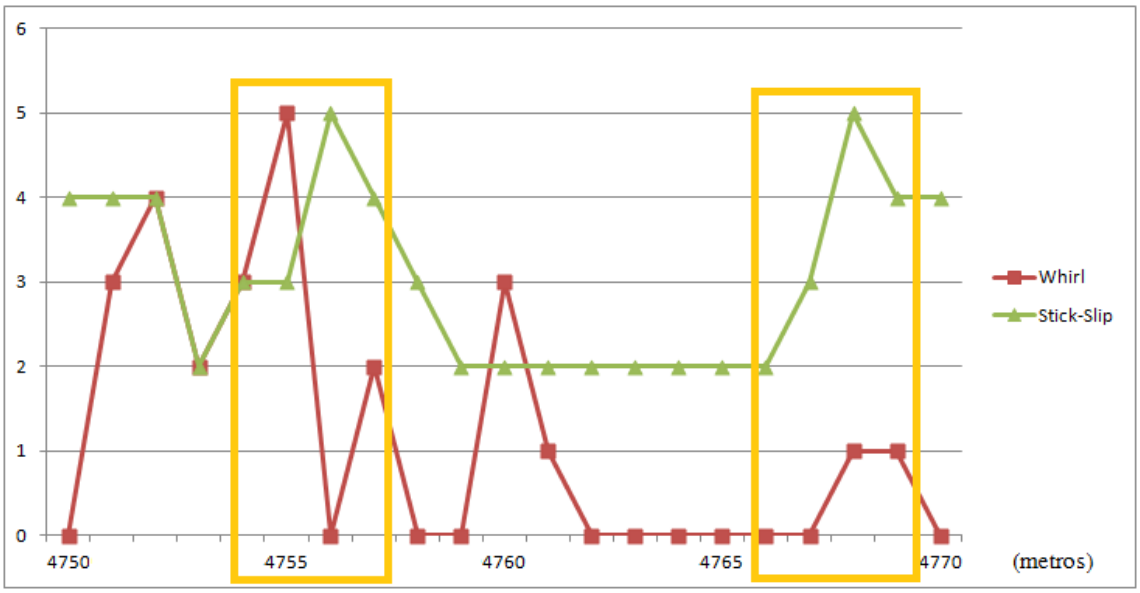


Figura 50: Gráfico de Stick-Slip e Whirl combinados para intervalo de profundidade de 4750 à 4770 metros.

Objetivando analisar a Energia Mecânica Específica de Perfuração e verificar a eficiência da perfuração, daremos prioridade para esse intervalo do poço:

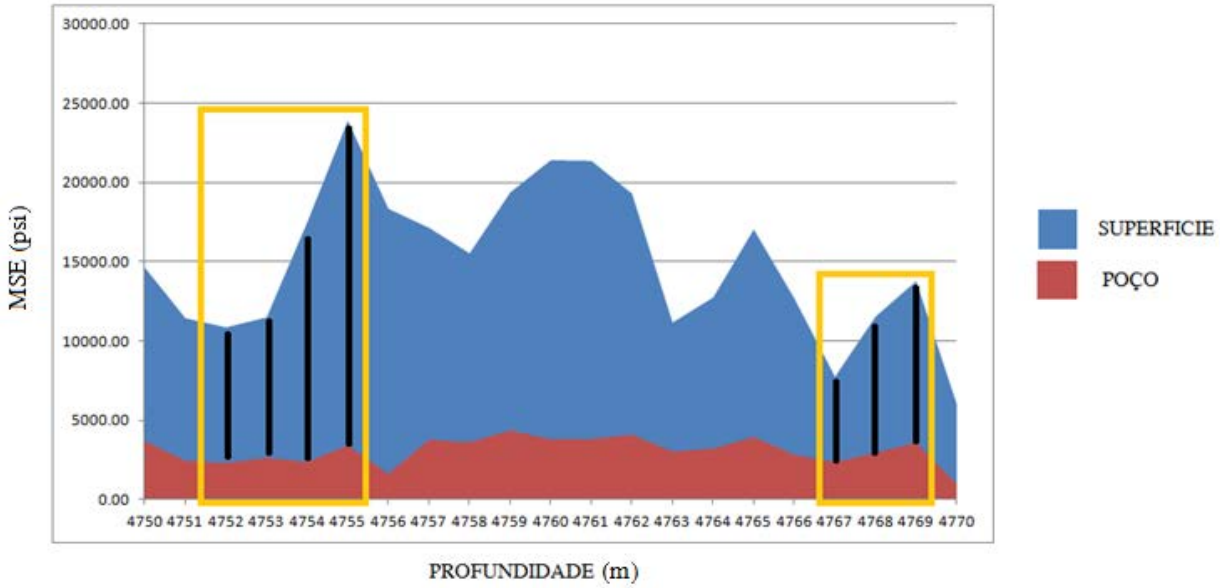


Figura 51: Gráfico de MSE para intervalo de profundidade de 4750 à 4770 metros.

A partir da comparação dos dois gráficos anteriores (Figura 50 e Figura 51) é possível perceber a tendência de aumento da diferença entre os valores da MSE de superfície e dos valores da MSE obtidos do poço, coincidindo justamente com os intervalos nos quais há ocorrência da combinação dos níveis mais elevados entre as vibrações do tipo Stick-Slip e do tipo Whirl.

Com isso, pode-se concluir que, mesmo elevando-se a Energia dada ao sistema na superfície, essa está sendo dissipada ao longo da coluna através da agitação da mesma, pois não está incrementando na mesma proporção a Energia no fundo do poço.

5) Conclusões

Todo processo que visa uma melhoria contínua se estrutura em alguns princípios básicos, de forma cíclica conforme a Figura 52, abaixo:

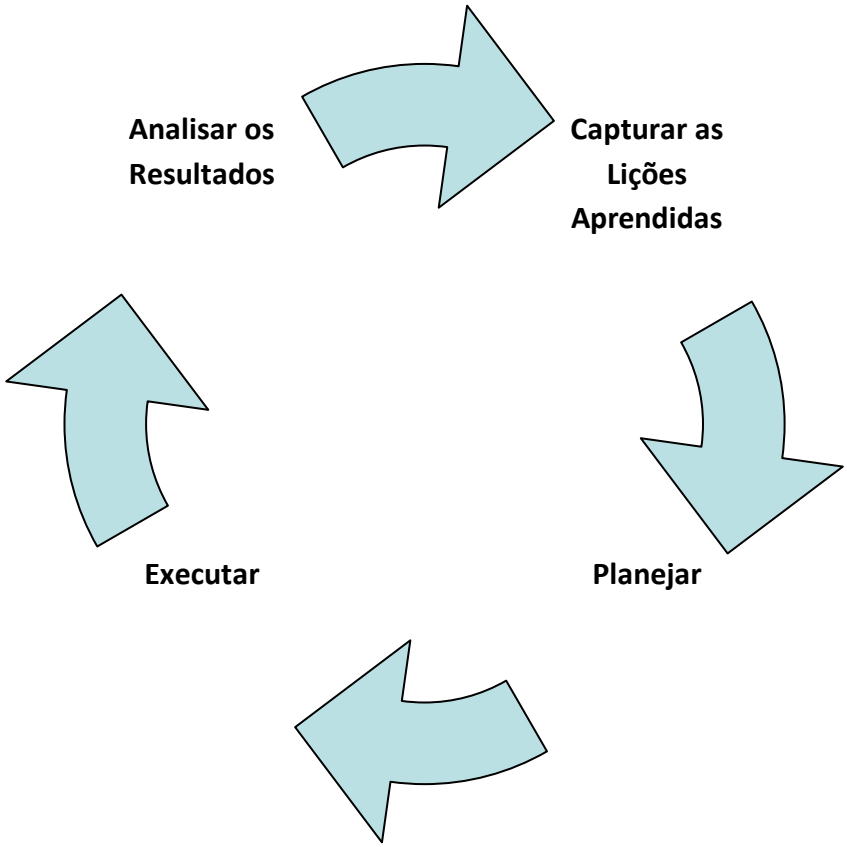


Figura 52: Esquema para processo de melhoria contínua.

Pode-se dizer que essa metodologia é a grande responsável pelo aprimoramento de diversos componentes na indústria do petróleo.

Dentre eles, os mais relevantes no foco desse trabalho:

- Tecnologia aplicada à ferramentas e brocas.
- Boas práticas de perfuração e utilização de parâmetros adequados.
- Investimentos em acompanhamento de dados em tempo real.

A Energia Mecânica Específica de Perfuração se introduz nesse contexto como um parâmetro útil para a análise dos resultados obtidos tanto durante quanto após a perfuração de um poço.

O acompanhamento da MSE durante a perfuração de um poço é de grande auxílio na tomada de decisões de forma imediata. Isso pode representar uma economia significante na perfuração de um poço, pois o aumento da eficiência da perfuração traz uma série de benefícios:

- Redução imediata do tempo de perfuração de uma uma determinada fase de um poço através do aumento da ROP, reduzindo diretamente os custos associados à esta.
- Menor desgaste de Broca, pela utilização dos parâmetros mais adequados, e troca desta no momento ideal, evitando corridas adicionais desnecessárias.
- Menor índice de falhas de ferramentas.

A análise do comportamento da MSE da perfuração de um poço também se mostra de extrema importância após a perfuração deste, pois, uma vez conhecida a sequência litológica de um poço este servirá como poço de correlação para outros poços perfurados numa região.

Com isso, todas as práticas de perfuração executadas no poço original servem como “lições aprendidas” para o planejamento de futuros poços correlatos.

Dentre elas, as principais são:

- As ferramentas que serão incluídas em futuros BHA’s a serem utilizados, e a estabilização adequada destes.
- Os Parâmetros de Perfuração utilizados.
- O Tipo e a configuração da broca utilizada para cada fase.

Por fim, o investimento em tecnologias de acompanhamento dos Parâmetros de Perfuração, assim como da Energia Mecânica Específica, em tempo-real se mostra de grande importância para o melhoramento da estado atual das técnicas de Perfuração, reduzindo de forma significativa o impacto dos Custos da Perfuração.

A utilização de ferramentas de otimização aliadas à centros de monitoramento de dados em tempo-real (BEACONs) possibilita uma resposta instantânea à qualquer situação de queda de eficiência da perfuração através da análise de Engenheiros qualificados para essa função.

