



## **ANÁLISE CRÍTICA DE VIBRAÇÕES EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO**

**JOÃO GABRIEL CARVALHO DE SIQUEIRA**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

Rio de Janeiro  
Maio de 2011

# ANÁLISE CRÍTICA DE VIBRAÇÕES EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO

João Gabriel Carvalho de Siqueira

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

Examinada por:

---

Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.  
Engenharia de Petróleo – POLI/COPPE - UFRJ

---

Prof. Alexandre Leiras Gomes, D.Sc.  
Engenharia de Petróleo – POLI/COPPE –UFRJ

---

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D.Sc.  
Engenharia de Petróleo – POLI/COPPE –UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
Maio de 2011

Siqueira, João Gabriel Carvalho

Análise Crítica de Vibrações em Colunas de Perfuração/  
João Gabriel Carvalho de Siqueira. – Rio de Janeiro: UFRJ/  
Escola Politécnica, 2011.

xi, 49 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Couto

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso  
de Engenharia de Petróleo, 2011.

Referências Bibliográficas: p..48-49

1. Perfuração de Poços de Petróleo. 2. Vibrações em  
Colunas de Perfuração. 3. Energia Mecânica Específica. I.  
Couto, Paulo *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Petróleo. III. Título.

## Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai, Edivaldo (*in memoriam*), pelo exemplo de coragem, dignidade, persistência e simplicidade.

## Agradecimentos

A Deus, por tornar tudo possível.

A minha família, pelo incentivo e apoio nos momentos de dificuldade.

A todos meus verdadeiros amigos, pelos momentos inesquecíveis e pela inesgotável compreensão.

A todos os professores do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em especial a Paulo Couto e Alexandre Leiras, pelo esforço e dedicação empregados ao repartirem seus conhecimentos e experiências profissionais.

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

## **Análise Crítica de Vibrações em Colunas de Perfuração**

João Gabriel Carvalho de Siqueira

Maio/2011

Orientador: Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

Curso: Engenharia de Petróleo

Este trabalho apresenta a metodologia de análise dos conceitos de Energia Mecânica Específica e “zona ótima”. Mostra-se como os modelos podem ser aplicados para otimizar o desempenho de poços de petróleo sujeitos a vibrações na coluna de perfuração e outras ineficiências. Por último, são feitas análises críticas dos conceitos discutidos com base em dados de campo apresentados, visando confirmar a aplicabilidade desses conceitos.

*Palavras-chave:* perfuração de poços de petróleo, vibrações em colunas de perfuração, energia mecânica específica.

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

## **Critical Analysis of Drill String Vibrations**

João Gabriel Carvalho de Siqueira

May/2011

Advisor: Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

Course: Petroleum Engineering

This paper presents a methodology for analysis of the concepts of Mechanical Specific Energy and "optimum zone". It shows how models can be applied to optimize the performance of oil wells exposed to drill string vibration and other inefficiencies. Finally, critical analyses of the concepts discussed are made based on field data presented, looking forward to confirm the applicability of these concepts.

*Keywords:* oil well drilling, drill string vibrations, mechanical specific energy.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>X</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO .....	2
<b>2 MECÂNICA DAS COLUNAS DE PERFURAÇÃO .....</b>	<b>4</b>
2.1 ESTÁTICA .....	4
2.1.1 Cargas.....	4
2.2 DINÂMICA .....	6
2.2.1 Modos de Vibração.....	6
2.2.1.1 Vibração Lateral ou Flexional .....	6
2.2.1.2 Vibração Torcional ou Rotacional .....	11
2.2.1.3 Vibração Axial ou Longitudinal.....	11
2.2.2 Associação entre Vibrações Torcionais e Vibrações Laterais .....	12
2.2.2.1 Zona Ótima.....	13
2.2.2.2 Modelo de Dinâmica Avançada de Coluna de Perfuração.....	15
<b>3 ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA.....</b>	<b>18</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	18
3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.2.1 Energia Específica de Perfuração.....	22
3.2.2 Teste de Drilloff .....	22
<b>4 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>29</b>
4.1 MODELO DE DINÂMICA AVANÇADA DE COLUNA DE PERFURAÇÃO .....	29
4.1.1 Dissociação entre Vibrações Torcionais e Vibrações Laterais .....	29
4.1.2 Aplicações de Campo.....	30
4.1.3 Análise Crítica .....	36
4.2 ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA .....	38
4.2.1 Aplicações de Campo.....	38
4.2.1.1 Enceramento de Broca .....	38
4.2.1.2 Ineficiência na Limpeza de Fundo de Poço .....	40
4.2.1.3 Vibrações Laterais .....	42

4.2.1.4	Vibrações Torcionais .....	44
4.2.1.5	Vibrações Axiais.....	46
4.2.1.6	Desgaste de Broca .....	47
4.2.2	<i>Análise Crítica</i> .....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	50
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Sonda de Perfuração (LEINE e VAN CAMPEN, 2002).....	4
Figura 2.2. Composição de fundo ou BHA ( <i>bottom hole assembly</i> ) (LEINE e VAN CAMPEN, 2002) .....	5
Figura 2.3. Modos de vibração em colunas de perfuração (ROCHA, AZUAGA, <i>et al.</i> , 2008) .....	6
Figura 2.4. Representação esquemática da coluna de perfuração durante a ocorrência de vibrações laterais. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997) .....	8
Figura 2.5. Representação esquemática do movimento do comando dentro do poço (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997).....	9
Figura 2.6. Delineação esquemática da “zona ótima” (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010). .....	14
Figura 2.7. Estreitamento da “zona ótima” (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).....	15
Figura 3.1. Dados de teste de <i>drilloff</i> mostrando o comportamento não-linear abaixo da profundidade de corte mínima e acima do <i>founder point</i> (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005) .....	23
Figura 3.2. Uma broca encontra-se no seu intervalo de eficiência o ROP varia linearmente com WOB. O desempenho da broca é aprimorado deslocando-se o <i>founder point</i> (i.e. hidráulica, fluidos não aquosos). (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005) .....	24
Figura 3.3. Representação esquemática da eficiência mecânica da broca. Na região I da curva de <i>drilloff</i> , o WOB é inadequado para atingir uma profundidade mínima de corte. Acima desse limiar, a eficiência mecânica da broca é, geralmente, em torno de 30-40%. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005) .....	25
Figura 3.4. Representação esquemática mostrando como a inclinação da curva de <i>drilloff</i> é determinada por $\mu$ (e por RPM), mas o ROP máximo é limitado pelo <i>founder point</i> . (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005).....	26
Figura 4.1. Comparação das configurações de BHA propostas (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).....	33
Figura 4.2. Comparação das “zonas ótimas” das composições de fundo propostas (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).....	34
Figura 4.3. Vibrações laterais medidas para o BHA inicial e para o BHA proposto (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).....	35
Figura 4.4. Vibrações torcionais medidas para o BHA inicial e para o BHA proposto (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).....	35
4.5. Broca encerada (CHIPINDU, 2010) .....	38

Figura 4.6. Valor elevado de <i>MSEadj</i> a 5100 ft devido a enceramento de broca. <i>MSEadj</i> mostra que a eficiência da broca melhorou quando o WOB foi reduzido, resultado em aumento de ROP. Também houve queda na pressão quando o enceramento foi solucionado. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005) .....	40
Figura 4.7. Provável ocorrência de ineficiência na limpeza de fundo de poço com uma broca de inserto. Elevados valores de <i>MSEadj</i> e sua baixa variação ( $\pm 5\%$ ) indicam que a broca está girando sobre material acumulado no fundo do poço, tendo pouca interação com a formação. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005) .....	42
Figura 4.8. Redução no valor de <i>MSEadj</i> mostra melhora imediata na eficiência da broca quando o WOB é aumentado. Instrumentação de fundo de poço mostra redução no nível de vibrações laterais. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005) .....	44
Figura 4.9. Gráfico mostrando efeito considerável que vibrações torcionais e laterais podem ter na eficiência da broca e no ROP. A redução no WOB foi eficaz. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005) .....	45
Figura 4.10. <i>MSEadj</i> e instrumentação de fundo mostram que houve ocorrência de vibrações torcionais acima de um valor específico de WOB para esta formação. ROP maximizado aplicando-se um WOB imediatamente abaixo desse valor. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005) .....	46
Figura 4.11. O WOB foi aumentado quando a broca atingiu a formação mais resistente. As vibrações axiais diminuíram depois que WOB foi aumentado. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005) .....	47
Figura 4.12. Tendência de desgaste de broca de inserto. Substituída por PDC com motor de fundo. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005) .....	48

## Nomenclatura

$A_B$	Área da broca	[in <sup>2</sup> ]
$D_B$	Diâmetro da broca	[in]
$DSE$	Energia Específica de Perfuração	[ft/in <sup>2</sup> ]
$EFF_M$	Eficiência de perfuração	[-]
$HP_B$	Potência hidráulica da broca	[hp]
$HSI$	Potência hidráulica por polegada quadrada	[hp/in <sup>2</sup> ]
$MSE$	Energia Mecânica Específica	[ft/in <sup>2</sup> ]
$R_b$	Raio do poço	[in]
$R_c$	Raio da coluna	[in]
$ROP$	Taxa de penetração	[ft/h]
$RPM$	Velocidade angular da coluna de perfuração	[rev/min]
$S_\omega$	Fator de severidade de vibração lateral	[-]
$T$	Torque	[ft.lb]
$UCS$	Resistência à compressão da rocha	[ft/in <sup>2</sup> ]
$V_c$	Velocidade no ponto de contato entre a coluna e a parede do poço	[in/s]
$WOB$	Peso sobre a broca	[lbf]

### Símbolos Gregos:

$\lambda$	Fator hidráulico da broca	[-]
$\mu$	Coeficiente de fricção por escorregamento da broca	[-]
$\omega$	Velocidade angular da coluna de perfuração	[rev/min]
$\Omega$	Velocidade angular do eixo da coluna de perfuração	[rad/s]
$\Omega_b$	Velocidade angular crítica do eixo da coluna de perfuração	[rad/s]

### Subscritos:

$( )_{adj}$	Ajustado
-------------	----------

**Siglas:**

BHA Composição de fundo (do inglês, *Bottom Hole Assembly*)

LWD *Logging While Drilling*

MWD *Measurement While Drilling*

PDC *Polycrystalline Diamond Compacts*

PDM Motor de deslocamento positivo (do inglês, *Positive Displacement Motor*)

RSS Sistema de controle direcional ( do inglês, *Rotary Steerable System*)

# 1 Introdução

A perfuração de poços de petróleo, desde os seus primórdios, caracterizou-se por ser uma atividade que envolve grande complexidade, riscos e sobretudo, elevados custos financeiros. Os últimos anos têm sido marcados pela expansão das fronteiras exploratória e de produção, com destaque para as lâminas de água cada vez mais profundas, e o uso de técnicas direcionais que têm permitido a perfuração de poços de longa extensão e multilaterais, visando garantir a máxima recuperação do óleo em campos recém-descobertos, marginais e/ou maduros.

Nesse esforço de buscar o óleo em horizontes mais profundos, e em condições ambientais adversas, surgem problemas que não só retardam o curso das operações como também oneram o custo dos projetos. Como o custo diário de uma sonda tem variado entre algumas centenas de milhares de dólares, uma parada qualquer faz disparar automaticamente os custos. A atividade de perfuração, por si só, exige paradas para manutenção, troca de equipamentos desgastados ou avariados, por indisponibilidade de recurso e/ou devido a condições oceano-meteorológicas adversas. Se forem adicionados os tempos não produtivos que os eventuais problemas operacionais podem causar, os projetos tornam-se ainda mais onerosos. (CHIPINDU, 2010)

## 1.1 Motivação

As vibrações mecânicas em colunas de perfuração são grandes limitantes do desempenho de perfuração. Não somente causam falhas em equipamentos, mas também aumentam o tempo ocioso, elevando os custos envolvidos no desenvolvimento de um campo. Apesar dos grandes avanços alcançados pela indústria no combate a essas complicações, as verdadeiras causas desses tipos de

vibração ainda não foram compreendidas completamente (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

Constantemente, são elaboradas tecnologias com o objetivo de otimizar o processo de perfuração de poços de petróleo, abordando as diversas operações envolvidas. A intenção de qualquer processo de otimização de perfuração é conduzir a atividade de perfuração da forma mais segura e com o melhor aproveitamento possível dos recursos utilizados. Um método de otimização interessante é a avaliação do desempenho de perfuração de forma contínua durante a atividade de perfuração. O gerenciamento da atividade de perfuração deve ser feito de forma a maximizar a taxa de penetração média, com base na extensão total perfurada. A forma como os diversos parâmetros de perfuração podem afetar a taxa de penetração é muito complexa. No entanto, um dos principais métodos de otimização, a energia mecânica específica, busca facilitar esse processo. Esse método é capaz de otimizar as operações de perfuração através da análise de parâmetros de perfuração, como peso sobre a broca e velocidade angular da broca. (RASHIDI, HARELAND e NYGAARD, 2008)

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de colunas de perfuração sujeitas a vibrações mecânicas e mostrar como o modelo de Energia Mecânica Específica pode auxiliar na tomada de decisões durante a perfuração de poços de petróleo sujeitos a vibrações e outras fontes de ineficiência.

## **1.3 Estruturação do Trabalho**

Este trabalho é dividido em quatro capítulos, além da introdução (capítulo 1) e das referências bibliográficas.