A cultura de melhoria contínua através da análise, da captura de lições aprendidas e da prática de um planejamento prévio às operações de perfuração só vêm a acrescentar e se mostrar como uma técnica incontestavelmente benéfica e indispensável no panorama de custos crescentes e poços mais complexos para o acesso de reservatórios mais profundos como os reservatórios do pré-sal brasileiro.

6) Bibliografia

BRITTO, G. A. Energia Mecânica Específica e suas Aplicações na Perfuração de Poços de Petróleo. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010 (Projeto de Graduação).

CAICEDO, H. U. et al. “Unique ROP Predictor Using Bit-specific Coefficient of Sliding Friction and Mechanical Efficiency as a Function of Confined Compressive Strength Impacts Drilling Performance”. Paper SPE/IADC 92576, Paper presented at SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, Netherlands, February 2005.

CURRY. D. A. ; et al. “New Method of Representing Rock Properties Over Entire Bit Run Improves Computer Generated Bit Recommendations”. Paper IADC/SPE 87100. Paper presented at IADC/SPE Drilling Conference held in Dallas, Texas, U.S.A., March 2004.

CURRY, D.A.; et al. “Technical Limit Specific Energy – An Index to Facilitate Drilling Performance Evaluation”. Paper SPE/IADC 92318. Paper presented at SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, Netherlands, February 2005.

DUPRIEST, F. E.; et al. “Maximizing ROP With Real-Time Analysis of Digital Data and MSE”. Paper IPTC 10607. Paper presented at the International Petroleum Technology (IPTC) Qatar, November, 2005.

INTEQ/BAKER HUGHES. “Drilling Engineering Workbook”. EUA, 1995.

INTEQ/BAKER HUGHES. “Oil Field Familiarization Training Guide”. EUA, 1995.

Koederitz W.L.; et al. “A Real-Time Implementation of MSE”. Paper AADE-05-NTCE-66. Paper presented at the AADE 2005 National Technical Conference and Exhibition, held in Houston, Texas, 2005.

TEALE, R.; “The Concept of Specific Energy in Rock Drilling”. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol. 2, pp. 57-73. Pergamon Press, July 1965. Printed in Great Britain.

THOMAS, J. E., et al., Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2001.

ANEXOS

ANEXO I

Estruturas de Perfuração

Um dito muito mencionado na indústria do petróleo é o de que o petróleo não seleciona a localidade de sua ocorrência. Por isso ele pode tanto ocorrer em um deserto árido como aqueles encontrados no oriente médio quanto a 7km de profundidade 400km afastado da costa continental.

Para cada ambiente novo e mais desafiador no quesito de condições climáticas ou naturais, por conta da posição geográfica, a engenharia vêm sendo capaz de adaptar as estruturas necessárias para todos os tipos de operações à tal localidade.

A capacidade humana de exercer ciência e de desenvolver tecnologia extrapolou os limites continentais, em busca de novos recursos energéticos, para que a humanidade possa continuar mantendo seu estilo de vida, de forma moderna, veloz, utilizando da inteligência para o desenvolvimento de máquinas que exercem funções sobre-humanas, seja para o içamento de um contâiner ou na fabricação de remédios e comodidades em escala industrial.

Com isso, se era possível instalar uma sonda de perfuração em terra, deve-se mudar apenas algumas características estruturais de forma a adequar esta para flutuar, resistir à todas as dinâmicas oceânicas e ainda assim realizar a operação desejada de forma segura e ambientalmente correta. O mesmo ocorre para unidades de refino, dutos submarinos, unidades de produção, etc.

Sondas de Perfuração

Os diferentes tipos de sondas de perfuração se classificam primeiramente entre aquelas que serão utilizadas para a perfuração em terra (onshore) ou para a perfuração no mar (offshore).

É bastante intuitivo perceber que as diferentes condições operacionais e geográficas às quais a sonda deverá ser submetida influenciam determinantemente no tipo de sonda que deverá ser utilizada para que se possa executar a perfuração de forma segura para a estrutura, para o meio ambiente e para o pessoal envolvido na operação.

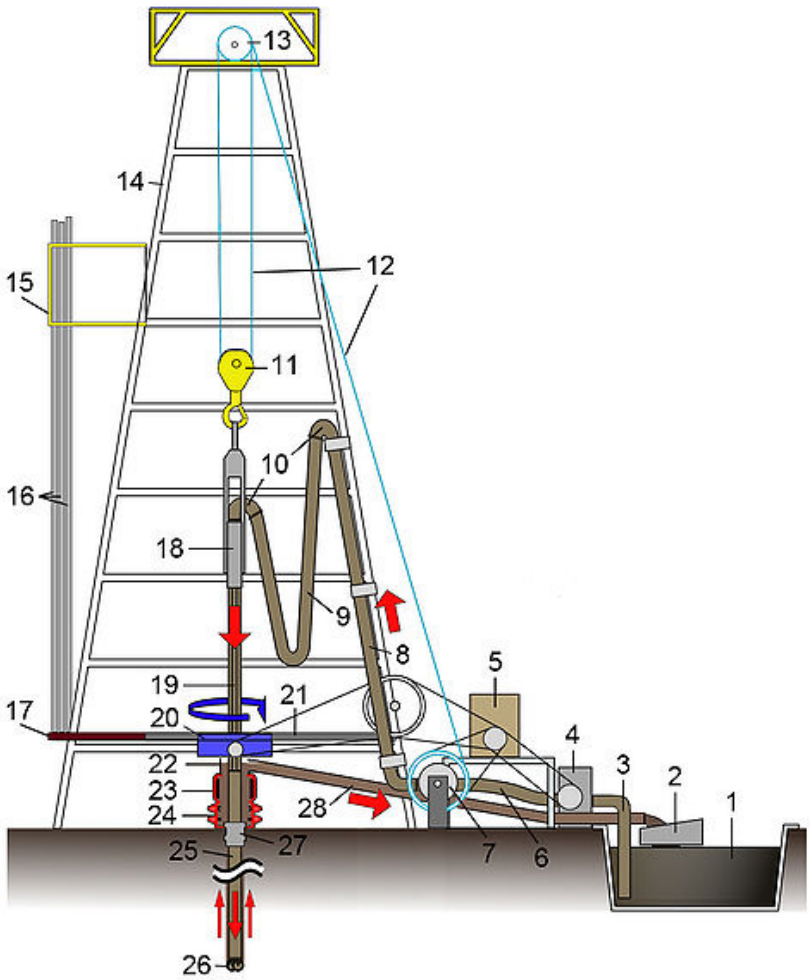
Para um ambiente terrestre, de uma forma geral, a sonda de perfuração pode enfrentar ambientes bastante hostis à sua presença como regiões glaciais, desertos e florestas tropicais. Cada ambiente requer pequenas adaptações na forma com que a sonda será instalada no local.

Em geleiras no Alaska, por exemplo, as preparações incluem todo um isolamento térmico com poliuretano para que o calor proveniente da sonda não seja transferido para o gelo, derretendo-o e comprometendo dessa forma a operação como um todo.

Ainda, estruturas metálicas são inseridas no gelo e fixadas de forma a sustentar melhor o peso da sonda e não comprometer a camada de gelo.

Em florestas densas como a Floresta Amazônica, o transporte e a mobilização da sonda na localização adequada pode requerer auxílio de barcas transportadoras ou até mesmo de helicópteros em substituição ao tradicional caminhão de carga.

A estrutura de uma sonda de perfuração consiste basicamente de uma torre de perfuração, com a função de erguer e sustentar a carga da coluna de perfuração, um sistema de rotação, responsável por impor a rotação à coluna, e um sistema de circulação, que utiliza a potência de bombas hidráulicas para o bombeio do fluido de perfuração até a extremidade da broca (fundo do poço).



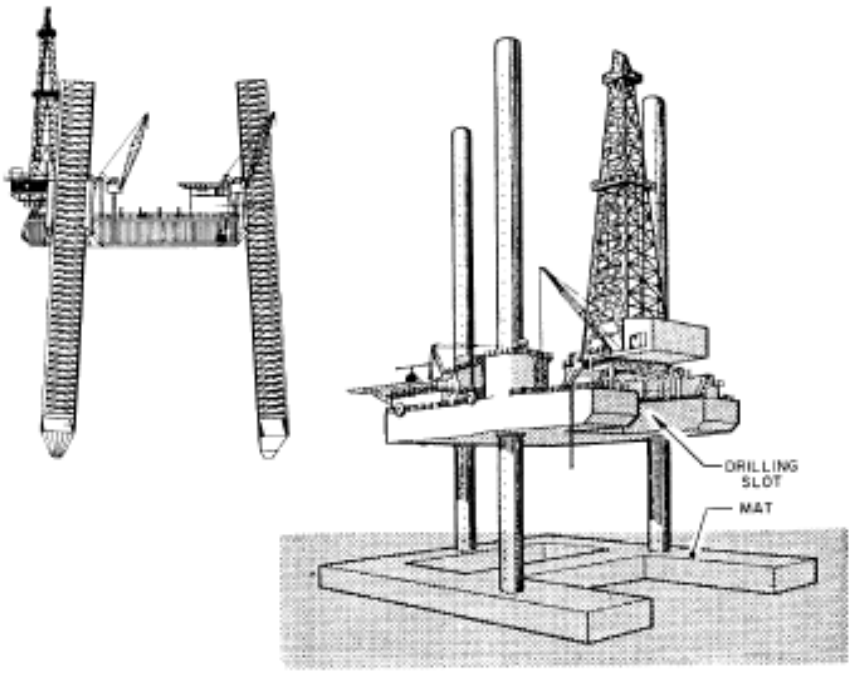
1. Tanque de lama
2. Agitadores de argila
3. Linha de sucção de lama
4. Bomba do sistema de lama
5. Motor
6. Mangueira vibratória
7. *Draw-works*
8. *Standpipe*
9. Mangueira da Kelly
10. *Goose-neck* (Pescoço de ganso)
11. *Traveling block*
12. Linha de perfuração
13. *Crown block*
14. *Derrick*
15. *Monkey board*
16. *Stand* do duto de perfuração
17. *Pipe rack*
18. *Swivel*
19. *Kelly drive*
20. Mesa rotatória
21. Superfície de perfuração

22. *Bell nipple*
23. Ânulo do *Blowout preventer* (BOP – sistema de prevenção de fluxo descontrolado)
24. Dutos do *Blowout preventer*
25. Linha ou coluna de perfuração
26. Broca de perfuração
27. Cabeça do *Casing*
28. Duto de retorno da lama

Quando falamos em um ambiente aquático, a análise quanto à severidade do comportamento hidrodinâmico é essencial para a seleção e o dimensionamento da estrutura, que pode ser fixa ou flutuante. Com isso, para profundidades rasas, estruturas fixadas ao leito marinho são preferíveis.

Dentre estas, as mais empregadas neste cenário são as do tipo Jack-Up e do tipo Plataforma Fixa, enquanto que para lâminas d'água maiores, estruturas flutuantes tornam-se a única opção, devido à inviabilidade da construção de colunas de aço e concreto tão longas e resistentes ao mesmo tempo.

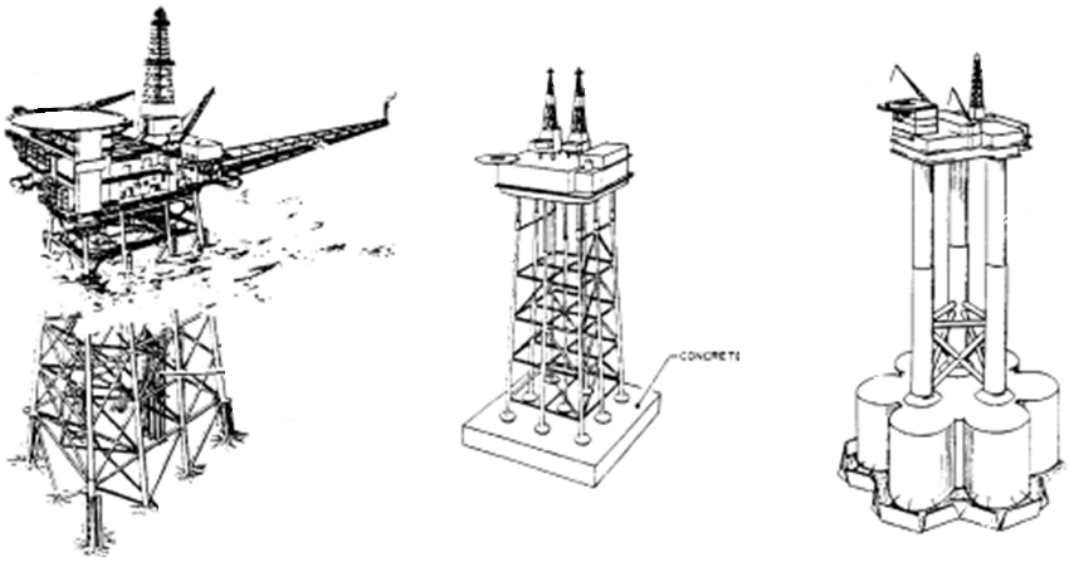
As plataformas do tipo Jack-Up, apesar de terem sua atuação limitada à profundidades rasas, representam aproximadamente metade de todos os tipos de plataformas oceânicas. Essas estruturas são bastante estáveis por conta de repousarem sobre o leito marinho, não estando sujeitas às dinâmicas oceânicas. Possuem a característica de se auto elevarem como um elevador sem cabos, pois possuem trilhos nos pilares treliçados nos quais se apoiam e se utilizam de um sistema mecânico com engrenagem para realizar tal função.



De uma forma geral as plataformas fixas conseguem atuar em localizações com lâminas d'água mais profundas que as plataformas do tipo Jack-Up, porém, também possuem a lâmina d'água como limitante. Existem basicamente dois tipos de plataformas fixas: As plataformas fixas com colunas de aço e as Plataformas fixas gravitacionais.

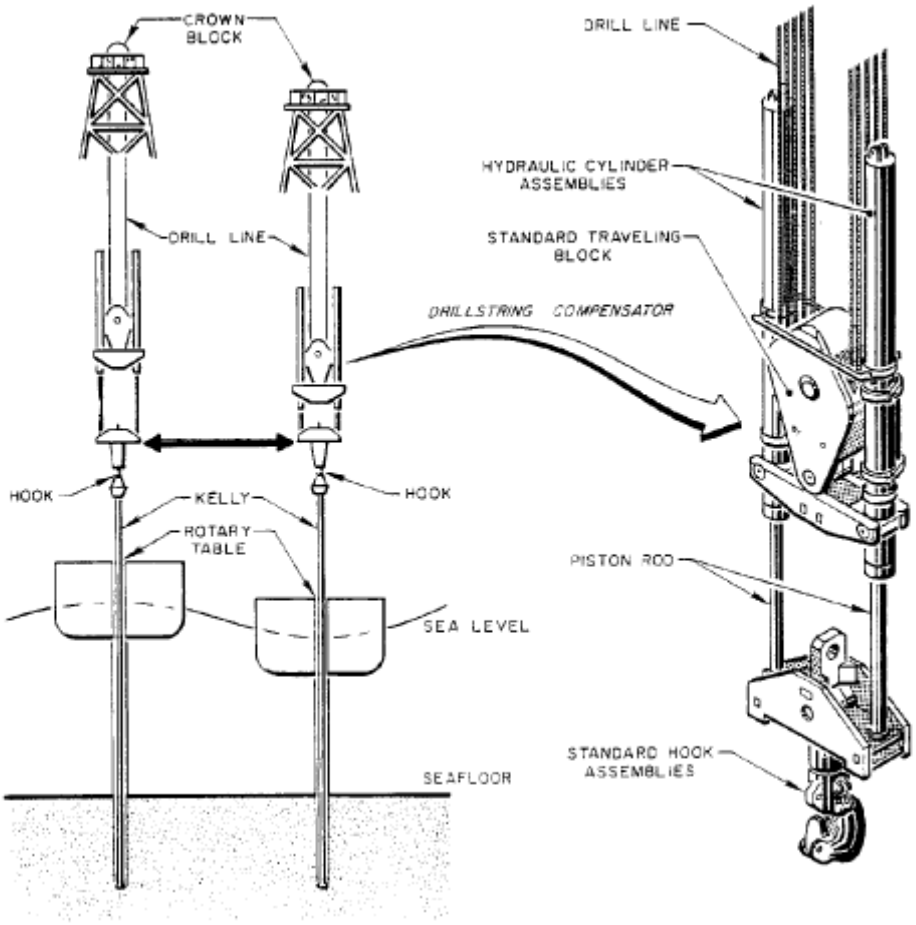
O primeiro tipo de plataformas fixas utiliza colunas de aço para se apoiar diretamente sobre o leito marinho. As colunas de aço, por estarem introduzidas alguns metros no terreno arenoso, conseguem proporcionar a estabilidade necessária para as operações, suportando até mesmo condições severas de mar.

As plataformas do segundo tipo possuem outro mecanismo para lhes proporcionar estabilidade, o próprio peso. Essas estruturas contam com colunas compostas de aço apoiadas sobre uma base de concreto. Nesse tipo de plataformas fixas a estabilidade é dada não só pelo peso da estrutura como um todo mas, principalmente, pelo peso da base de concreto. A dimensão da base de concreto e o consequente peso desta são certamente calculados de forma a garantir que a plataforma se mantenha bastante fixa, sofrendo apenas pequenas oscilações, sob as condições marinhas previstas para a localização de sua instalação.



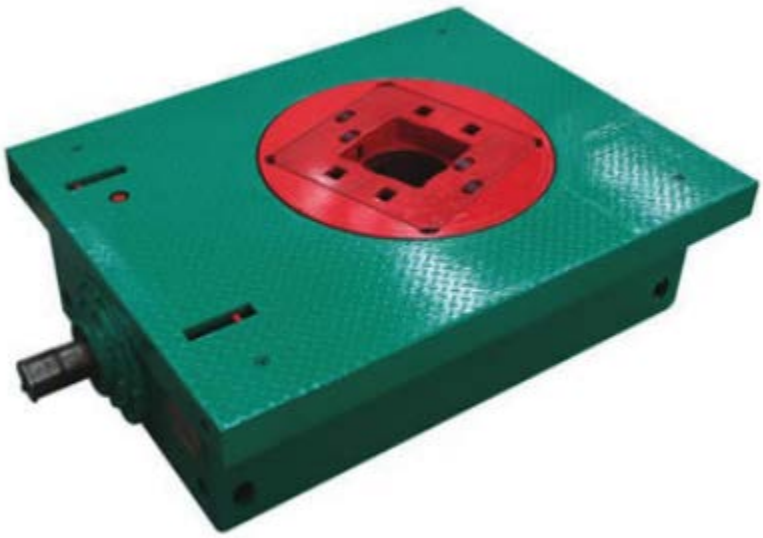
As sondas semi-submersíveis consistem em estruturas flutuantes capazes de sustentar, dispor de espaço e proporcionar estabilidade o suficiente para que as operações de perfuração possam ser realizadas com sucesso. Essas sondas flutuantes, devido às dinâmicas do oceano, contam com mecanismos capazes de manter o posicionamento, através de Sistema de Posicionamento Global (GPS), de forma automática.

A torre de perfuração dessas unidades flutuantes deve dispor também de um conjunto de polias, engrenagens e motores capazes de compensar a dinâmica de Heave, de forma a possibilitar a perfuração sem que a broca fique batendo no fundo do poço de forma oscilatória. Sem esse mecanismo chamado de Heave Compensator a perfuração seria extremamente danosa à broca, inviabilizando-a.



Mesa Rotativa

A mesa rotativa é o componente de uma sonda de perfuração responsável por fornecer rotação à coluna de perfuração. Esta se situa no “Rig Floor” e, durante operações de conexões, deve ser capaz de suportar o peso da coluna. Este importante componente, essencial para a perfuração se encontra ilustrado abaixo:



BOP – Blow Out Preventer

A perfuração de um poço é, sem dúvidas uma das etapas mais arriscadas do desenvolvimento de um campo petrolífero. Por diversas ocasiões, à uma determinada profundidade, a pressão hidrostática do fluido de perfuração (do poço) se caracteriza menor que a pressão hidrostática da formação. Quando isso ocorre, simplesmente esse diferencial de pressão proporciona indesejavelmente fluxo de fluido proveniente da formação perfurada ao poço. Esse fluido pode ser apenas água, óleo, gás ou qualquer combinação entre esses três componentes. À esse fenômeno dá-se o nome de “Kick”.