No Capítulo 1, foram abordados a motivação e objetivo do estudo de vibrações em colunas de perfuração e Energia Mecânica Específica.

No Capítulo 2, foi feita uma revisão bibliográfica da mecânica de colunas de perfuração, discutindo-se as cargas atuantes e a modos de vibração. Foram também introduzidos o conceito e “zona ótima” e o modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração apresentados por WU, PAEZ e AGNIHOTRI (2010).

No Capítulo 3, consta uma revisão bibliográfica do conceito de Energia Mecânica Específica, além de outros conceitos associados.

No Capítulo 4, foram estudados dados de campo para confirmar a aplicabilidade dos conceitos discutidos nos capítulos 2 e 3.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do projeto e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Mecânica das Colunas de Perfuração

### 2.1 Estática

#### 2.1.1 Cargas

As principais funções da coluna de perfuração são transmitir torque e transportar fluido de perfuração, e para isso uma coluna é carregada com torque e pressão. O torque sobre a broca geralmente possui valores entre 0,5 e 10 kN·m, mas, devido ao atrito ao longo da parede do poço, o torque necessário para girar a coluna em superfície pode variar de 0,5 a 50 kN·m. A máxima pressão diferencial entre o interior e o exterior da coluna ocorre no topo da mesma, onde a pressão externa é atmosférica enquanto a pressão interna (*standpipe pressure*) pode superar 200 bar. (JANSEN, 1993)

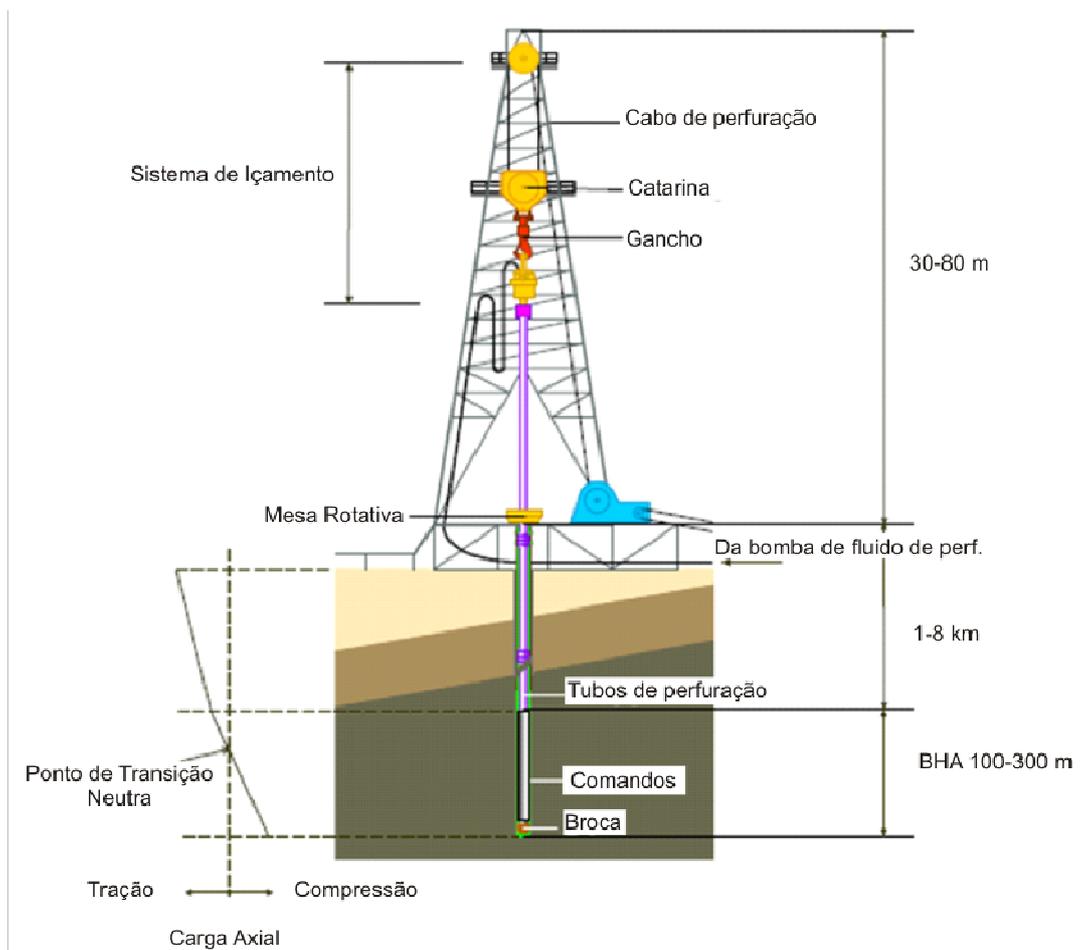


Figura 2.1. Sonda de Perfuração (LEINE e VAN CAMPEN, 2002)

Outra carga atuando na coluna de perfuração é causada pelo peso próprio da coluna: quase todo seu peso é suportado na superfície e fica pendente no poço, resultando em uma tração na superfície da ordem de milhares de kN. Apenas as poucas centenas de metros inferiores da coluna são suportadas pela broca e, portanto, são carregadas com compressão. A flambagem da coluna nesta região é evitada com o uso de comandos (tubos de elevada resistência à flexão situado na extremidade inferior da coluna – em inglês, *drill collars*) e por um espaçamento suficientemente pequeno entre os estabilizadores (geralmente entre 5 e 50 m). As cargas e alguns componentes do sistema de perfuração estão representados nas Figuras Figura 2.1 e Figura 2.2. A flambagem de colunas de perfuração nem sempre pode ser evitada, especialmente na perfuração horizontal, quando a coluna precisa ser empurrada através do poço.(JANSEN, 1993)

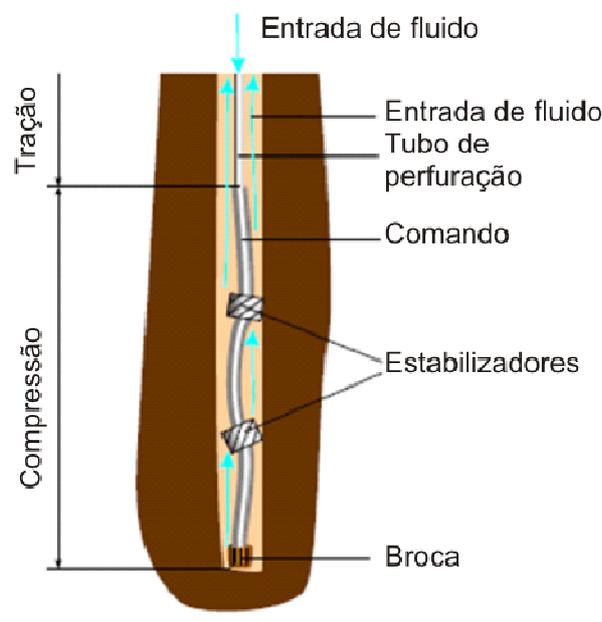


Figura 2.2. Composição de fundo ou BHA (*bottom hole assembly*) (LEINE e VAN CAMPEN, 2002)

## 2.2 Dinâmica

### 2.2.1 Modos de Vibração

As vibrações são as principais causas de falha nas colunas de perfuração, podendo também prejudicar a estabilidade do poço e danificar ferramentas presentes na coluna. As colunas de perfuração podem estar sujeitas a três modos de vibração: lateral, torcional e axial, conforme mostra a Figura 2.3.

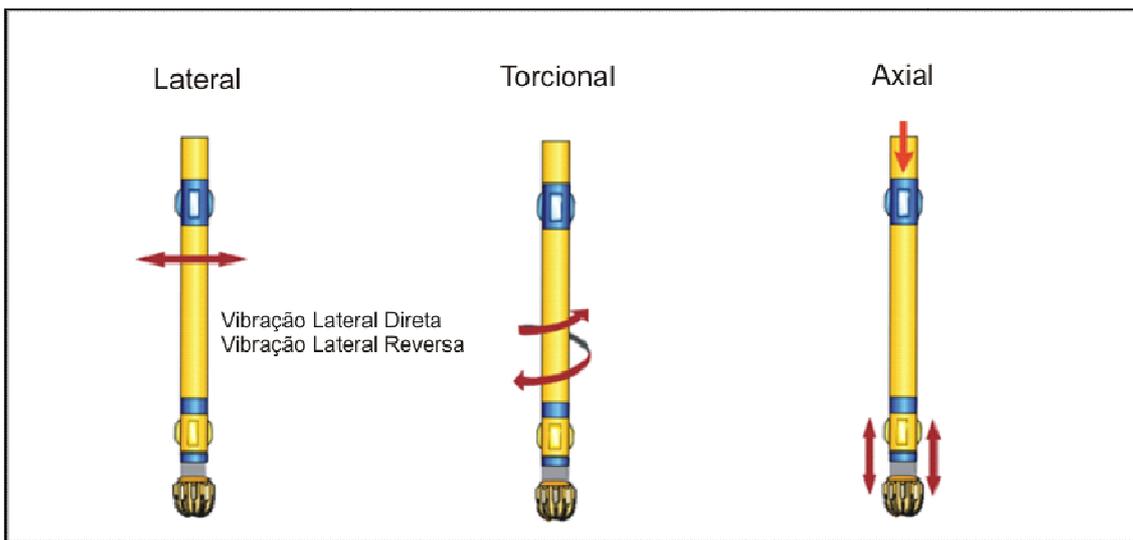


Figura 2.3. Modos de vibração em colunas de perfuração (ROCHA, AZUAGA, *et al.*, 2008)

#### 2.2.1.1 Vibração Lateral ou Flexional

A vibração lateral (*whirling*) da coluna de perfuração pode ser descrita como uma rotação anormal da broca ou da coluna de perfuração. Nesse caso, a broca ou a coluna não giram apenas ao longo do seu próprio eixo. Sua rotação é uma combinação de rotação em torno da linha de centro do poço e em torno de seu próprio eixo. Sendo assim, a vibração lateral é um movimento complexo no qual são gerados deslocamentos laterais, choques e atrito com a parede do poço. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

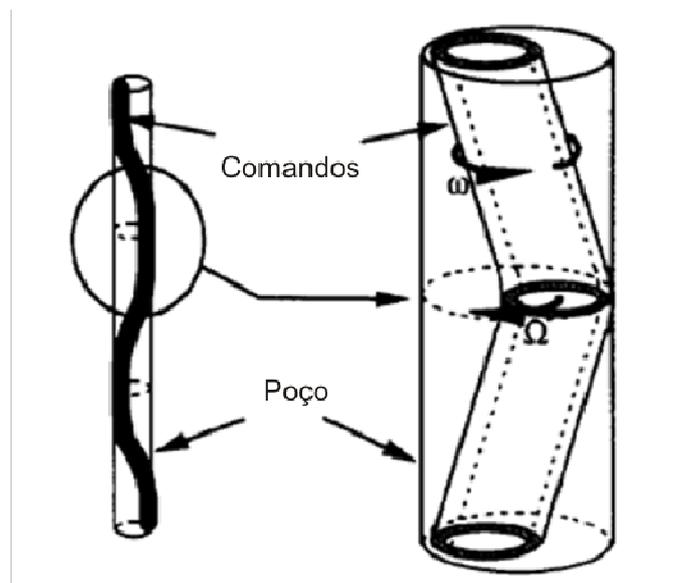
As vibrações laterais ocorrem principalmente no BHA (composição de fundo, isto é o conjunto de equipamentos contidos nas últimas centenas de metros da coluna de perfuração – do inglês, *Bottom Hole Assembly*), podendo também ocorrer nos trechos superiores. Durante a perfuração, o BHA sofre compressão, estando assim suscetível a flambagem e vibrações laterais. Os trechos superiores da coluna ficam sob tração, tendo menor tendência de sofrer vibrações laterais. As vibrações laterais no topo da coluna podem ser facilmente detectadas por movimentos laterais da catarina conhecidos como “chicotadas” (*whipping*). (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Diferentemente do movimento de “chicotadas”, as vibrações laterais no BHA são um movimento difícil de ser detectado. Durante o fenômeno de vibrações laterais no BHA, os componentes do BHA sofrem grandes deslocamentos laterais, gerando tensões devido à flexão. Quando tais deslocamentos se tornam muito grandes, ocorre o contato entre partes dos componentes do BHA e a parede do poço, gerando choques laterais. Às vezes, ocorre também um contato praticamente contínuo com a parede do poço, resultando em aumento nas taxas de desgaste da coluna. Todos esses fenômenos aumentam drasticamente a fadiga dos componentes do BHA e, principalmente, de suas conexões. Como o fenômeno é difícil de ser detectado, ocorre um acúmulo de fadiga durante a perfuração, podendo ocorrer a falha de um componentes do BHA, fazendo necessária a custosa operação de “pescaria”. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Até o surgimento de sistemas de LWD (ferramentas que fazem parte do BHA e permitem a perfilagem enquanto se perfura – do inglês, *Logging While Drilling*), praticamente não era possível detectar a ocorrência de vibrações laterais. Atualmente, tal fenômeno pode ser detectado usando apenas medições de superfície, com auxílio

de procedimentos avançados de tratamento de sinal, como o descrito por REY-FABRET, MABILE e OUDIN (1997).