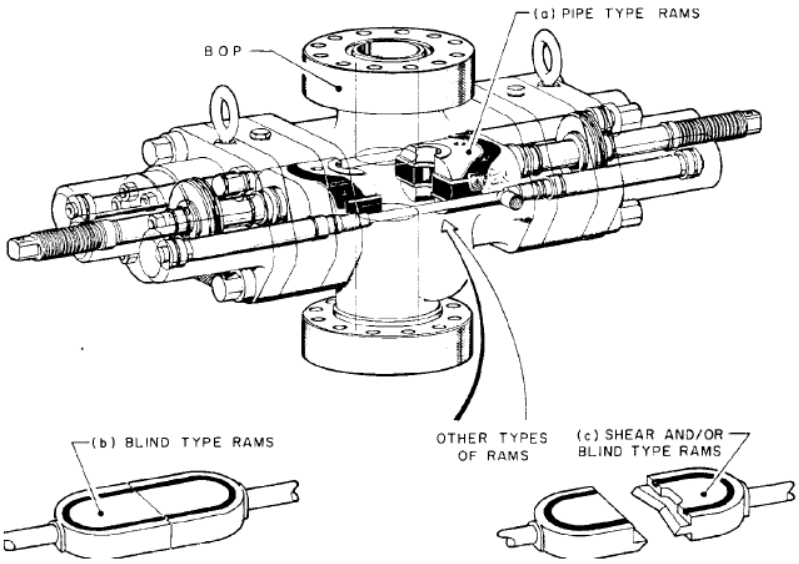
É intuitivo perceber que a invasão de gás é a mais perigosa situação dentre estas, pois, por possuir características físicas muito diferentes da água e do óleo este se expande muito mais que esses outros dois fluidos ao percorrer o poço no sentido ascendente. O que provoca essa expansão é o fato de, ao longo dessa “subida”, o gás encontrar pressões hidrostáticas cada vez menores e, de acordo com a Equação 3, abaixo, pode-se perceber que, para que a relação se mantenha constante, o Volume deverá aumentar de valor.

$$P \times V = n \times R \times T = Const.$$

Para controlar tais situações é desejável utilizar-se de equipamentos de segurança com válvulas e travas de bloqueio ao fluxo não almejado. Com isso, desenvolveram-se diversos componentes e dispositivos de segurança, sendo o mais conhecido deles o Blow Out Preventer (BOP).

O BOP consiste em um dispositivo projetado para evitar de qualquer forma que uma situação de Kick, que outrora seria considerada “fora de controle”, perca o controle de fato atingindo a superfície e, consequentemente, a sonda e a tripulação desta.

Este equipamento possui gavetas com dispositivos de segurança capazes de superar a resistência de um tubo de perfuração de aço, sendo possível estrangular ou até mesmo simplesmente cortar este quando necessário.



Sendo um equipamento de segurança para a perfuração, o BOP é usualmente instalado na cabeça do poço logo nas primeiras fases da perfuração, logo após o assentamento do revestimento condutor na maior parte dos casos. A instalação antes do condutor não é necessária uma vez que, normalmente, essa fase é perfurada através do jateamento de água do mar.

O BOP é retirado da cabeça do poço assim que todas as etapas de perfuração já foram devidamente concluídas e o objetivo final já foi alcançado.

ANEXO II

Profundidade	TORQUE Superfície	TORQUE Poço	PESO Superfície	PESO Poço
4663	3.53	0.65	-1.39	3.1
4664	13.61	1.33	14.58	13.19
4665	3.25	2	10.86	20.14
4666	0.04	1.96	28.02	22.21
4667	10.3	2.01	26.92	22.52
4668	8.12	1.46	23.86	18.49
4669	11.65	1.34	18.59	17.02
4670	12.56	1.34	17.17	16
4671	13.39	1.81	16.7	18.79
4672	13.32	1.84	15.96	21.75
4673	13.32	0.93	15.96	19
4674	13.32	1.08	15.96	19.16
4675	11.28	1.71	13.75	23.95
4676	11.9	1.22	23.38	24.02
4677	13.18	1.14	22.63	18.31
4678	14.15	1.49	21.28	19.21
4679	12.55	0.91	12.84	11.3
4680	13.62	1.07	6.9	13.43
4681	17.02	3.01	20.55	26.61
4682	17.81	3.47	21.67	28.1
4683	16.72	3.05	22.13	29.48
4684	17.25	3.17	22.59	29.62
4685	17.17	3.02	21.67	27.73
4686	14.34	1.31	10.84	17.05
4687	15.95	2.48	19.59	25.78
4688	17.09	3.27	21.74	28.97
4689	14.58	2.73	25.57	27.75
4690	11.3	1.84	30.01	27.1
4691	11.56	1.55	28.01	26.87
4692	12.22	2.22	25.33	23.98
4693	10.46	1.93	26.67	23.3
4694	9.72	2.26	27.11	24.18
4695	8.65	1.56	28.58	25.61
4696	9.42	2.19	27.94	25.89
4697	10.87	3.02	24.81	23.93
4698	11.26	2.71	25.79	25.29
4699	8.56	1.58	25.05	22.65
4700	11.95	1.89	31.25	22.75
4701	11.69	1.91	31.79	27.79
4702	12.23	2.56	29.34	28.05
4703	15.47	3.71	29.43	28.44
4704	14.71	3.4	30.42	31.63
4705	14.02	3.32	30.39	33.07
4706	14.02	3.12	29.68	30.7
4707	14.78	3.84	30.05	31.56
4708	7.12	0.72	-4.97	-1.28
4709	16.62	3.76	34.37	28.15

4710	15.25	3.26	33.63	30.13
4711	13.16	3.49	35.23	30.49
4712	12.07	3.16	33.49	27.03
4713	11.65	3.34	35.03	30.79
4714	9.79	2.58	36.07	31.44
4715	11.57	3.69	37.59	32.73
4716	12.22	3.82	37.32	32.33
4717	12.04	4.26	36.4	33.43
4718	12.14	3.55	36.89	33.97
4719	13	4.12	36.23	30.9
4720	14.04	3.93	34.88	31.21
4721	12.82	3.54	37.08	34.13
4722	13.02	3.94	35.89	33.74
4723	14.13	3.99	34.47	32
4724	13.85	3.93	35.04	34.68
4725	14.53	4.64	35.17	37
4726	14.74	4.78	35.1	36.69
4727	14.73	4.35	33.99	35.43
4728	13.42	3.8	34.97	35.35
4729	12.31	3.49	35	34.47
4730	12.12	3.06	35.07	30.1
4731	10.5	2.75	36.28	28.93
4732	10.3	2.54	36.76	28.43
4733	11.53	2.71	35.49	27.13
4734	11.74	2.22	34.74	26.01
4735	11.56	2.32	34.76	27.32
4736	12.25	2.89	32.93	26.05
4737	3.9	0.94	2.61	1.07
4738	13.07	4.53	38.32	27.29
4739	15.3	4.38	36.81	30.44
4740	15.01	4.38	29.9	32.49
4741	16.77	4.7	31.16	33.79
4742	16.22	4.39	30.69	35.55
4743	16.1	3.99	29.81	34.21
4744	12.44	1.44	1.94	5.49
4745	11.7	1.21	2.14	13.24
4746	13.92	3.11	30.34	30.66
4747	14.27	3.05	28.98	27.98
4748	12.44	2.02	29.23	23.63
4749	12.51	2.1	33.73	21.44
4750	7.34	1.54	7.8	16.97
4751	12.89	3.35	24.49	27.71
4752	13.38	3.32	20.72	25.43
4753	13.3	3.44	23.58	29.28
4754	12.33	2.27	18.86	22.7
4755	9.9	1.92	15.77	21.2
4756	9.07	1.24	10.51	11.76
4757	12.47	3.05	26.26	26.99
4758	12.9	2.91	26.3	27.57
4759	14.13	3.25	29.75	29.79
4760	13.15	2.95	31.67	29.25

4761	13.94	2.62	29.8	26.85
4762	13.21	2.73	25.23	23.84
4763	14.12	3.55	26.48	26.2
4764	16.19	3.79	29.08	28.1
4765	14.99	3.22	27.57	28.17
4766	15.53	3.3	27.12	27.16
4767	8.17	1.73	-3.95	10.7
4768	13.93	3.77	31.35	30.63
4769	14.8	3.77	32.06	30.17
4770	10.49	1.59	8.3	9.39
4771	14.47	2.8	28.88	25.56
4772	13.52	3.03	29.96	27.77
4773	14.71	3.06	30.84	28.01
4774	14.78	3.25	29.27	28.86
4775	14.15	2.89	29.55	29.62
4776	8.69	1.34	12.67	12.78
4777	13.66	3.09	29.05	29.09
4778	12.09	3.1	28.53	29.85
4779	13.38	3.83	28.86	30.7
4780	11.43	3.36	29.31	31.27
4781	11.13	2.96	27.68	27.98
4782	11.91	3.47	27.33	28.22
4783	12.09	3.15	29.67	29.64
4784	9.51	1.97	30.04	30.69
4785	8.69	1.6	20.39	20.32
4786	9.22	2.07	27.98	27.05
4787	11.26	2.96	28.53	26.67
4788	11.39	2.52	27.99	26.82
4789	6.93	1.42	14.17	13.32
4790	9.24	2.35	26.41	23.97
4791	9.19	2.14	26.69	24.75
4792	7.21	1.51	18.47	14.51
4793	7.83	1.84	28.64	24.19
4794	6.79	1.94	29.29	25.11
4795	7.77	2.16	28.99	25.28
4796	7.18	2.46	15.12	18.75
4797	11.73	3.25	26.5	28.45
4798	6.75	1.39	17.96	20.43
4799	8.05	1.67	28.02	24.9
4800	9.61	2.8	28.82	26.98
4801	11.95	3.35	31.9	29.68
4802	11.14	3.31	33.4	31.84
4803	11.46	3.6	34.31	32.47
4804	7.89	1.74	18.99	17.78
4805	11.07	2.78	30.13	28.8
4806	10.5	2.58	31.76	29.92
4807	11.22	2.94	30.82	28.5
4808	10.23	2.42	30.83	30.03
4809	9.9	2.87	31.85	30.1
4810	6.02	1.28	19.51	18.97
4811	12.38	4.18	34.25	32.03

4812	12.67	3.99	37.31	34.21
4813	11.42	3.31	35.62	32.56
4814	11.61	3.54	37.63	34.54
4815	11.81	3.81	36.33	31.86
4816	5.41	1.39	5.98	12.28
4817	12.38	3.63	32.46	27.7
4818	11.1	3.47	33.99	31.73
4819	10.06	3.08	33.94	32.82
4820	10.55	3.21	34.78	32.15
4821	9.7	2.76	32.83	28.8
4822	10.98	3.14	32.34	30.32
4823	8.84	2.4	33.05	30.85
4824	5.79	1.27	9.08	8.8
4825	12.46	3.18	38.82	31.36
4826	13.81	3.46	39.24	29.62
4827	13.87	3.94	37.02	31.73
4828	14.42	4.03	38.08	32.63
4829	14.2	3.98	38.72	35.15
4830	13.67	3.84	38.36	33.59
4831	15.06	4.39	39.02	32.61
4832	9.99	1.92	26.71	20.42
4833	12.51	2.84	39.69	34.59
4834	13.97	3.69	37.98	31.8
4835	14.13	4.18	38.24	33.38
4836	12.57	2.94	37.2	32.42
4837	11.54	3.12	38.33	32.87
4838	13.63	3.22	39.05	31.12
4839	11.41	2.63	38.19	33.2
4840	7.97	1.99	24.97	20.55
4841	10.46	2.85	35.21	30.67
4842	10.91	3.51	35.73	32.49
4843	9.43	2.58	34.4	27.64
4844	7.14	2.33	35.28	27.01
4845	9.08	2.54	33.44	27.21
4846	8.99	2.55	32.51	27.62
4847	9.78	1.81	32.71	27.55
4848	10.46	2.28	32.45	26.38
4849	13.49	3.21	31.39	26.17
4850	11.63	2.11	32.29	26.07
4851	12.37	2.06	32.06	26.5
4852	13.98	2.36	32.64	24.83
4853	6.05	0.96	6.06	4.99
4854	10.65	1.49	25.73	16.5
4855	12.11	2.3	36.09	27.26
4856	14.89	3.07	32.6	25.19
4857	8.61	1.09	9.78	6.4
4858	14.23	3.51	31.19	30.54
4859	14.3	3.42	32.47	30.25
4860	14.02	3.42	31.1	30.75
4861	13.73	3.37	32.08	31.34
4862	10.42	1.9	33.96	30.33

4863	9.54	1.88	33.83	27.76
4864	1.09	0.27	6.71	-2.4
4865	19.08	1.86	36.31	25.14
4866	20.09	2.68	34.93	24.66
4867	20.86	2.61	35.01	24.81
4868	20.09	2.54	35.89	27.21
4869	18.33	1.71	34.93	26.2
4870	18.44	1.61	35.44	25.32
4871	17.11	1.14	35.24	25.13
4872	19.19	2.15	33.72	23.36
4873	18.47	1.67	34.25	24.16
4874	18.58	1.81	34.61	25.94
4875	18.31	1.55	37	26.23
4876	18.94	1.68	38.58	24.19
4877	20.25	2.52	38.5	25.14
4878	20.68	2.33	38.21	25.1
4879	20.2	2.41	38.45	25.35
4880	19.72	1.91	39.37	25.88
4881	19.09	1.6	40.1	25.23
4882	10.91	1.01	13.69	7.44
4883	23.65	4.92	44.67	30.02
4884	24.82	3.83	44.63	26.76
4885	22.83	3.15	46.26	29.5
4886	23.14	3.51	46.79	31.04
4887	23.9	3.16	45.14	27.64
4888	23.39	3.21	44.57	28.59
4889	21.77	2.6	34.1	25.4
4890	21.71	2.83	33.57	25.57
4891	23.07	2.91	36.51	25.71
4892	23.33	3.39	36.16	26.94
4893	22.35	2.7	36.8	27.35
4894	22.26	3.06	36.69	27.71
4895	22.03	2.54	35.07	27.23
4896	21.19	2.36	37.81	27.86
4897	12.09	0.36	3.67	4.77
4898	22.11	2.66	33.89	21.51
4899	22.48	3.42	33.77	23.58
4900	17.91	1.28	21.77	16.2
4901	21.84	2.53	33.51	20.41
4902	22.07	2.95	31.56	16.43
4903	22.77	3.12	28.86	17.86
4904	22.46	3.05	29.61	16.82
4905	22.42	3.31	29.64	16.99
4906	22.06	2.73	32.89	20.92
4907	22.15	3.01	34.66	20.67
4908	22.23	2.73	32.4	17.95
4909	21.87	2.48	31.56	16.46
4910	21.91	2.99	31.82	18.36
4911	12.89	0.63	6.74	-3.87
4912	20.8	1.95	23	11.84
4913	21.44	2.5	22.82	12.68

4914	20.31	1.55	25.08	16.61
4915	21.38	2.41	24.42	13.89
4916	21.1	2.28	26.17	19.21
4917	23.66	2.97	23.8	15.97
4918	10.4	0.58	4.15	1.51
4919	19.97	1.81	23.39	13.69
4920	21.73	1.74	23.6	11.75
4921	21.49	2.28	25.3	14.66
4922	21.79	2.05	24.36	13.81
4923	21.66	1.94	23.66	13.48
4924	21.07	2.01	23.42	15.98
4925	19.85	1.59	28.4	17.48
4926	21.7	2.1	26.17	15.78
4927	21.64	2.14	26.57	15.53
4928	16.2	0.95	-0.99	-3.45
4929	22.65	2.35	28.04	11.05
4930	22.34	2.28	27.94	16.06
4931	20.91	2.17	30.08	17.35
4932	22.5	2.12	25.39	12.62
4933	20.92	1.8	24.63	15.78
4934	22.32	2.39	26.01	13.22
4935	22.3	2.05	23.81	12.39
4936	22.53	2.45	24.61	15.18
4937	21.86	2.12	24.37	14.36
4938	21.91	1.82	24.73	12.22
4939	21.92	2.1	24.67	14.33
4940	15.13	0.65	10.86	-0.93
4941	20.56	1.53	18.57	12.81
4942	20.2	1.66	22.09	15.91
4943	21.52	2.26	20.43	14.6
4944	21.66	2.14	19.52	13.34
4945	21.71	2.4	21.48	16.86
4946	22.4	2.73	26.07	20.59
4947	22.45	2.92	24.76	17.71
4948	22.76	2.64	27.08	19.68
4949	21.64	2.36	27.25	19.95
4950	22.31	2.45	28.29	18.58
4951	23.56	2.75	27.42	18.06
4952	22.31	2.83	28.28	19.17
4953	22.93	2.34	25.03	14.93
4954	22.68	2.26	26.03	14.23
4955	12.15	0.76	7.39	3.41
4956	20.25	1.88	26.29	17.77
4957	20.61	2.25	27.14	15.52
4958	22.04	1.49	24.02	10.69
4959	20.46	1.82	21.36	14.2
4960	21.45	1.74	22.91	14.11
4961	20.99	1.98	27.37	21.2
4962	21.35	2.43	29.74	21.53
4963	23.27	2.69	25.83	15.28
4964	18.36	0.78	6.72	1.43

4965	22.76	1.78	20.76	10.08
4966	21.96	1.62	19.6	11.67
4967	21.45	1.45	19.84	11.59
4968	21.13	1.91	20.09	13.17
4969	14.96	0.74	10.3	-2.34
4970	21	2.14	21.41	14.42
4971	22.47	2.02	21.87	14.04
4972	21.12	1.79	19.16	13.43
4973	22.41	3	21.34	17.86
4974	23.63	3.21	24.98	17.72
4975	23.93	3.31	24.93	18.9
4976	24.39	3.07	22.95	16.78
4977	23.98	2.76	26.24	16.93
4978	23.49	3.45	23.52	20.42
4979	24.38	3.34	25.76	21.37
4980	25.03	3.47	28.99	22.44
4981	25.31	3.09	29.4	18.39
4982	24.46	3.48	26.13	18.69
4983	25.44	2.99	26.33	15.56
4984	24.85	2.75	26.54	15.76
4985	11.25	0.78	10.12	7.18
4986	21.08	3.47	24.31	21.21
4987	24	2.45	24.76	13.74
4988	17.74	0.56	7.58	-0.68
4989	20.7	2	18.77	10.09
4990	21.44	2.25	22.68	12.01
4991	22.73	2.45	29.43	18.75
4992	22.46	3.26	29.62	18.92
4993	24.21	3.39	28.33	17.36
4994	23.85	3.52	26.42	18.28
4995	23.47	2.79	27.95	18.64
4996	22.97	3.03	29.7	20.05
4997	23.09	3.01	27.96	19.04
4998	15.31	0.91	11.65	0
4999	23.22	4.17	34.18	22.29
5000	25.84	3.75	40.11	23.86
5001	24.64	3.78	39.27	27.22
5002	26.66	3.72	39.42	25.78
5003	18.74	1.27	15.51	4.9
5004	28.45	4.01	40.22	21.77
5005	25.36	3.85	40.13	29.3
5006	27.34	4.21	39.71	25.61
5007	27.47	3.76	37.88	23.04
5008	25.09	3.23	35.95	22.43
5009	25.27	3.2	36.42	25.68
5010	25.43	3.59	39.68	26.13
5011	21.09	1.54	14.71	5.14
5012	23.74	3.57	37.01	27.74
5013	24.93	3.44	37.06	24.4
5014	25.34	3.36	39.5	26.37
5015	25.19	3.29	40.05	24.64

5016	11.91	1.03	13.39	0.32
5017	23.72	2.73	35.51	24.54
5018	23.28	3.06	38.44	27.33
5019	24.27	3.48	39.2	26.12
5020	25.81	4.03	38.22	26.15
5021	25.16	4.05	38.37	27
5022	25.44	4.05	38.35	25.38
5023	26.13	4.44	38.9	27.48
5024	26.74	4.17	38.6	24.89
5025	24.78	3.86	36.06	26.52
5026	24.68	3.27	36.02	22.95
5027	14.1	1.01	4.75	6.98
5028	25.46	4.24	34.34	26.51
5029	27.32	4.02	36.81	25.43
5030	26.32	4.67	34.45	25.23
5031	29.42	5.22	34.74	23.7
5032	27.88	4.91	35.71	27.33
5033	28.43	4.15	35.25	27.48
5034	27.28	4.63	34.55	27.18
5035	27.3	4.04	34.91	24.1
5036	24.37	2.28	25.91	14.75
5037	24.41	4.27	35.15	29.06
5038	20.77	1.26	16.81	5.84
5039	23.76	4.71	33.51	28.69
5040	25.92	4.27	35.18	26.36
5041	14.99	0.94	9.54	-1.3
5042	24.17	4.38	33.29	28.5
5043	26.79	4.5	35.14	27.59
5044	26.65	4.27	36.5	28.7
5045	25.88	3.37	38.45	26.86
5046	28.92	4.41	36.83	26.01
5047	26.34	4.54	34.62	26.62
5048	28.5	4.66	36.88	28.07
5049	25.9	3.28	29.77	18.18
5050	23.59	2.67	30.86	21.69
5051	19.54	1.5	9.55	7.12
5052	23.15	3.12	29.49	22.02
5053	24.82	3.01	29.19	20.88
5054	23.49	2.98	31.03	25.13
5055	14.54	1.01	8.8	5
5056	23.74	3.02	28.86	22.49
5057	22.72	2.74	29.73	20.93
5058	22.7	2.61	27.09	18.72
5059	23.92	2.81	25.92	16.7
5060	22.98	2.5	26.81	20.61
5061	23.08	2.35	26.91	18.45
5062	22.67	2.34	24.19	17.01
5063	22.99	2.35	26.99	19.26
5064	23.43	2.93	26.5	20.41
5065	23.56	2.18	25.33	17.73
5066	22.46	2.45	28.1	21.85