A vibração lateral é um movimento complexo de alguns componentes do BHA. Como eles não giram em torno do centro do poço, eles entram em contato com a parede do poço, gerando choques laterais. Assim, a trajetória da linha de centro da coluna possui uma forma complexa. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)



**Figura 2.4. Representação esquemática da coluna de perfuração durante a ocorrência de vibrações laterais. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)**

Quando ocorrem as vibrações laterais, o BHA flamba, assumindo uma forma sinuosa, conforme mostrado na Figura 2.4. Na figura, é mostrado em detalhe um pequeno trecho do BHA. A coluna de perfuração gira com uma velocidade angular  $\omega$ , mas a sua linha de centro gira a uma velocidade angular  $\Omega$ . A variável  $\omega$  corresponde à velocidade angular instantânea da coluna. Sua média temporal é igual a velocidade angular (constante) em superfície RPM (rotações por minuto). A velocidade angular

pode estar no mesmo sentido de  $\omega$  ou no sentido contrário. No primeiro caso, trata-se de vibração lateral direta (em inglês, *forward whirling*), enquanto no segundo caso de vibração lateral reversa (em inglês, *backward whirling*). (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

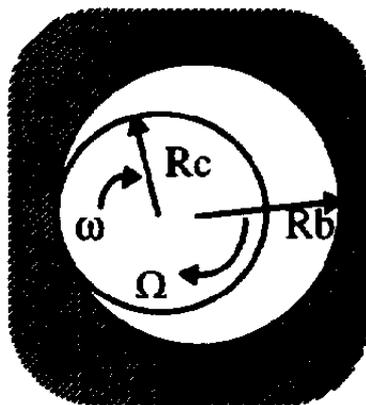
Segundo VANDIVER, NICHOLSON e SHYU (1990), é possível calcular a velocidade no ponto de contato entre o componente do BHA e a parede do poço, de acordo com a Figura 2.5. Dessa maneira, essa velocidade,  $V_c$ , é uma função de  $\Omega$  e  $\omega$ :

$$V_c = (R_b - R_c) \cdot \Omega + R_c \cdot \omega \quad (2.1)$$

Onde, conforme a Figura 2.5:

$R_b$  é o raio do poço; e

$R_c$  é o raio da coluna.



**Figura 2.5. Representação esquemática do movimento do comando dentro do poço (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)**

Assim, para  $V_c$  igual a zero, temos  $\Omega$  igual a  $\Omega_b$  (sempre negativo):

$$\Omega_b = -R_c \cdot \omega / (R_b - R_c) \quad (2.2)$$

Pode-se definir o fator de severidade de vibração lateral,  $S_\omega$ :

$$S_\omega = \Omega / \Omega_b \quad (2.3)$$

Quando  $S_\omega$  tende a 1,  $V_c$  tende a zero e  $\Omega$  tende a  $\Omega_b$ . Essa é a região de vibrações laterais reversas, na qual se percebe que o comando sofre leve desgaste, mas com elevadas tensões devido à flexão associadas a elevadas frequências de flexão e, portanto, acúmulo de fadiga máximo. Assim, trata-se do pior caso. Quando  $S_\omega$  diminui até zero,  $\Omega$  aumenta até zero. Trata-se também de vibração lateral reversa, mas com uma redução na frequência de tensões devido à flexão e, conseqüentemente, da fadiga. Quando  $S_\omega$  segue diminuindo até  $-(R_b - R_c)/R_c$ ,  $\Omega$  aumenta até  $\omega$ . Essa é a região de vibrações laterais diretas, na qual há desgaste acentuado no ponto de contato entre os componentes do BHA e a parede do poço, mas com baixas tensões devido à flexão. (REY-FABRET, MABILE e OUDIN, 1997)

Portanto, o fator  $S_\omega$  provê uma boa indicação do tipo de vibração lateral e de sua severidade.

### **2.2.1.2 Vibração Torcional ou Rotacional**

O segundo tipo de vibração em colunas de perfuração é a vibração torcional ou rotacional. Na sua forma mais drástica, a rotação da broca paralisa enquanto o topo da coluna continua girando em velocidade angular constante, assim aumentando o torque na coluna até que a broca volta a se soltar. Este tipo de vibração tem uma frequência típica entre 0,05 e 0,5 Hz. As vibrações são causadas por uma relação não-linear entre torque e velocidade de rotação na broca: o torque necessário para girar a broca é menor que o torque necessário para libertar-se da paralisação. Isso causa vibrações auto-excitadas quando um movimento circular uniforme da coluna de perfuração produz oscilações, de forma semelhante ao chiado eventualmente produzido pelo movimento retilíneo uniforme de um pedaço de giz sobre um quadro negro. (JANSEN, 1993)

### **2.2.1.3 Vibração Axial ou Longitudinal**

O terceiro tipo de vibração em colunas de perfuração é a vibração axial ou longitudinal. No caso extremo, a broca periodicamente perde o contato físico com o fundo do poço, sendo este um modo de movimento conhecido como *bit bounce*. Na perfuração com brocas tricônicas, a causa inicial pode ser um ponto de elevada resistência na formação, causando um deslocamento periódico da broca com uma frequência igual a três vezes velocidade rotativa no fundo do poço. Se a força periódica resultante sobre a broca estiver quase em fase com o deslocamento imposto, a irregularidade no fundo de poço será amplificada, levando a um padrão de fundo de poço com três lobos e a uma vibração axial mantida com uma frequência típica entre 1 e 10 Hz. Outros tipos de vibração axial ocorrem por causas como, por exemplo, flutuações de pressão na coluna de perfuração ou o processo de corte das brocas PDC.(JANSEN, 1993)

### 2.2.2 Associação entre Vibrações Torcionais e Vibrações Laterais

Vibrações torcionais e vibrações laterais causam diversos problemas na perfuração, como, por exemplo: baixo ROP (taxa de penetração – do inglês *rate of penetration*), danos a ferramentas, dificuldades no controle direcional e dano à broca. Falhas em componentes da coluna de perfuração, como os sistemas de controle direcional (*rotary steerable system* - RSS) e de MWD (equipamento que possui um conjunto de sensores (de inclinação e direção, entre outros) que transmite seus sinais à superfície na forma de pulsos de pressão via fluido de perfuração – do inglês, *Measurement While Drilling*), podem acarretar em aumento significativo do tempo ocioso devido à necessidade de se efetuar a troca dos equipamentos danificados. Por se tratar de atividades de elevados riscos e investimentos, o tempo ocioso associado a vibrações no fundo do poço pode ser determinante na viabilidade econômica do desenvolvimento de um campo. Apesar do progresso atingido nas últimas décadas no controle de vibrações na coluna de perfuração, a indústria petrolífera segue lutando para atingir desempenho consistente nas suas atividades. Estima-se que 40% da profundidade total perfurada mundialmente é afetada negativamente por vibrações laterais. Além disso, as vibrações torcionais estão presentes em 50% do tempo de perfuração (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

A experiência em campo tem mostrado que vibrações laterais e/ou torcionais podem danificar componentes do BHA em poucos minutos, ou até mesmo segundos, se não forem controladas com prontidão. Dessa forma, surge um dilema para o engenheiro de perfuração: aumentar o peso sobre a broca (WOB – do inglês, *weight on bit*) induz vibrações torcionais, enquanto aumentar a velocidade de rotação da coluna (RPM) induz vibrações laterais. Manter tanto WOB quanto RPM reduzidos reduz o nível de vibrações, mas resulta em baixo ROP. Conseqüentemente, um engenheiro precisa optar por perfurar um poço com baixo ROP ou com elevado ROP, mas com vibrações

severas, resultando em grandes problemas como: danos à broca, falha no sistema de controle direcional, falha nos sistemas de MWD e LWD, e prejuízos na qualidade do poço. Tal dilema fica mais evidente ao se perfurar formações muito resistentes e/ou abrasivas (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

### **2.2.2.1 Zona Ótima**

O desafio colocado é conseguir maximizar ROP mantendo broca e BHA estáveis. WU, PAEZ e AGNIHOTRI (2010) identificaram que existe uma tendência da coluna de perfuração em unir as ocorrências de vibrações laterais e torcionais. Essa união é fruto de uma escolha inapropriada da broca e de interações indesejadas entre broca e BHA. Verificou-se que para um conjunto broca-formação, existem valores críticos de WOB e RPM que ativam os mecanismos de vibração lateral e torcional e esses valores podem ser predeterminados se assumirmos que outras condições de perfuração são conhecidas e fixadas. Os valores críticos que representam as fronteiras de parâmetros de perfuração estável podem ser expostos em um gráfico cartesiano, com RPM no eixo das abcissas e WOB no eixo das ordenadas (Figura 2.6). Existem outras fronteiras importantes:

- torque máximo limitado pela capacidade da sonda;
- ROP mínimo especificado pelos operadores; e
- WOB máximo limitado pela flambagem da coluna e pelo controle direcional.

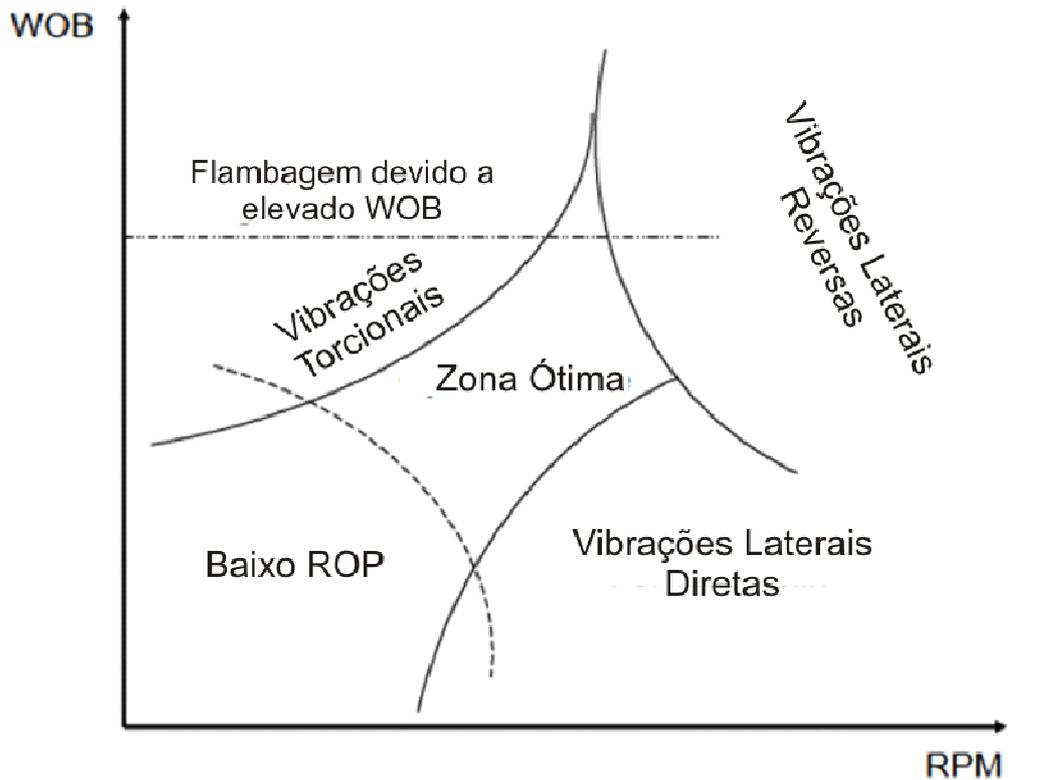


Figura 2.6. Delineação esquemática da “zona ótima” (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

Juntas, estas fronteiras delimitam um domínio fechado em termos de WOB e RPM. Este domínio foi denominado de “zona ótima” (*optimum zone*). Os parâmetros de perfuração dentro da “zona ótima” teoricamente garantem estabilidade. A extensão da “zona ótima” depende da broca sendo utilizada e das propriedades mecânicas da rocha a ser perfurada. A dinâmica da coluna de perfuração, no entanto, reduz a “zona ótima” ao criar interações entre broca e BHA. Nos casos mais extremos, essas interações podem fazer com que as fronteiras representando as vibrações laterais e torcionais se cruzem, tornando a “zona ótima” muito limitada (Figura 2.7) ou até mesmo inexistente. Nestas condições, qualquer tentativa de mitigar as vibrações através da variação de parâmetros de perfuração tende a fracassar.