5067	23.4	2.49	28.49	18.59
5068	23.39	2.97	28.41	21.11
5069	11.69	1.3	17.95	4.74
5070	23.57	3.09	27.02	20.15
5071	23.51	2.59	27.48	16.04
5072	23.05	2.46	27.38	17.85
5073	23.38	2.69	27.56	18.63
5074	23	2.37	27.43	17.6
5075	23.39	2.5	29.45	19.69
5076	22.28	2.24	28.15	17.67
5077	23.19	2.6	27.78	18.07
5078	23.06	2.12	28.31	16.75
5079	22.14	2.26	27.13	17.33
5080	22.71	2.31	27.82	17.3
5081	22.19	2.13	26.79	16.37
5082	22.35	2.11	27.27	16.78
5083	22.3	2.18	27.38	17.4
5084	13.74	0.82	6.97	2.25
5085	21.82	2.43	23.81	16.97
5086	22.54	2.29	23.45	16.68
5087	22.11	2.46	22.37	17.06
5088	21.99	2.27	24.32	17.51
5089	17.11	0.46	5.31	0.62
5090	20.96	2.19	19.68	14.23
5091	22.63	2.77	25.29	18.31
5092	22.72	2.68	24.33	18.36
5093	18.41	0.84	8.21	3.29
5094	21.67	2.68	21.68	17.78
5095	23.05	2.98	25.04	19.3
5096	23.06	3.06	25.43	19.59
5097	22.52	2.63	24.96	19.71
5098	22.71	2.42	23.73	17.6
5099	14	0.78	4.69	5.07
5100	20.37	1.77	25.36	15.42
5101	19.9	1.5	19.65	13.89
5102	21.98	2.37	23.42	16.46
5103	21.6	2.35	23	15.24
5104	21.7	2	21.66	14.88
5105	22.39	2.29	22.68	14.65
5106	21.99	2.05	22.56	15.53
5107	18.02	0.63	4.13	0.06
5108	21.16	1.7	23.73	13.24
5109	20.96	1.71	23.9	14.92
5110	21.18	1.84	23.31	13.93
5111	21.27	1.76	22.22	13.49
5112	20.52	1.69	23.01	14.18
5113	13.52	1.01	-3.59	0.37
5114	20.57	1.53	21.28	12.06
5115	19.9	1.42	19.9	13.08
5116	20.24	1.69	20.11	13.3
5117	19.67	1.25	18.68	11.33

5118	19.71	1.14	25.64	15.58
5119	21.67	2.07	26.41	14.48
5120	22.4	3.24	27.1	14.5
5121	23.59	2.44	26.01	14.79
5122	21.23	1.36	27.44	14.41
5123	20.87	1.83	29.02	16.14
5124	20.72	1.63	28.55	16.54
5125	20.22	1.17	28.76	17.23
5126	20.59	1.78	28.34	17.87
5127	23.18	2.08	24.34	13.5
5128	20.79	1.8	28.16	17.39
5129	14.66	0.64	7.66	6.23
5130	23.29	2.54	28.45	14.68
5131	23.1	3.23	29.6	13.73
5132	23.32	2.47	31.26	17.48
5133	21.92	2.19	31.3	17.92
5134	23.91	3.02	29.73	13.77
5135	23.9	2.38	31.45	17.7
5136	22.39	1.9	36.05	19.08
5137	21.96	2.31	36.24	21.29
5138	23.65	2.57	35.64	20.16
5139	22.61	2.28	36.71	21.7
5140	22	2.04	37.85	21.75
5141	22.33	2.16	38.31	17.8
5142	16.18	1.14	12.75	1.47
5143	19.59	3.71	20.46	18.7
5144	23.65	3.61	28.63	20.99
5145	25.08	2.95	29.21	18.16
5146	23.34	2.88	29.98	21.3
5147	25.7	2.78	23.87	13.12
5148	25.1	3.36	23.36	13.68
5149	23.76	3.08	30.45	23.13
5150	27.59	4.23	28.78	22.26
5151	25.53	3.08	28.87	23.56
5152	23.95	2.14	35.4	30.38
5153	24.69	2.13	37.71	32.57
5154	24.71	2.28	35.43	31.39
5155	17.77	1.57	16.51	18.45
5156	22.83	2.31	35.92	26.2
5157	27.36	4.35	33.34	22.83
5158	28.41	3.7	28.24	15.21
5159	24.42	2.87	26.07	19.27
5160	23.67	2.56	36.77	29.58
5161	25.43	2.38	24.41	12.95
5162	25.43	2.89	28.81	25.42
5163	25.43	2.79	25.29	22.6
5164	25.43	3.25	23.77	20.08
5165	25.43	3.8	24.12	21.45
5166	25.43	3.28	22.48	20.88
5167	25.43	2.25	26.89	23.42
5168	25.43	2.27	26.88	24.01

5169	25.43	1.69	30.26	23.91
5170	25.43	1.7	32.14	25.11
5171	25.43	1.6	23.92	22.63
5172	25.43	2.61	30.08	15.05
5173	25.43	2.29	25.21	14.67
5174	25.43	2.37	24.14	16.61
5175	25.43	2.28	26.33	16.26
5176	25.43	1.77	25.44	10.55
5177	25.43	2.78	31.4	17.95
5178	25.43	2.1	32.99	21.76
5179	22.17	1.54	35.33	23.22
5180	20.39	1.19	24.02	16.09
5181	23.91	2.43	29.24	17.1
5182	23.73	2.48	25.78	15.36
5183	23.86	2.73	25.18	13.11
5184	23.27	2.24	25.67	13.48
5185	20.69	1.09	28.21	16.8
5186	15.71	0.79	10.11	1.11
5187	21.99	2.02	30.84	18.65
5188	22.5	1.91	29.4	17.44
5189	23.54	2.51	29.77	18.65
5190	25.79	3.66	25.88	14.79
5191	25.92	3.77	26.92	13.67
5192	27.05	4.34	25.73	15.93
5193	26.72	3.49	26.08	13.25
5194	23.92	2.33	25.87	16.18
5195	23.75	2.71	27.97	17.64
5196	26.02	3.4	25.96	15.86
5197	23.3	2.42	28.02	15.91
5198	24.22	2.62	27.18	15.63
5199	24.54	3.03	27.84	14.47
5200	16.14	1.74	9.84	6.35
5201	24.96	3.77	28.47	12.11
5202	27.13	3.45	26.74	8.88
5203	25.82	3.73	26.87	12.98
5204	28.01	4.07	28.32	15.81
5205	27.88	3.29	26.93	11.82
5206	26.49	3.59	30.47	14.07
5207	26.85	3.1	29.66	16.48
5208	24.78	2.65	29.06	15.42
5209	23.79	3.43	28.32	14.32
5210	23.51	2.72	29.67	15.13
5211	24.23	2.62	27.15	11.86
5212	22.94	2.24	19.07	9.95
5213	15.09	1.03	13.48	0.41
5214	23.58	3.33	27.69	15.25
5215	24.18	2.8	28.99	14.25
5216	24.39	2.63	31.19	16.97
5217	23.21	2.25	29.9	17.35
5218	21.15	1.26	23.5	10.29
5219	21.84	1.71	33.53	18

5220	21.93	1.5	33.75	17.75
5221	8.78	1.35	-3.25	12.36

Profundidade	RPM Superfície	RPM Poço	MSE Superfície	MSE Poço
4663	62	77	11443.45	2617.46
4664	81	134	33652.85	5442.07
4665	40	160	3221.44	7928.71
4666	1	152	5.05	6400.17
4667	132	165	23996.96	5856.01
4668	99	121	19826.96	4359.14
4669	119	166	47164.22	7569.60
4670	150	165	40765.24	4786.16
4671	151	166	29429.64	4375.79
4672	155	174	65136.00	10103.60
4673	155	161	65136.00	4726.49
4674	155	183	65136.00	6237.97
4675	169	157	2353.54	334.74
4676	192	161	75899.96	6528.27
4677	158	161	73501.26	6480.62
4678	157	158	53160.91	5636.05
4679	97	159	79018.55	9393.33
4680	100	107	38266.18	3218.58
4681	146	159	24407.40	4704.19
4682	136	155	12968.24	2883.13
4683	115	159	13559.07	3423.31
4684	105	161	12476.83	3519.17
4685	127	157	17082.18	3717.73
4686	110	124	24814.07	2557.72
4687	141	162	21824.15	3902.07
4688	140	156	18613.65	3972.20
4689	145	158	18065.01	3689.17
4690	148	161	64690.38	11462.16
4691	148	163	########	17838.13
4692	144	160	24122.76	4872.12
4693	145	164	29436.61	6145.77
4694	144	163	18049.88	4753.07
4695	146	162	36022.81	7211.53
4696	143	161	25276.36	6618.81
4697	140	156	13410.41	4154.03
4698	141	161	26066.67	7166.19
4699	123	151	30970.80	7020.44
4700	154	151	32079.61	4977.52
4701	122	135	34422.37	6226.78
4702	119	132	24833.87	5769.31
4703	112	127	12421.05	3380.80
4704	114	120	15528.77	3781.78
4705	114	120	12402.32	3095.31
4706	115	125	7134.23	1729.22

4707	114	123	9926.12	2785.97
4708	61	91	5228.75	788.71
4709	128	138	13813.56	3372.19
4710	130	146	17335.20	4165.14
4711	131	142	17641.68	5074.43
4712	133	145	11141.71	3182.76
4713	133	149	10861.11	3491.34
4714	131	152	16465.15	5037.77
4715	131	151	13193.72	4853.09
4716	131	150	10989.69	3936.50
4717	132	140	9955.28	3738.82
4718	132	144	12733.08	4065.24
4719	140	154	11724.51	4090.07
4720	147	166	11073.45	3503.27
4721	149	165	11542.33	3532.85
4722	149	160	12164.28	3956.10
4723	146	168	10842.15	3526.02
4724	147	164	8258.74	2617.99
4725	142	162	9674.43	3528.17
4726	138	158	7693.86	2860.16
4727	142	164	9431.84	3220.47
4728	131	168	9309.48	3383.99
4729	108	157	15172.20	6256.05
4730	131	164	12389.15	3918.75
4731	143	168	14137.19	4352.56
4732	185	170	25324.25	5741.66
4733	232	162	33351.12	5476.84
4734	242	172	42674.73	5738.65
4735	177	169	30492.16	5846.03
4736	125	165	13558.30	4224.58
4737	81	91	1714.04	464.18
4738	85	140	4656.28	2658.91
4739	87	148	5665.74	2761.06
4740	136	147	9993.79	3155.56
4741	135	123	11787.75	3013.86
4742	123	150	10455.63	3454.84
4743	102	136	9296.64	3075.57
4744	113	89	17879.08	1630.84
4745	109	99	13876.42	1305.37
4746	132	111	37873.63	7119.26
4747	130	114	20666.77	3876.93
4748	136	116	45070.03	6245.13
4749	110	112	28262.92	4832.98
4750	66	79	14630.37	3676.45
4751	96	79	11440.48	2450.12
4752	95	81	10862.36	2301.24
4753	121	107	11492.54	2632.15
4754	125	92	17479.78	2371.53
4755	94	69	23889.42	3403.72
4756	68	44	18332.52	1623.35
4757	109	98	17137.07	3771.68

4758	111	114	15524.13	3599.81
4759	123	120	19362.50	4348.34
4760	123	97	21395.45	3788.69
4761	134	127	21357.65	3807.66
4762	136	139	19291.37	4077.50
4763	134	144	11168.73	3020.40
4764	131	141	12745.61	3214.55
4765	134	144	17035.68	3935.78
4766	132	138	12683.40	2820.78
4767	61	88	7752.37	2369.94
4768	116	109	11540.68	2938.26
4769	114	116	13773.17	3573.25
4770	65	70	6026.98	985.00
4771	108	133	10522.79	2510.33
4772	108	135	13611.09	3815.91
4773	92	168	10860.12	4127.82
4774	98	142	13028.94	4154.18
4775	105	133	18204.24	4712.80
4776	65	82	8507.87	1656.57
4777	97	110	14311.16	3674.39
4778	98	94	16857.53	4149.43
4779	95	88	9864.17	2618.99
4780	97	119	10054.06	3628.94
4781	97	120	13200.29	4345.82
4782	111	127	12678.90	4229.35
4783	117	149	13362.18	4436.61
4784	93	148	27001.40	8904.35
4785	72	125	15365.01	4913.52
4786	94	162	23995.32	9286.81
4787	140	145	16832.28	4585.68
4788	154	157	18245.95	4118.56
4789	103	135	16521.85	4438.63
4790	136	165	23579.76	7278.16
4791	148	163	25269.37	6483.33
4792	179	106	22777.88	2826.76
4793	207	158	54162.91	9717.89
4794	138	159	27139.80	8936.53
4795	136	155	17251.04	5468.04
4796	126	154	8163.25	3420.26
4797	216	158	16393.24	3325.86
4798	136	134	21693.06	4403.98
4799	136	161	37933.02	9318.60
4800	167	139	18276.07	4435.15
4801	201	131	18017.98	3295.55
4802	205	126	20442.69	3737.19
4803	203	128	23422.60	4643.29
4804	141	107	24639.29	4125.67
4805	110	149	16376.94	5573.65
4806	110	157	14531.14	5098.90
4807	110	150	13330.80	4765.93
4808	111	154	17429.62	5723.36

4809	111	149	16686.35	6496.03
4810	66	113	8073.74	2940.93
4811	84	115	7514.69	3476.07
4812	90	130	8579.93	3905.42
4813	95	147	11350.68	5093.18
4814	92	145	8101.91	3895.95
4815	91	152	9371.09	5051.56
4816	52	56	5536.19	1533.43
4817	75	149	6232.04	3631.60
4818	75	149	9115.89	5663.07
4819	75	146	11217.45	6687.45
4820	80	153	10837.28	6308.08
4821	86	157	11811.36	6137.09
4822	93	142	12144.70	5305.39
4823	107	154	21285.58	8319.96
4824	65	95	7872.73	2524.71
4825	105	150	15114.28	5513.17
4826	114	160	14006.48	4927.59
4827	118	141	12008.54	4078.98
4828	116	147	10184.51	3609.80
4829	112	143	12946.83	4636.33
4830	103	162	13644.01	6030.61
4831	110	150	8667.79	3448.01
4832	95	108	19707.45	4308.10
4833	124	150	21688.96	5959.74
4834	129	151	17890.97	5534.60
4835	130	143	13618.68	4434.74
4836	132	156	18820.47	5205.58
4837	126	154	17740.17	5865.17
4838	132	148	20124.57	5333.68
4839	124	137	28540.29	7271.72
4840	94	88	13061.33	3055.27
4841	115	140	17467.59	5796.81
4842	103	147	13170.84	6049.90
4843	84	160	11049.95	5759.95
4844	83	156	10870.73	6668.30
4845	91	157	11969.23	5778.26
4846	91	154	12837.64	6164.13
4847	97	153	14562.33	4253.68
4848	94	153	13069.35	4639.05
4849	121	144	9362.70	2653.96
4850	128	147	17125.88	3571.20
4851	119	154	23095.46	4980.27
4852	109	157	16089.18	3914.64
4853	59	149	3299.95	1322.77
4854	106	123	29517.57	4793.84
4855	121	152	18111.94	4324.01
4856	126	158	13365.11	3457.94
4857	84	81	5666.06	692.47
4858	118	132	11199.70	3093.58
4859	106	142	10826.36	3471.57

4860	103	140	8300.37	2755.17
4861	89	138	8728.61	3324.81
4862	115	152	23583.02	5687.01
4863	127	155	20800.99	5005.83
4864	10	76	198.29	371.04
4865	123	144	43743.85	4995.53
4866	123	144	27153.62	4243.59
4867	122	148	20189.66	3067.39
4868	121	134	28966.08	4058.99
4869	120	139	41547.93	4493.04
4870	124	142	62083.85	6210.66
4871	125	146	79989.68	6228.23
4872	122	139	30258.54	3865.33
4873	126	142	49225.90	5019.13
4874	126	139	52258.99	5619.46
4875	126	145	55681.18	5427.75
4876	115	156	27460.81	3307.14
4877	125	161	26673.88	4278.24
4878	133	159	27544.53	3713.09
4879	132	161	24852.80	3619.49
4880	114	164	34786.81	4850.13
4881	98	160	34085.44	4667.15
4882	57	126	21415.07	4383.09
4883	114	134	7615.39	1865.05
4884	128	158	13754.16	2622.59
4885	98	178	15247.43	3823.84
4886	90	169	15181.91	4326.93
4887	92	181	14461.64	3764.19
4888	81	177	10547.41	3165.34
4889	79	179	12361.31	3347.49
4890	82	170	12446.86	3366.20
4891	97	188	11483.14	2809.83
4892	114	171	11711.58	2555.50
4893	121	184	21514.83	3955.44
4894	141	174	17729.68	3010.86
4895	151	174	22692.57	3018.29
4896	157	180	38503.20	4919.88
4897	52	18	4945.11	51.68
4898	142	162	23181.04	3184.17
4899	130	156	15413.98	2816.61
4900	84	119	31237.30	3164.77
4901	125	160	23257.60	3450.91
4902	124	162	10280.11	1796.82
4903	134	172	9827.68	1730.40
4904	134	162	9122.24	1499.41
4905	132	154	8184.62	1411.51
4906	143	170	15309.12	2254.67
4907	151	160	18010.36	2595.68
4908	155	154	11670.18	1426.03
4909	154	167	12872.90	1584.86
4910	136	155	10321.66	1607.36

4911	66	153	2401.90	271.45
4912	92	173	8704.09	1535.61
4913	99	159	6134.47	1150.08
4914	93	176	9035.36	1306.90
4915	98	166	7549.53	1442.87
4916	90	169	10149.38	2061.46
4917	97	157	5727.99	1165.45
4918	53	60	2061.98	130.37
4919	137	148	17441.12	1709.42
4920	153	166	14490.19	1260.32
4921	118	168	7258.05	1097.96
4922	128	165	9690.19	1176.80
4923	152	164	13087.23	1266.38
4924	175	164	13376.73	1197.95
4925	177	172	32962.15	2567.99
4926	177	166	17369.63	1578.47
4927	169	155	15614.10	1418.14
4928	92	92	70136.32	4112.43
4929	178	160	15481.58	1445.09
4930	152	163	14083.18	1543.28
4931	126	164	22719.12	3070.80
4932	138	174	9242.00	1099.40
4933	123	165	13433.24	1552.43
4934	133	171	10640.71	1466.38
4935	150	169	9690.44	1005.15
4936	177	158	10819.91	1052.21
4937	177	177	12404.16	1204.76
4938	179	172	10765.18	860.79
4939	176	170	10940.38	1014.19
4940	123	170	29857.08	1772.59
4941	168	171	17512.10	1328.16
4942	166	173	21768.49	1866.43
4943	177	162	13207.39	1271.37
4944	159	158	12607.02	1239.44
4945	146	164	11411.28	1419.14
4946	133	159	19408.41	2830.32
4947	131	158	13605.43	2136.41
4948	147	169	17321.62	2312.28
4949	168	168	25040.65	2733.40
4950	182	161	21883.45	2128.24
4951	187	162	12075.60	1223.35
4952	190	159	17948.24	1907.67
4953	190	179	8663.56	834.80
4954	191	167	9298.11	811.90
4955	95	90	4250.20	252.31
4956	184	158	46045.37	3673.12
4957	184	159	15366.32	1451.56
4958	180	169	14155.84	899.88
4959	185	156	14734.19	1107.09
4960	182	153	12579.32	859.70
4961	183	151	26883.04	2095.31