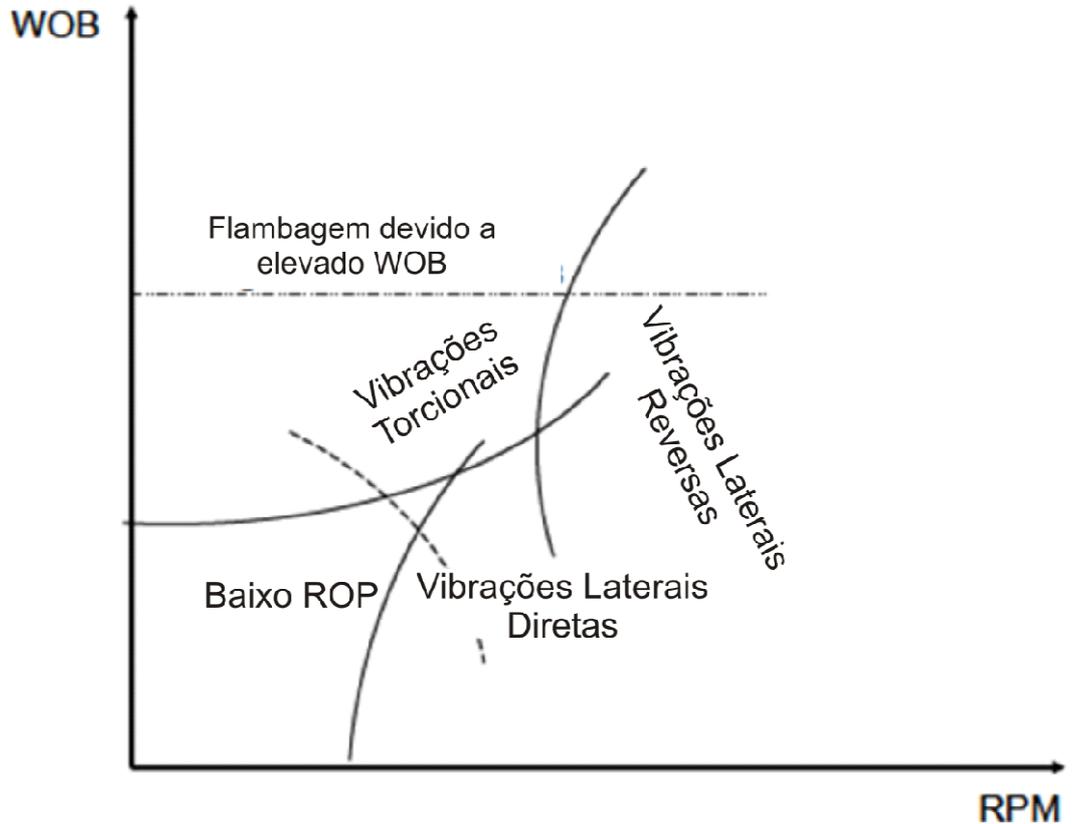


Figura 2.7. Estreitamento da “zona ótima” (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

### 2.2.2.2 Modelo de Dinâmica Avançada de Coluna de Perfuração

Ao quantificarem-se os efeitos da broca e do BHA sobre a dinâmica de colunas de perfuração, a conceito de “zona ótima” torna-se uma ferramenta poderosa para aumentar a eficiência de todo o sistema de perfuração. Os possíveis riscos de se usar brocas ou componentes de BHA inadequados podem ser facilmente identificados avaliando-se o tamanho e posição da “zona ótima”. Ainda, conhecendo-se as fronteiras da “zona ótima”, pode ser estimada uma combinação viável de WOB e RPM. O desafio, no entanto, é conseguir prever a magnitude das vibrações com acurácia (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

Para tanto, foi aplicado um modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração, que reúne os efeitos devido a:

- Propriedades mecânicas da rocha;
- Projeto da broca/escareador, incluindo cortador, corpo e perfil;
- Características físicas dos componentes do BHA;
- Características da formação (heterogeneidade, anisotropia e presença de camadas alternadas);
- Trajetória e geometria do poço.

Este abrangente modelo de elementos finitos com quatro dimensões é capaz de fazer uma previsão confiável do desempenho do sistema de perfuração desde a broca até a superfície, simulando a resposta transiente de todo o sistema no domínio do tempo. Este modelo pode ser aplicado a qualquer configuração de BHA, considerando detalhes como RSS (Sistema de controle direcional – do inglês, *Rotary Steerable System*), PDM (Motor de deslocamento positivo – do inglês, *Positive Displacement Motor*), brocas PDC/tricônicas, estabilizadores, escareadores, MWD, LWD e outras ferramentas de fundo de poço. Os parâmetros de saída deste modelo incluem aceleração, velocidade, forças, momento fletor e deslocamento de qualquer nó ao longo da coluna de perfuração (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

Para que as forças entre a estrutura cortante e a rocha fossem quantificadas com precisão, foram analisadas amostras de rocha em um laboratório de perfuração localizado em Houston, Texas. Diversos ensaios de endentação e raspagem foram

realizados sob pressões controladas para reproduzir a dinâmica entre as estruturas cortantes e as amostras de rocha. Os resultados dos ensaios quantificaram as forças exercidas pela estrutura cortante em termos de magnitude e orientação como função do mecanismo de falha da rocha e quantificaram as taxas de remoção de material rochoso. Tal análise permitiu uma transição precisa a um ambiente virtual no qual os engenheiros determinaram as características da broca e do raspador em condições de confinamento. É possível quantificar a magnitude de vibrações de fundo de poço e forças cortantes, o que, em contrapartida, permite prever tendências de desvio direcional e taxas de penetração instantânea. Usando esses resultados quantitativos e ferramentas de visualização 3D, pode-se identificar o sistema de perfuração ótimo, de forma a prover o melhor equilíbrio entre ROP, estabilidade e controle direcional (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

Diferentemente de uma análise de velocidade crítica, que assuma determinada magnitude e frequência de força de excitação, a tecnologia de modelagem dinâmica baseia-se em um modelo transiente que utiliza dados de laboratório de mecânica das rochas e um ambiente de perfuração realista. Dessa forma, minimiza-se a incerteza das forças de contato entre a broca e a rocha/formação, a fim de maximizar a confiabilidade dos resultados. As cargas de impacto instantâneas sobre a broca ou o BHA podem ser capturados e seus efeitos transientes sobre a coluna de perfuração como um todo são modelados fielmente. Os valores dos dados medidos (em tempo real ou armazenados em memória) são mais bem compreendidos quando comparados aos resultados da modelagem para que se possam apontar as causas subjacentes das vibrações prejudiciais observadas (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010).

## 3 Energia Mecânica Específica

### 3.1 Introdução

O conceito de Energia Mecânica Específica (MSE, do inglês *Mechanical Specific Energy*) tem sido usado efetivamente em laboratório para avaliar a eficiência de brocas de perfuração. Análises de MSE também têm sido usadas de forma menos expressiva para investigar algumas ineficiências em operações de campo (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005).

O processo de acompanhamento de MSE permite detectar mudanças na eficiência do sistema de perfuração de forma praticamente contínua. Isso tem permitido melhoras no desempenho (1) ao permitir que parâmetros de perfuração sejam otimizados com facilidade e (2) ao prover dados quantitativos para justificar alterações de projetos para expandir os limites presentes do sistema. A análise de MSE tem resultado em mudanças em áreas como práticas de controle de poço, seleção de broca, projeto de BHA, entre outras (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005).

### 3.2 Revisão Bibliográfica

A energia mecânica específica tem sido usada para melhorar o desempenho na perfuração de petróleo. O conceito de MSE é definido como o trabalho mecânico realizado ao escavar um volume unitário de rocha. Propôs-se o cálculo de MSE com base em duas componentes (“axial” e “rotativa”), da seguinte forma (TEALE, 1965):

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T}{A_B \cdot ROP} \quad (3.1)$$

Onde:  $A_B$  é a área de broca (associada a seu diâmetro, considerando-se a mesma como sendo circular), em polegadas quadradas; e

$T$  é o torque sobre a broca, em ft.lb.

TEALE (1965) realizou testes em laboratório que demonstravam que a energia por volume de rocha perfurada se mantinha praticamente constante, independente das alterações em ROP, WOB e RPM.

Na equação (3.1), o torque é usado como uma variável no cálculo de MSE. O torque sobre a broca pode ser medido por um sistema de MWD, mas, em muitos casos, não existem medições do torque sobre a broca. Para contornar essa dificuldade, foi introduzido o conceito de coeficiente de fricção por escorregamento da broca ( $\mu$ ) para expressar o torque em função do WOB, permitindo o cálculo de MSE na ausência de medições de torque (RASHIDI, HARELAND e NYGAARD, 2008).

$$T = \mu \cdot \frac{D_B \cdot WOB}{36} \quad (3.2)$$

Onde:  $D_B$  é o diâmetro da broca (considerando-se a mesma como sendo circular), em polegadas.

Assim, a partir da equação (3.2), podemos reescrever a equação(3.1) da seguinte forma:

$$MSE = WOB \cdot \left( \frac{1}{A_B} + \frac{13,33 \cdot \mu \cdot RPM}{D_B \cdot ROP} \right) \quad (3.3)$$

O coeficiente de fricção por escorregamento da broca ( $\mu$ ) é uma constante adimensional que é usado com valores específicos para brocas tricônicas e brocas PDC. Os valores exatos do coeficiente de fricção por escorregamento da broca foram obtidos utilizando medições de torque e WOB em condições de laboratório (PESSIER e FEAR, 1992).

TEALE (1965) observou que o valor numérico de MSE era aproximadamente igual a resistência à compressão da rocha (UCS). Isso acontecia porque os ensaios foram realizados em condições atmosféricas, nas quais a rocha é destruída com elevada eficiência, fraturando de modo frágil. As eficiências máximas das brocas em condições de campo costumam ser muito inferiores, geralmente no intervalo de 30 a 40% (PESSIER e FEAR, 1992). Tal ineficiência resulta na medição MSE aproximadamente três vezes maior que a resistência do material rochoso. Por questões operacionais, criou-se um MSE ajustado ( $MSE_{adj}$ ) para que seu valor possa ser comparado com a resistência da rocha. Assim, considera-se a eficiência de perfuração ( $EFF_M$ ) igual a 0,35 (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005).

$$MSE_{adj} = MSE \cdot EFF_M \quad (3.4)$$

Tal prática é controversa, porque a eficiência mecânica pode se afastar bastante dos 35% assumidos, dependendo de vários fatores. No entanto, essa prática tem sido útil operacionalmente. Geralmente o valor numérico da resistência da rocha é conhecido através de análises feitas pelos fornecedores da broca em uso ou através de estudos

geológicos. Ajustar o valor de  $MSE_{adj}$  para que se aproxime da resistência da rocha quando a broca está no seu pico de eficiência é considerada uma boa referência para saber se a perfuração está sendo eficiente(DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005).

No entanto, a afirmação que  $MSE_{adj}$  deve se igualar à resistência da rocha não é considerada uma regra na prática. Há diversas fontes de erro, além da incerteza associada à eficiência mecânica máxima. Uma considerável fonte de erro está associada ao uso do torque em superfície para calcular  $MSE_{adj}$ . O seu valor acaba sendo agregando o atrito torcional, fazendo com que  $MSE_{adj}$  se torne muitas vezes maior que a resistência da rocha. Porém, somente são analisadas apenas as variações de  $MSE_{adj}$ , sendo menos importante seu valor absoluto. O essencial é que é que o valor seja consistente, de forma que possa ser identificada uma tendência da linha de base. Testes de campo mostram que  $MSE_{adj}$  pode permanecer praticamente constante para uma perfuração eficiente com variações de ROP de 50 a 600 ft/h. Essa estabilidade no valor de  $MSE_{adj}$  durante a perfuração em condições de eficiência máxima permite com que o conceito de MSE seja uma ferramenta eficaz de otimização. Quando o valor de MSE se aproxima da linha de base, a equipe de perfuração sabe que a perfuração está ocorrendo de forma eficiente e que um aumento no ROP pode ser atingido com segurança aumentando-se WOB e RPM. Se o valor de  $MSE_{adj}$  estiver significativamente acima da linha de base, a broca está ineficiente, sendo assim, a causa da ineficiência deve ser diagnosticada e tratada pela equipe de perfuração para que então possa per atingido um aumento na taxa de penetração(DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005).

### 3.2.1 Energia Específica de Perfuração

Energia específica de perfuração (DSE, do inglês *Drilling Specific Energy*) é definida como o trabalho realizado para escavar e remover, sob a broca, um volume unitário de rocha. ARMENTA (2008) propôs uma modificação na equação original de TEALE (1965), incluindo um terceiro termo relacionado à energia hidráulica.

$$DSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \cdot \pi \cdot RPM \cdot T}{A_B \cdot ROP} - \frac{1.980.000 \cdot \lambda \cdot HP_B}{ROP \cdot A_B} \quad (3.5)$$

Onde:  $\lambda$  é o fator hidráulico da broca (adimensional); e

$HP_B$  é a potência hidráulica da broca, em hp.

A razão entre a contribuição por energia hidráulica como função da contribuição da energia mecânica é calculada na seguinte equação:

$$\text{Contribuição da hidráulica de broca} = \left( \frac{MSE - DSE}{MSE} \right) \cdot 100 \quad (3.6)$$

Na equação (3.6), MSE e DSE são calculados através das formas apresentadas nas equações(3.1) e (3.5), respectivamente.

### 3.2.2 Teste de *Drilloff*

Existem diversos testes feitos com o objetivo de otimizar o desempenho de perfuração. Um deles é o *drill rate test* (“teste de taxa de perfuração”), que consiste em simplesmente experimentar diversas combinações de WOB e RPM, e observar os

resultados. São então usados os parâmetros que fornecem a taxa de penetração máxima. De certa forma, todos os métodos de otimização utilizam um processo comparativo semelhante. Ou seja, buscar identificar a combinação de parâmetros que fornece os melhores resultados em relação a outras configurações.

Um método de otimização mais recente é o teste de *drilloff* (*drilloff test*), que consiste em aplicar uma carga elevada sobre a broca e então travar-se o freio do guincho, impedindo que o topo da coluna avance enquanto se continua circulando fluido de perfuração e girando a coluna. À medida que broca perfura, a coluna de perfuração se alonga e o peso sobre a broca diminui. A taxa de penetração é calculada com base na mudança no alongamento da coluna. A Figura 3.1 mostra dados de campo de três teste de *drilloff*. O ponto a partir do qual o ROP deixa de responder linearmente com o aumento do WOB é denominado *founder point*. Esse é considerado o WOB ótimo.

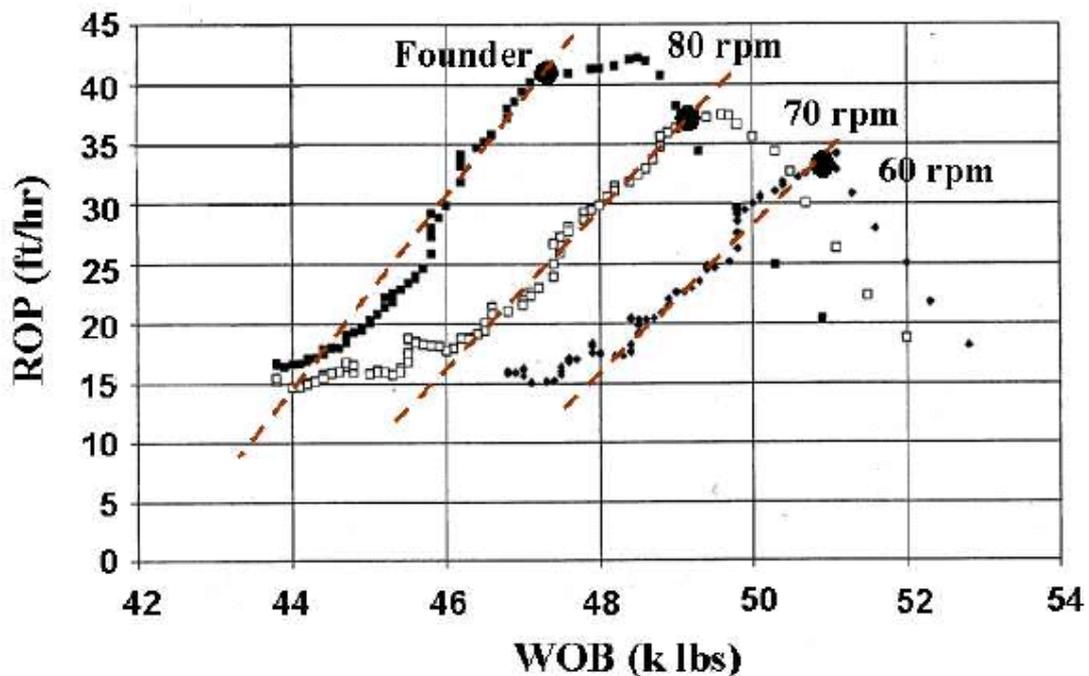
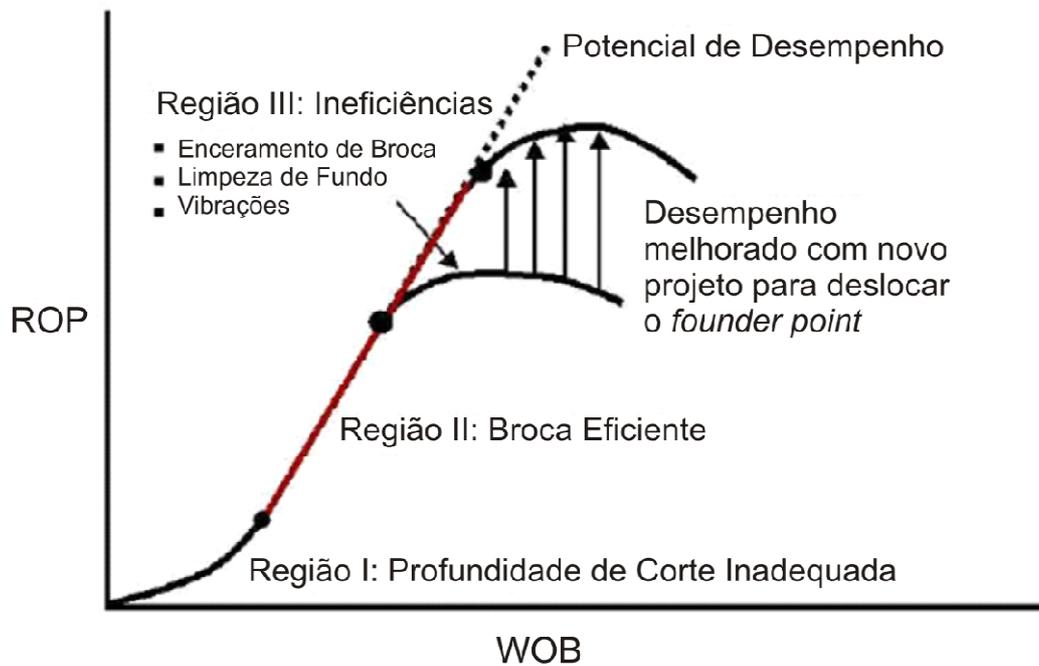
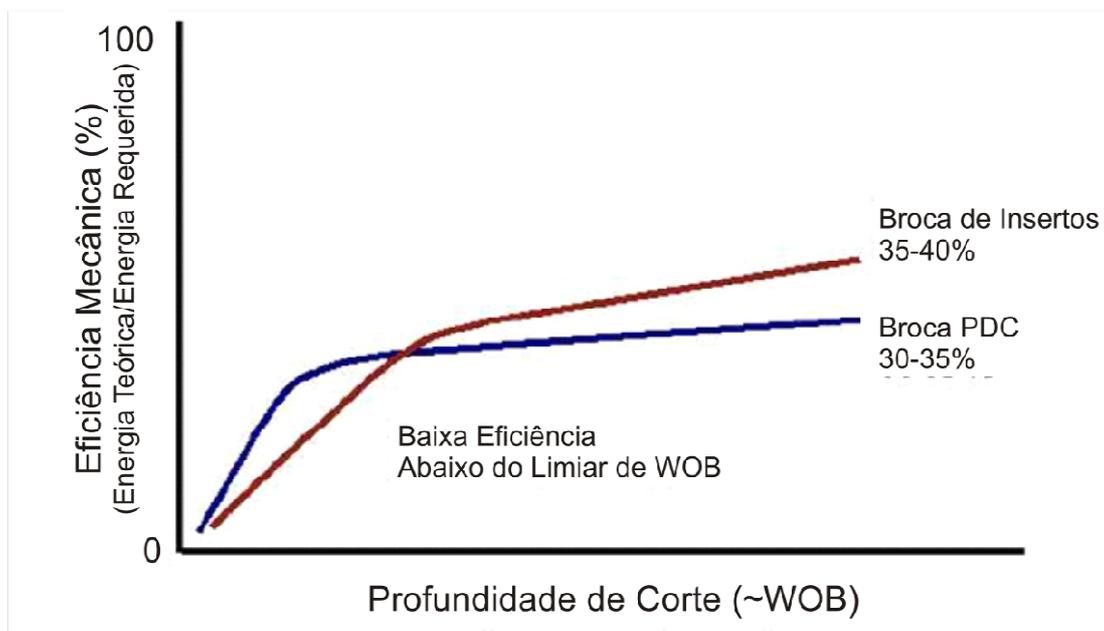


Figura 3.1. Dados de teste de *drilloff* mostrando o comportamento não-linear abaixo da profundidade de corte mínima e acima do *founder point* (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)



**Figura 3.2.** Uma broca encontra-se no seu intervalo de eficiência o ROP varia linearmente com WOB. O desempenho da broca é aprimorado deslocando-se o *founder point* (i.e. hidráulica, fluidos não aquosos). (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

A Figura 3.2 mostra uma curva de *drilloff* típica. A curva é dividida em três regiões. Na região I, ocorre uma restrição de desempenho devido à profundidade de corte (a distância de penetração da broca na formação sendo perfurada – do inglês, *depth of cut* (DOC)) inadequada, causado pelo baixo WOB. A Figura 3.3 mostra a relação entre profundidade de corte e pico de eficiência. Com o aumento de WOB e, conseqüentemente da profundidade de corte, a finalmente se aproxima de seu pico de eficiência. A eficiência é calculada comparando-se a energia teoricamente requerida para destruir um determinado volume de rocha à energia de fato consumida pela broca. A broca tende a transferir apenas 30 a 40% de sua energia ao processo de perfuração, mesmo em condições de pico de desempenho. No entanto, se a profundidade de corte é inadequada, e eficiência de transferência de energia fica bem abaixo dessa faixa de valores, prejudicando a taxa de penetração.



**Figura 3.3. Representação esquemática da eficiência mecânica da broca. Na região I da curva de *drilloff*, o WOB é inadequado para atingir uma profundidade mínima de corte. Acima desse limiar, a eficiência mecânica da broca é, geralmente, em torno de 30-40%. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)**

A região II da curva de *drilloff* começa quando a profundidade de corte é adequada para que o desempenho da broca se estabilize. A eficiência da broca então permanece praticamente constante enquanto o WOB é aumentado até o *founder point*. Nesta região, alterações no WOB resultam em variações proporcionais de ROP. Apesar da eficiência da broca não estar variando, um aumento na quantidade de energia fornecida causa um aumento proporcional de ROP. A inclinação da curva é praticamente constante para determinada formação, broca e velocidade de rotação. A Figura 3.4 mostra como o tipo de broca afeta a inclinação da curva, que possui relação com o coeficiente de fricção por escorregamento da broca (  $\mu$  ). Quando a broca está operando no trecho linear da curva de *drilloff*, ela está transferindo a quantidade máxima de energia que seu projeto permite (geralmente de 30 a 40%).

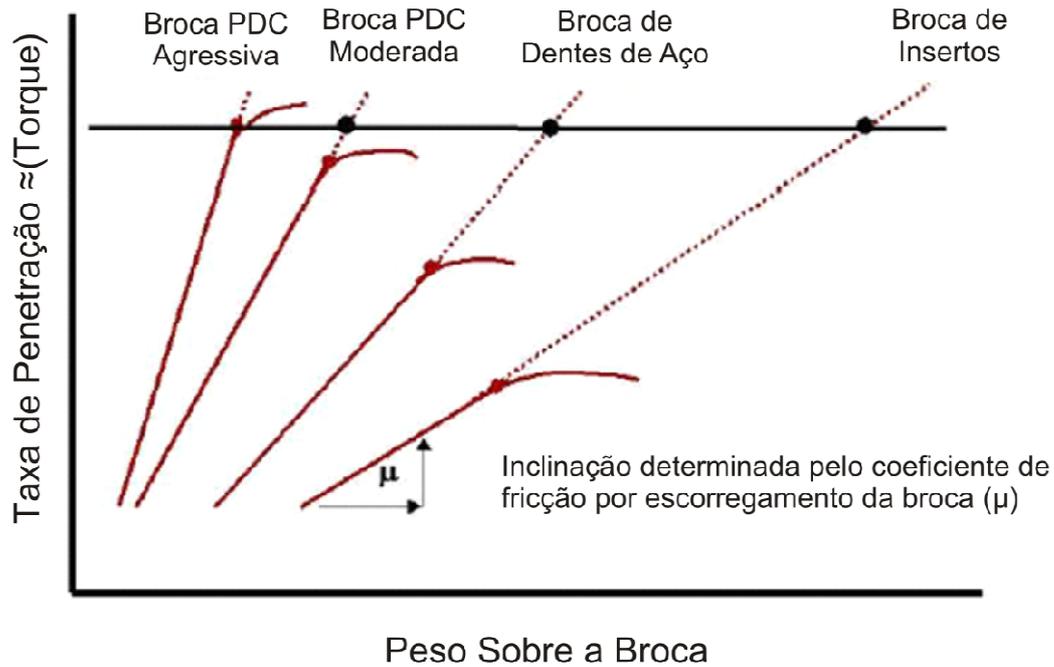


Figura 3.4. Representação esquemática mostrando como a inclinação da curva de *drilloff* é determinada por (e por RPM), mas o ROP máximo é limitado pelo *founder point*. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

Isso implica que não há alterações nas condições do ambiente de perfuração que possam resultar em um aumento no ROP quando se opera dentro da região II. Um fluido a base de óleo, por exemplo, não irá aumentar a taxa de penetração para brocas idênticas operando abaixo do *founder point* com os mesmos WOB e RPM. Inclusive, um aumento na energia hidráulica não resultaria em qualquer alteração no ROP. Nestas condições, a broca não está restringida por uma única ineficiência; apenas necessita de mais energia. Deve-se aumentar o WOB ou o RPM de forma a aumentar perfurar com maiores taxas de penetração.

A região III inicia no *founder point*, a partir do qual a transferência de energia é restringida. No *founder point*, o sistema encontra-se próximo de seu ROP máximo. Para aumentar o ROP além deste ponto, é necessário alterar o sistema, de forma a deslocar o limite imposto pela restrição. Conforme mostra a Figura 3.2, o aumento no

ROP a ser atingido pode ser previsto a partir da inclinação do trecho linear da curva de *drilloff*. Enquanto não houver ineficiências, o ROP continua aumentando linearmente com WOB, acompanhando essa inclinação.

Os fatores que geram essas restrições podem ser agrupados em duas categorias:

- Fatores criadores de ineficiência; e
- Fatores que limitam a entrada de energia.

Três criadores de ineficiências são: enceramento de broca (*bit balling*); ineficiência na limpeza de fundo de poço (*borrom hole balling*); e vibrações. A mitigação desses fatores que limitam a entrada de energia não elimina a existência do *founder point*, ela apenas desloca esse ponto para um valor maior de peso sobre broca. Por exemplo, reduzir a quantidade de cortadores para aumentar o volume de face (espaço físico na broca destinado à circulação do cascalho de perfuração) de uma PDC, não elimina o enceramento da broca, apenas eleva o WOB e a ROP na qual isso irá ocorrer.