4962	187	165	44737.78	4495.65
4963	178	170	13100.42	1448.20
4964	102	89	19879.50	737.09
4965	156	184	8343.46	770.86
4966	168	166	11654.82	851.08
4967	148	177	13012.51	1053.49
4968	138	171	10098.95	1132.80
4969	104	172	13017.72	1064.48
4970	129	170	8851.02	1190.36
4971	129	163	8445.11	961.02
4972	119	166	9677.46	1145.82
4973	113	151	4999.77	896.49
4974	111	168	4791.01	986.92
4975	102	164	5657.41	1260.19
4976	92	157	5045.74	1085.61
4977	94	161	4464.03	881.76
4978	98	175	5814.71	1527.15
4979	107	157	4659.75	939.10
4980	123	156	5442.41	959.52
4981	127	150	6285.27	908.43
4982	127	167	6787.41	1271.87
4983	126	143	6256.54	836.35
4984	126	165	7247.52	1052.07
4985	66	94	3214.49	318.35
4986	118	137	5697.48	1091.36
4987	117	162	6060.59	858.17
4988	73	88	10771.46	409.75
4989	98	159	8848.85	1388.20
4990	102	167	8286.04	1424.92
4991	124	163	19157.64	2716.58
4992	122	155	13286.50	2452.15
4993	124	159	6580.14	1183.28
4994	125	149	6191.12	1091.22
4995	126	171	9701.97	1567.34
4996	127	162	14595.71	2458.19
4997	126	160	8894.44	1474.50
4998	77	166	4637.64	594.04
4999	134	166	11333.74	2523.64
5000	130	159	7404.43	1316.77
5001	130	156	9169.32	1690.98
5002	129	166	11040.56	1985.20
5003	84	159	6275.69	805.47
5004	118	157	11608.05	2179.03
5005	122	146	14291.81	2599.81
5006	119	157	8834.61	1797.45
5007	118	147	12815.12	2187.66
5008	123	158	10972.78	1817.02
5009	123	146	10434.58	1571.46
5010	123	148	8441.16	1436.76
5011	111	156	9581.70	983.85
5012	123	141	7094.75	1226.23

5013	121	151	9298.78	1603.92
5014	120	144	10978.16	1749.80
5015	120	154	11097.56	1862.77
5016	54	158	3569.63	902.80
5017	122	153	15164.57	2191.72
5018	123	148	13004.15	2059.90
5019	121	146	13906.57	2408.90
5020	118	150	12432.42	2470.42
5021	119	136	12502.05	2302.93
5022	119	134	12585.33	2258.88
5023	119	145	13713.35	2842.18
5024	116	148	19555.18	3893.38
5025	121	142	13861.38	2536.91
5026	119	152	17915.71	3034.55
5027	64	141	4612.39	728.82
5028	121	144	9963.15	1977.55
5029	121	147	11910.85	2132.03
5030	121	140	12173.15	2501.77
5031	116	145	13250.43	2941.18
5032	116	136	9290.05	1921.16
5033	113	143	11074.02	2048.80
5034	115	148	12489.98	2731.05
5035	118	148	13244.98	2461.02
5036	114	136	12926.89	1444.58
5037	103	139	9451.70	2234.35
5038	81	87	8982.14	585.97
5039	112	150	8711.55	2315.79
5040	119	141	15217.69	2973.31
5041	56	103	5839.32	673.14
5042	86	111	6897.57	1616.41
5043	89	122	9427.46	2173.64
5044	111	152	10930.79	2401.39
5045	89	156	17142.75	3915.44
5046	89	156	9061.49	2424.42
5047	82	168	7884.35	2786.36
5048	90	167	9460.28	2872.77
5049	103	139	13443.04	2299.42
5050	82	164	15928.16	3607.81
5051	65	98	10174.94	1178.54
5052	85	162	7610.16	1956.92
5053	95	169	11433.72	2468.87
5054	80	154	12387.31	3027.73
5055	57	124	4912.30	742.86
5056	103	154	14417.99	2744.84
5057	106	158	20033.79	3603.61
5058	101	168	11647.04	2229.53
5059	96	165	8523.88	1722.77
5060	84	165	7256.59	1552.92
5061	77	170	7561.04	1701.55
5062	74	167	6555.06	1528.65
5063	78	165	7927.68	1716.22

5064	97	155	10205.97	2041.69
5065	129	172	11141.21	1376.71
5066	156	165	16356.21	1889.90
5067	163	161	18429.42	1939.35
5068	164	173	14474.45	1941.37
5069	72	167	7383.14	1904.40
5070	135	160	13403.48	2084.97
5071	146	166	12318.78	1544.90
5072	147	161	18744.75	2193.24
5073	144	164	14799.50	1941.50
5074	144	170	14380.01	1751.44
5075	143	168	11928.71	1500.27
5076	136	170	15789.30	1986.40
5077	143	176	16373.56	2261.52
5078	141	173	15305.22	1728.43
5079	144	164	13164.67	1532.58
5080	147	179	11022.26	1367.29
5081	150	169	15248.31	1651.08
5082	149	169	16201.79	1736.95
5083	150	165	14217.34	1531.00
5084	74	82	5244.61	347.10
5085	143	167	16348.91	2128.35
5086	146	161	15659.42	1756.51
5087	148	154	18390.17	2131.24
5088	147	164	9403.37	1085.15
5089	75	76	12241.65	333.57
5090	133	153	16333.02	1964.95
5091	137	164	14778.15	2167.58
5092	140	156	18812.18	2474.91
5093	98	100	10748.39	500.86
5094	142	157	13318.79	1823.39
5095	138	146	14501.51	1985.87
5096	138	152	16222.68	2373.47
5097	139	154	24520.89	3175.17
5098	139	157	19722.59	2376.02
5099	78	158	22424.66	2531.46
5100	148	162	57325.43	5454.28
5101	146	165	35904.39	3060.38
5102	143	161	20265.48	2462.22
5103	145	166	12117.54	1511.12
5104	138	167	16947.81	1892.12
5105	137	166	14498.75	1798.57
5106	137	164	20674.69	2309.17
5107	80	171	13613.99	1017.33
5108	145	173	28130.67	2698.08
5109	148	168	48394.81	4483.69
5110	148	166	29310.60	2857.77
5111	147	158	25779.38	2294.47
5112	149	166	44733.41	4106.33
5113	84	161	20103.70	2878.64
5114	123	141	17175.87	1466.03

5115	125	139	37763.88	2998.24
5116	124	135	35258.63	3206.90
5117	121	136	61374.46	4385.25
5118	80	162	41419.10	4853.02
5119	87	153	15894.01	2671.54
5120	98	156	5322.12	1226.64
5121	119	148	9844.04	1268.05
5122	133	163	16665.52	1310.24
5123	146	162	33286.16	3240.57
5124	146	158	25693.03	2189.45
5125	147	162	63825.51	4072.32
5126	146	161	29682.29	2831.93
5127	141	166	13584.75	1436.76
5128	145	157	32741.40	3071.56
5129	71	173	7724.93	822.54
5130	139	149	13657.19	1598.30
5131	138	141	14651.85	2094.68
5132	136	154	13613.91	1634.85
5133	99	161	19004.01	3089.65
5134	90	170	5717.61	1365.10
5135	108	162	12802.05	1914.22
5136	99	167	17887.28	2562.58
5137	115	166	28023.26	4257.45
5138	137	160	18656.45	2370.06
5139	147	161	34068.93	3765.35
5140	140	160	63950.29	6779.72
5141	135	158	85550.15	9687.22
5142	79	121	9092.82	981.27
5143	99	152	3047.81	888.11
5144	138	144	12097.65	1929.36
5145	141	162	13814.59	1869.05
5146	135	162	36169.76	5358.25
5147	134	181	8083.06	1182.47
5148	128	157	7684.64	1263.24
5149	119	163	18273.11	3247.22
5150	123	138	17797.88	3064.06
5151	137	164	44589.44	6442.44
5152	172	198	63390.83	6524.35
5153	182	203	#########	13570.04
5154	165	204	76496.68	8730.80
5155	92	208	61141.79	12215.36
5156	155	172	70121.03	7876.51
5157	140	173	15078.50	2964.87
5158	137	168	7817.70	1250.13
5159	141	171	14612.51	2085.08
5160	141	164	76001.02	9564.34
5161	136	172	29372.43	3478.15
5162	136	159	33561.42	4462.35
5163	136	159	25735.32	3303.89
5164	136	158	12302.19	1829.05
5165	136	125	6837.14	941.75

5166	136	163	8399.85	1301.12
5167	136	167	17774.94	1934.24
5168	136	167	98641.59	10815.42
5169	136	181	########	9240.89
5170	136	180	95741.27	8474.34
5171	136	178	98641.15	8126.02
5172	136	175	19418.25	2566.16
5173	136	183	15946.82	1934.04
5174	136	181	15249.70	1893.52
5175	136	187	15442.86	1905.73
5176	136	183	14492.11	1358.50
5177	136	172	23254.98	3217.20
5178	136	185	34510.65	3879.37
5179	139	178	########	9800.76
5180	108	174	########	11354.64
5181	157	179	57142.71	6623.31
5182	159	180	42532.29	5033.93
5183	158	179	30243.44	3921.77
5184	159	173	22567.25	2365.24
5185	134	183	########	8224.55
5186	81	184	47277.42	5400.54
5187	100	171	39426.46	6195.19
5188	85	178	17974.44	3197.09
5189	82	176	28994.89	6637.48
5190	87	150	6812.29	1668.11
5191	82	143	3925.12	996.61
5192	91	152	4539.09	1217.80
5193	85	166	5887.20	1502.70
5194	83	176	9231.39	1908.38
5195	86	171	18518.01	4203.12
5196	102	165	12139.52	2567.55
5197	94	175	20049.87	3878.44
5198	109	168	17987.32	3000.66
5199	114	172	19507.85	3635.52
5200	76	187	10084.31	2675.53
5201	87	171	6760.56	2007.59
5202	107	167	5484.74	1089.11
5203	94	171	4977.11	1308.86
5204	94	173	5629.80	1506.77
5205	94	175	6783.39	1491.14
5206	80	179	4368.98	1325.54
5207	83	179	10202.77	2541.81
5208	83	188	11990.44	2905.67
5209	82	176	8274.63	2561.46
5210	86	180	9001.72	2180.98
5211	107	178	8133.22	1464.05
5212	113	182	15187.93	2389.65
5213	90	178	9366.20	1264.20
5214	144	173	15282.78	2594.48
5215	139	151	30966.61	3897.03
5216	117	171	32757.95	5164.43

5217	90	163	32590.49	5723.75
5218	77	167	30658.57	3962.38
5219	82	168	61670.89	9894.68
5220	85	169	61925.04	8423.41
5221	50	170	3645.19	1907.73