Existe uma grande variedade de fatores que limitam a entrada de energia. Alguns exemplos são: *make up torque* (torque máximo nas conexões); ineficiência na limpeza de poço; integridade do poço (ineficiência no carreamento de cascalhos), limite de diferencial de pressão no motor de fundo; capacidade de carga sobre os rolamentos do motor de fundo; tamanho do alvo direcional; limites de velocidade de rotação do sistema de LWD; peso disponível no BHA; capacidade de tratamento de sólidos e capacidade mecânica do *top drive* e da mesa rotativa. Caso o sistema não seja afetado por alguma ineficiência com o aumento do WOB, em certo momento o sistema

será restringido por seus limites de entrada de energia. Nesse ponto uma decisão deve ser tomada: se é prático e economicamente viável alterar o sistema para estender o limite do mesmo. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

## 4 Estudo de Caso

Este capítulo tem como objetivo fazer um estudo das aplicações das teorias introduzidas nos capítulos anteriores, identificando como podem contribuir para a melhoria do processo de perfuração.

### 4.1 Modelo de Dinâmica Avançada de Coluna de Perfuração

#### 4.1.1 Dissociação entre Vibrações Torcionais e Vibrações Laterais

Aplicando-se o modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração de WU, PAEZ e AGNIHOTRI (2010), é possível prever, teoricamente, o potencial de ocorrência de vibrações laterais ou torcionais dados os detalhes da broca, BHA, poço e litologia. Inclusive, pode-se delinear a “zona ótima” do sistema de perfuração em relação a WOB e RPM. Como consequência, pode-se, teoricamente, dissociar os dois fenômenos maximizando-se a “zona ótima”. Algumas das vantagens de se aplicar o conceito de “zona ótima” para solucionar os desafios da associação entre vibrações são:

1. A associação entre vibrações torcionais e laterais pode ser facilmente visualizada e melhor entendida em um gráfico sucinto de WOB por RPM;
2. Os efeitos de qualquer mudança nas seguintes variáveis sobre a dinâmica da coluna de perfuração podem ser quantificados e, portanto, mais previsíveis:
  - a. Broca e BHA,
  - b. WOB e RPM,

- c. Propriedades da formação, trajetória do poço e geometria de fundo de poço;
3. A comparação entre várias soluções é simples porque o sistema com “zona ótima” máxima é, provavelmente, o que permite perfurar com maior estabilidade sem prejudicar a taxa de penetração.
  4. A forma e posição da “zona ótima” no espaço WOB por RPM é uma referência importante para fazer um ajuste fino nos parâmetros de perfuração.

#### **4.1.2 Aplicações de Campo**

Durante a perfuração de um poço direcional, foi diagnosticada a ocorrência de vibrações no BHA e na broca PDC. Essas vibrações resultaram que taxas de penetração muito baixas, redução da vida útil de custosos equipamentos de fundo de poço e conseqüente elevação dos custos de desenvolvimento do campo em questão. Esses problemas se amplificavam com a utilização de escareador na perfuração do poço direcional. Os trechos direcionais apresentaram elevados níveis de vibrações torcional, axial e lateral.

Decidiu-se aplicar o modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração com o objetivo de otimizar o projeto do BHA, incluindo a escolha da broca. Inicialmente, foram reproduzidas as condições identificadas em campo (geradoras de vibrações), para então otimizar o conjunto broca/BHA através do conceito de “zona ótima”. A seqüência estratigráfica era composta pelas seguintes formações:

1. Formação A – sequência uniforme de arenito friável fino a muito fino de elevada resistência (UCS = 11.000 psi)
2. Formação B – folhelho e argila calcária de baixa resistência (UCS = 5.000 psi)
3. Formação C – calcário de elevada resistência (UCS = 14.000 psi)

O primeiro passo no processo de otimização foi determinar qual broca PDC seria capaz de fornecer o ROP desejado mantendo estabilidade dinâmica. Foram avaliadas quantitativamente uma série de brocas PDC através do modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração, levando em consideração detalhes como:

- Perfil da broca;
- Quantidade de cortadores;
- Inclinação dos cortadores; e
- Comprimento de calibre de broca.

De forma a alcançar a estabilidade de toda a coluna de perfuração, é essencial analisar as interações entre broca e BHA. Uma configuração de BHA mal projetada pode resultar em elevados níveis de vibração na broca, além da associação entre vibrações torcionais e vibrações laterais. A operação de escareamento durante a

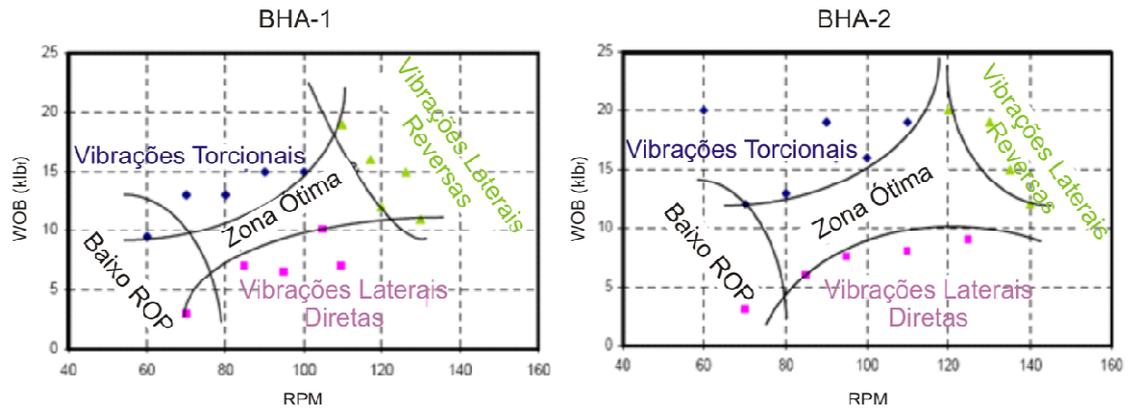
perfuração é um desafio, pois tende a ocasionar vibrações torcionais e laterais severas, especialmente quando a broca e o escareador se encontram em contato com formações com diferentes resistências. Experiência de campo e resultados de modelagem mostram que o pior cenário é durante a transição de uma formação de elevada resistência para outra de baixa resistência. Nessa situação, a broca tende a perfurar mais rapidamente que o escareador, acarretando que o peso sobre o escareador seja maior que o peso sobre a broca. Essa situação tem se mostrado, em ensaios tanto de campo quanto de laboratório, como sendo um mecanismo acionador de vibrações prejudiciais.

Para contornar as vibrações, optou-se por utilizar um escareador com mais robusto e confiável. Porém para determinar as condições dinâmicas da coluna de perfuração, tão importante quanto o projeto do escareador, é o posicionamento correto do mesmo no BHA. Diversas configurações de BHA foram avaliadas e comparadas usando o modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração, variando-se a posição do escareador no BHA. As duas configurações que apresentaram os melhores resultados estão apresentadas na Figura 4.1.

BHA-1	BHA-2
Tubo de Perfuração 5 ½"	Tubo de Perfuração 5 ½"
Tubo Pesado 5 ½"	Tubo Pesado 5 ½"
Adaptador 5 ½"-8"	Adaptador 5 ½"-8"
Comando 8"	Comando 8"
Percussor 8"	Percussor 8"
Comando 8"	Comando 8"
Estabilizador 10 ½"	Estabilizador 10 ½"
Escareador 10 ¼"	Comando 8"
Comando 8"	Escareador 10 ¼"
Comando Não-Magnético 8"	Estabilizador 10 ½"
MWD	Comando Não-Magnético 8"
LWD	MWD
Estabilizador 10 ½"	LWD
Motor de Fundo 10 5/8"	Estabilizador 10 ½"
Broca PDC 10 5/8"	Motor de Fundo 10 5/8"
	Broca PDC 10 5/8"

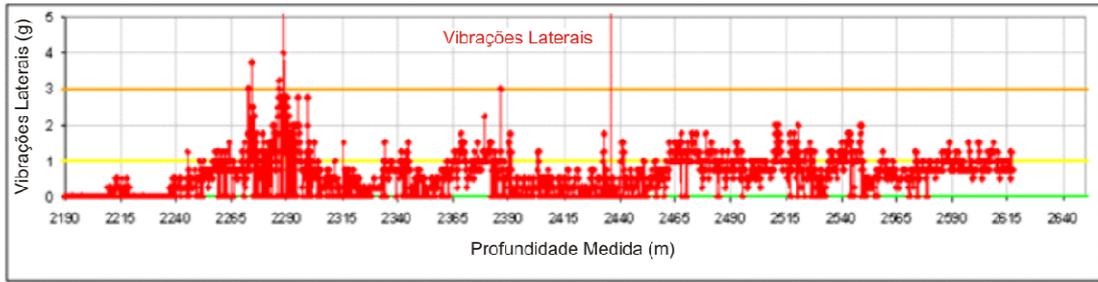
**Figura 4.1. Comparação das configurações de BHA propostas (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)**

Pode-se perceber na Figura 4.2 com que o BHA-2 é nitidamente mais estável que o BHA-1, pois possui uma “zona ótima” mais ampla, apesar de apresentarem duas sutis diferenças: o comando e o Escareador logo abaixo tiveram suas posições trocadas entre si; e, no BHA-2, foi acrescentado um Estabilizador logo acima do Comando Não-Magnético.

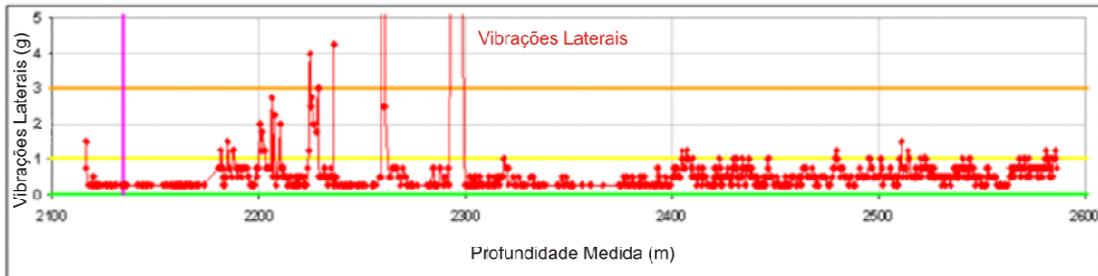


**Figura 4.2. Comparação das “zonas ótimas” das composições de fundo propostas (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)**

Como resultado do projeto de otimização, foi possível alcançar todos os objetivos direcionais com um aumento de 93% no ROP em relação ao obtido com a configuração inicial. O conjunto broca/BHA proposto, aliado a uma otimização de parâmetros de perfuração, foi capaz de mitigar com sucesso as vibrações laterais (Figura 4.3) e torcionais (Figura 4.4).

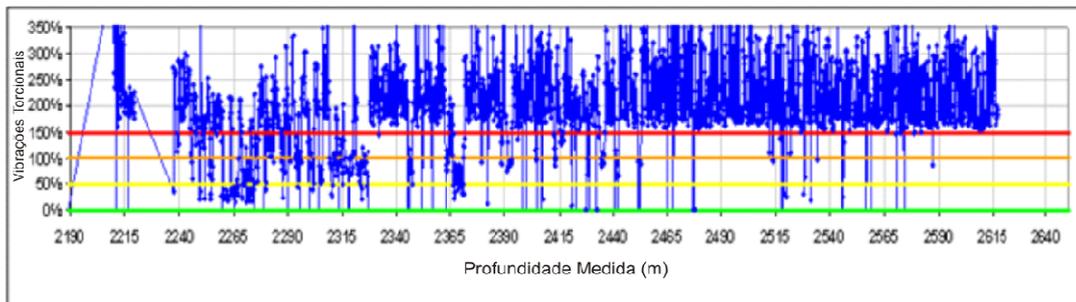


Vibrações laterais medidas no BHA inicial

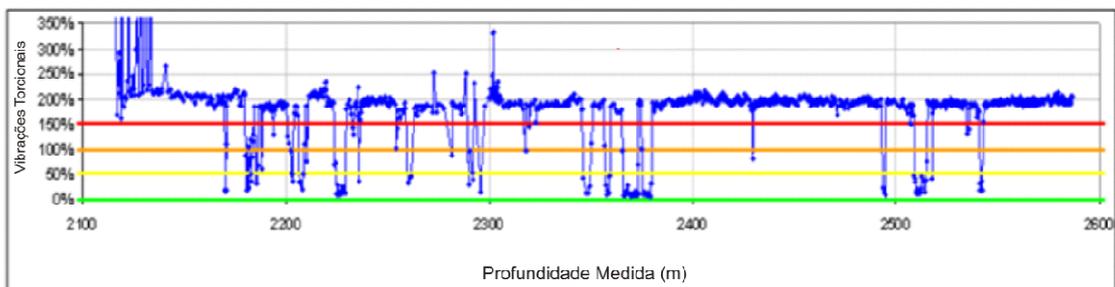


Vibrações laterais medidas no BHA proposto

**Figura 4.3. Vibrações laterais medidas para o BHA inicial e para o BHA proposto (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)**



Vibrações torcionais medidas no BHA inicial



Vibrações torcionais medidas no BHA proposto

**Figura 4.4. Vibrações torcionais medidas para o BHA inicial e para o BHA proposto (WU, PAEZ e AGNIHOTRI, 2010)**

### 4.1.3 Análise Crítica

Com base nos exemplos apresentados, é possível destacar as seguintes vantagens do modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração proposto por WU, PAEZ e AGNIHOTRI (2010):

- consegue prever o desempenho do sistema de perfuração;
- pode ser aplicado a qualquer configuração de coluna de perfuração, teoricamente;
- promete otimizar o sistema de perfuração tomando como base resultados experimentais, aumentando assim a taxa de penetração e minimizando ineficiências devido a vibrações, o que possibilita reduções consideráveis dos custos de perfuração;
- o conceito de “zona ótima” é compatível como o comportamento descrito em outros estudos; e
- o estudo demonstra ser eficiente no que propõe: desacoplar vibrações torcionais e laterais no sistema broca/BHA.

No entanto, é importante destacar também as seguintes desvantagens do modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração:

- o modelo não é apresentado sucintamente, omitindo a descrição de:
  - considerações realizadas,

- detalhamento das informações incorporadas ao modelo (exatamente quais propriedades da formação, broca e BHA), e
- modelo físico assumido; e
- não são consideradas as influências de outras fontes de ineficiência sobre o desempenho do sistema de perfuração:
  - vibrações axiais,
  - enceramento de broca,
  - ineficiência na limpeza de fundo de poço,
  - desgaste de broca, e
  - atrito entre coluna a parede do poço.

Portanto, são propostas as seguintes ações, com o objetivo de aperfeiçoar o modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração:

- testar vários cenários simulados também em laboratório;
- comparar os resultados reais com os resultados das simulações nos gráficos  $WOB \times RPM$ ; e

- agregar ao estudo o cálculo de Energia Mecânica Específica e/ou Energia Específica de Perfuração.

## 4.2 Energia Mecânica Específica

### 4.2.1 Aplicações de Campo

#### 4.2.1.1 Enceramento de Broca

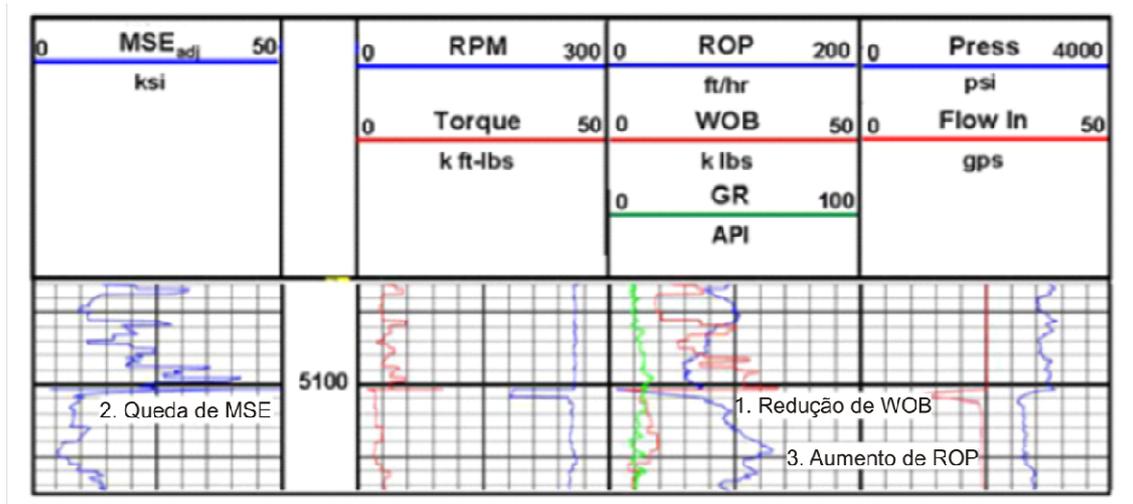
O enceramento de broca (*bit balling*) pode ser definido como um acúmulo de material na broca que impede a transferência de uma parcela do WOB à estrutura cortante. Quanto maior a perda na transferência de força, menor a profundidade de corte e, conseqüentemente, maior a redução na taxa de penetração. Esse processo é geralmente associado à perfuração de folhelhos, mas uma análise do comportamento de  $MSE_{adj}$  mostrou que esse problema também é comum em calcários. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)



4.5. Broca encerada (CHIPINDU, 2010)

A Figura 4.6 mostra um exemplo durante a perfuração de um trecho de 12-14". Inicialmente,  $MSE_{adj}$  oscilava em torno de 25 ksi. Apesar de se tratar de uma formação pouco resistente, o consumo de energia mostrou-se elevado. Foi devidamente identificado motivo da elevada perda de energia como sendo encerramento de broca. Para contornar esse problema, o WOB foi reduzido de 25 a 8 mil lb a 5100 ft. A melhoria no desempenho da broca foi imediatamente mostrada por  $MSE_{adj}$ . Consequentemente, o ROP aumentou de 80 para 100 ft/h.

Apesar do ROP inicial já ser aceitável, o diagnóstico de  $MSE_{adj}$  permitiu notar que seria possível melhorar o desempenho. O exemplo mostra como  $MSE_{adj}$  é um indicador relativo de desempenho, e não absoluto. Após a otimização dos parâmetros de perfuração controláveis, é preciso alterar o sistema para atingir maiores ganhos de ROP. Uma solução possível é modificar os jatos da broca e as vazões de forma a atingir máxima a potência hidráulica por polegada quadrada (HSI) permitida pelos equipamentos disponíveis em sonda. Um segundo passo para melhorar o ROP, seria modificar a broca. No entanto, isso requer a realização de ensaios para determinar se a broca modificada consegue manter a estabilidade vibracional.



**Figura 4.6. Valor elevado de  $\Delta$  a 5100 ft devido a enceramento de broca. mostra que a eficiência da broca melhorou quando o WOB foi reduzido, resultado em aumento de ROP. Também houve queda na pressão quando o enceramento foi solucionado. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)**

#### 4.2.1.2 Ineficiência na Limpeza de Fundo de Poço

A ineficiência na limpeza de fundo de poço (*bottom hole balling*), é uma condição na qual o acúmulo de material no fundo do poço interfere com a transferência de energia da broca à formação sob a mesma. O material que se acumula no fundo do poço consiste de partículas finamente moídas que são seguradas por diferencial de pressão, de forma semelhante a uma torta de filtro (*filter cake*). A taxa de remoção desse material depende principalmente da taxa na qual o filtrato penetra o pó fino (composto pelas partículas moídas) para que seja aliviado o diferencial de pressão que o segura no lugar. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

A ocorrência de ineficiência na limpeza de fundo de poço é mais provável com o uso de brocas de inserto em formações de elevada resistência devido à ação esmagadora das brocas de inserto, apesar de ocorrer até certos níveis sempre que é utilizado elevado peso sobre a broca em formações resistentes. A curva de  $\Delta$  mostrada na Figura 4.7 é característica da ocorrência de ineficiência na limpeza de fundo de

poço. Neste exemplo, uma broca de inserto de 7-7/8" está perfurando um formação com 25 ksi de resistência usando fluido a base de água. O valor extremamente elevado de  $MSE_{adj}$  (em torno de 800 ksi) mostra que o sistema está consumindo a mesma energia necessária para se perfurar uma formação com esse valor extraordinário de resistência à compressão. Conclui-se que isso se deve a ineficiência na limpeza de fundo de poço principalmente por eliminação de explicações alternativas. O encerramento de broca não ocorre em formações de resistência muito elevada. Apesar da ocorrência de vibrações ser muito comum e de poderem acarretar em valores de  $MSE_{adj}$  da mesma magnitude, a suavidade da curva não é representativa da ocorrência vibrações. A variação no valor de  $MSE_{adj}$  é inferior a 5%. Esta baixa variação é interpretada como resultante da rotação da broca sobre material acumulado no fundo do poço, havendo pouco contato direto com a formação resistente. Vibrações tendem a gerar amplas variações no torque. Neste exemplo, a broca não aparenta estar reagindo como o fundo do poço para gerar torque. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

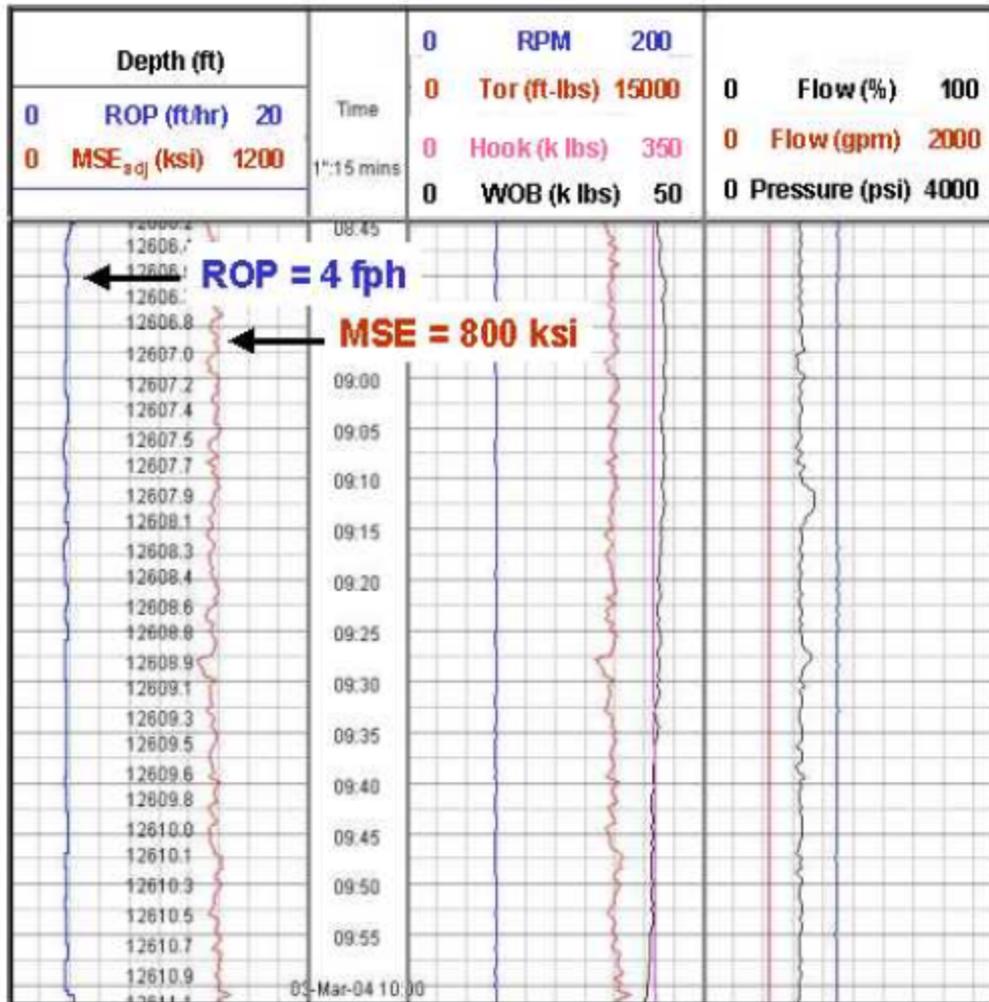


Figura 4.7. Provável ocorrência de ineficiência na limpeza de fundo de poço com uma broca de inserto. Elevados valores de  $MSE_{adj}$  e sua baixa variação ( $\pm 5\%$ ) indicam que a broca está girando sobre material acumulado no fundo do poço, tendo pouca interação com a formação. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

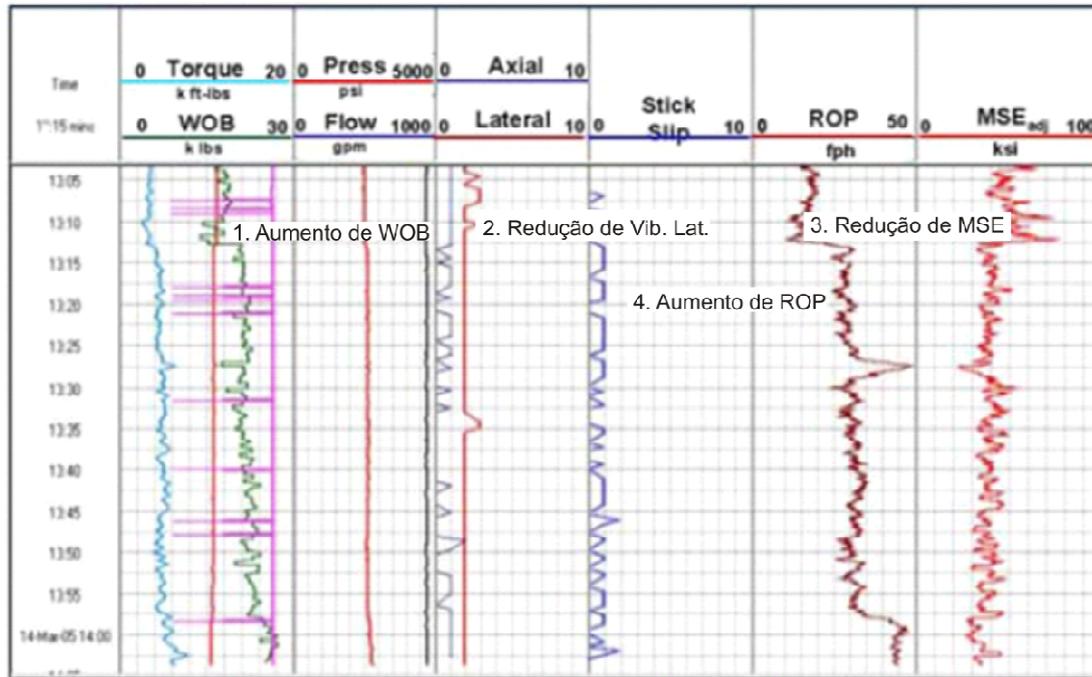
#### 4.2.1.3 Vibrações Laterais

Ao vibrar, a broca tem sua eficiência reduzida, fazendo com que o valor de  $MSE_{adj}$  mostre com clareza um crescimento no consumo de energia. Quando a broca não está girando em torno do seu centro, há uma perda na eficiência de corte. Esse movimento no fundo do poço é conhecido como vibração lateral (*whirling*) e pode ter um impacto considerável na taxa de penetração. A Figura 4.8 mostra o comportamento de  $MSE_{adj}$  durante a ocorrência de vibrações laterais. Os dados são provenientes de um sistema de monitoramento de vibrações em fundo de poço modificado para exibir a curva de

$MSE_{adj}$  junto com os demais dados em tempo real. Inicialmente,  $MSE_{adj}$  varia em torno de 50 ksi para uma formação com resistência inferior a 30 ksi. No entanto, trata-se de um poço direcional e o elevado consumo de energia pode ser principalmente devido ao atrito entre a coluna de perfuração e a parede do poço. É preciso variar os parâmetros e observar a resposta do  $MSE_{adj}$  em relação à linha de base para saber se a broca estava, inicialmente, perfurando com eficiência ou não. Assim que WOB foi elevado de 12 a 14 mil lb,  $MSE_{adj}$  reduziu de 50 ksi a aproximadamente 40 ksi. Esse comportamento sugere que a broca estava inicialmente menos eficiente em comparação com a condição após o aumento do peso. Se a eficiência da broca não tivesse alterado, o valor de  $MSE_{adj}$  teria permanecido constante. O ROP não aumentou apenas porque o WOB aumentou, mas porque a broca se tornou mais eficiente como o aumento de carga. Por esse motivo, o ROP teve um aumento (100%) desproporcional com o aumento de WOB (16%). O aumento na eficiência resultante de um aumento de WOB é uma resposta esperada de uma broca sofrendo vibrações laterais. É possível notar que havia um baixo nível de vibrações laterais inicialmente, que foi reduzido ao nível mínimo detectável quando o WOB foi aumentado. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)

O WOB continuou sendo aumentado lentamente enquanto a perfuração prosseguia, resultando em uma queda contínua no valor de  $MSE_{adj}$ . Por último, um segundo aumento mais brusco resultou em mais melhorias em  $MSE_{adj}$  e ROP. É importante notar que o nível de vibrações laterais segue reduzindo, mas a ferramenta de monitoramento de vibrações não está configurada para registrar essa redução. Assim,  $MSE_{adj}$  é capaz de exibir os efeitos de um baixo nível de vibrações, que ferramentas de LWD comuns não são capazes de exibir em tempo real. A vantagem de ser ter acelerômetros de fundo do poço é que eles indicam com clareza qual o tipo de vibração ocorrendo, enquanto que é necessário realizar alguns testes para determinar

isso a partir da curva de . A vantagem da curva de é que ela consegue indicar como a vibração está afetando o desempenho de perfuração. Sendo assim, as duas ferramentas são complementares. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)

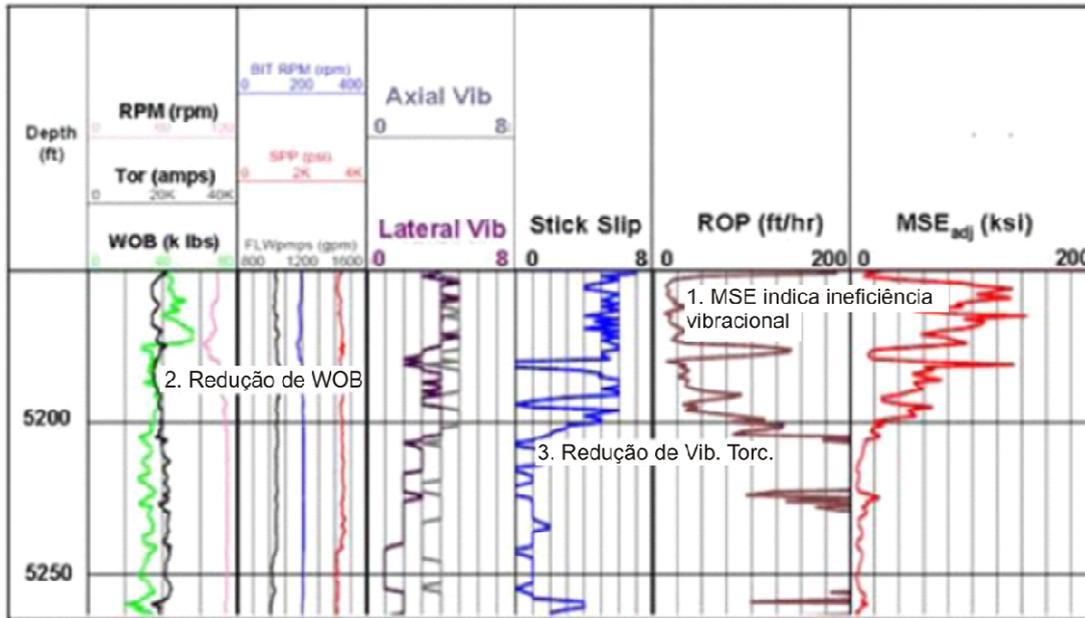


**Figura 4.8.** Redução no valor de mostra melhora imediata na eficiência da broca quando o WOB é aumentado. Instrumentação de fundo de poço mostra redução no nível de vibrações laterais. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)

#### 4.2.1.4 Vibrações Torcionais

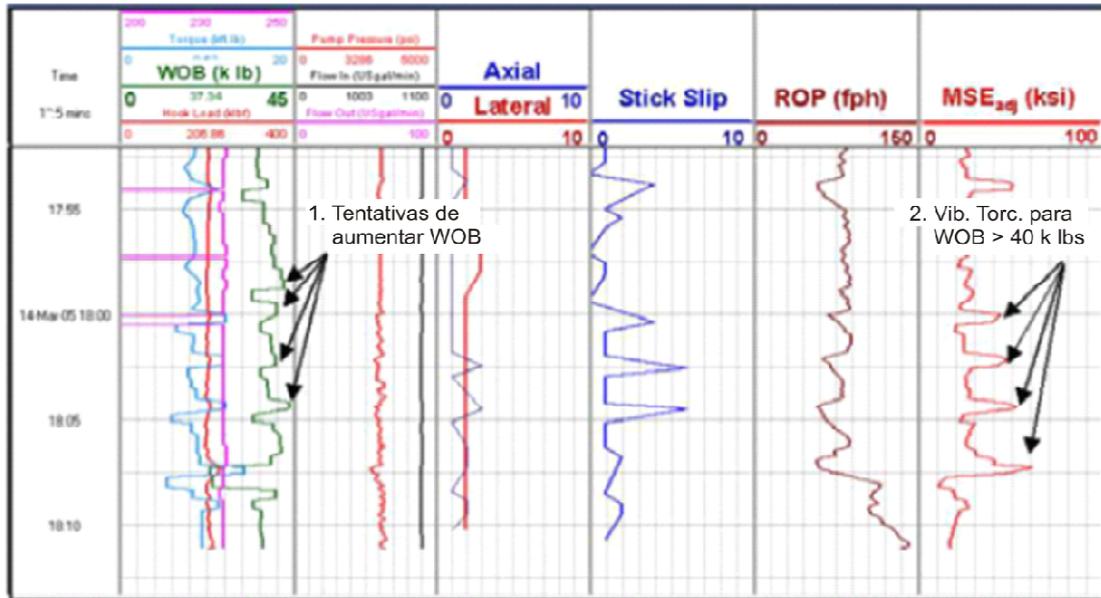
A vibração torcional (*stick slip*) ocorre quando o torque aplicado na extremidade inferior da coluna de perfuração atinge um valor crítico que tende a excitar a mesma. Conseqüentemente, procedimento primário de mitigação consiste em reduzir o torque sobre a broca até um nível que não excite a coluna. Isso é possível com a redução do WOB. Um aumento na velocidade angular ajuda a manter o momento angular. A Figura 4.9 mostra dados coletados em na fase de 12-1/4" de um poço. Inicialmente, ultrapassa 100 ksi. As ferramentas de monitoramento de vibrações mostram níveis elevados de vibrações torcionais e moderados de vibrações laterais. Quando o

WOB é reduzido de 45 a 35 mil lb, a broca se torna consideravelmente mais eficiente e diminui até valores inferiores a 10 ksi. Como efeito, o ROP aumentou de 25 fph a 200 fph. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)



**Figura 4.9. Gráfico mostrando efeito considerável que vibrações torcionais e laterais podem ter na eficiência da broca e no ROP. A redução no WOB foi eficaz. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)**

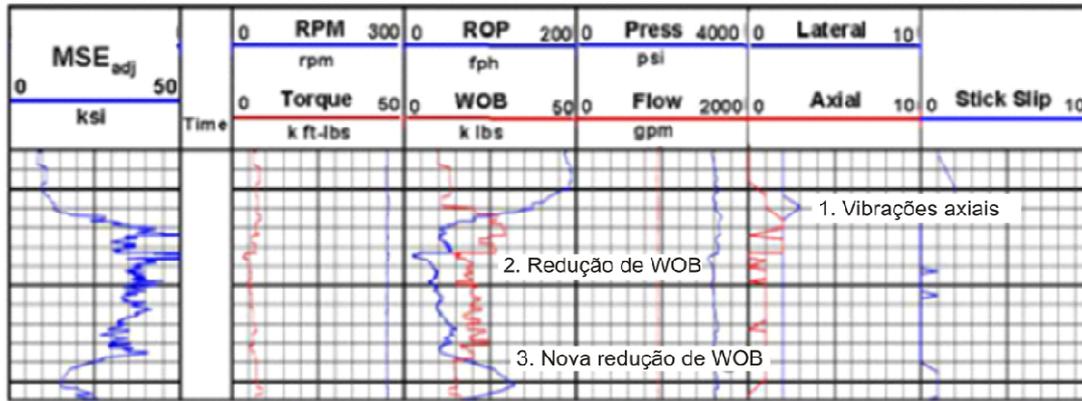
A Figura 4.10 mostra uma série de teste de , nos quais detectou-se a ocorrência de vibrações torcionais para valores específicos de WOB. Sempre que WOB se aproximava de 40 mil lb, crescia bruscamente e a taxa de penetração reduzia. Em outros casos, as vibrações torcionais foram mitigadas, inicialmente, com um aumento em RPM, e, caso não bastasse, uma posterior redução de WOB. A maior combinação de velocidade angular e de WOB que pode ser atingida sem a ocorrência de vibrações laterais ou torcionais resulta na taxa de penetração máxima. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)



**Figura 4.10.** e instrumentação de fundo mostram que houve ocorrência de vibrações torcionais acima de um valor específico de WOB para esta formação. ROP maximizado aplicando-se um WOB imediatamente abaixo desse valor. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)

#### 4.2.1.5 Vibrações Axiais

Apesar de serem pouco frequentes, as vibrações axiais podem ser detectadas em formações como dolomitas e anidritas de elevada resistência, por exemplo. A Figura 4.11 mostra quando houve um início de ocorrência de vibrações axiais devido a uma mudança de litologia, e o WOB foi aumentado de 10 a 25 mil lb. O valor de aumentou até 35 ksi, mas esse valor pode estar próximo da resistência da dolomita perfurada, então a broca não aparente estar extremamente ineficiente. Quando o WOB foi reduzido ao intervalo de 15 a 20 mil lb, houve uma redução no nível de vibrações axiais e um aumento de ROP. Desse forma, um gerenciamento apropriado de vibrações axiais pode preservar a estrutura cortante da broca e permitir corridas mais extensas e rápidas com menores danos acumulados. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)



**Figura 4.11. O WOB foi aumentado quando a broca atingiu a formação mais resistente. As vibrações axiais diminuíram depois que WOB foi aumentado. (DUPRIEST, WITT e REMMERT, 2005)**

#### 4.2.1.6 Desgaste de Broca

O conceito de MSE já foi aplicado por diversos autores para identificar tendências de desgaste de broca. A Figura 4.12 mostra um exemplo de tendência de desgaste de broca na perfuração de uma formação com 20 ksi de resistência com uma broca de inserto de 8-1/2". O comportamento da curva de MSE nem sempre é o mesmo para diferentes casos de desgaste de broca. Neste caso específico, a tendência inicial foi mascarada pelo elevado torque na coluna no direcional e por vibrações. Quando brocas de inserto desgastam, o consumo de energia tende a aumentar constantemente nos últimos 50 a 100 pés perfurados. Tal comportamento sugere que a broca se mantém relativamente eficiente durante a maior parte de sua vida útil, mas assim que começa a desgastar, o seus dentes achatam rapidamente. Brocas PDC têm se mostrado mais eficientes para intervalos mais curtos. O conhecimento da vida útil esperada para a broca e do desempenho em condições semelhantes são essenciais para tomar a decisão de quando substituir uma broca com base na observação do comportamento da curva de MSE. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

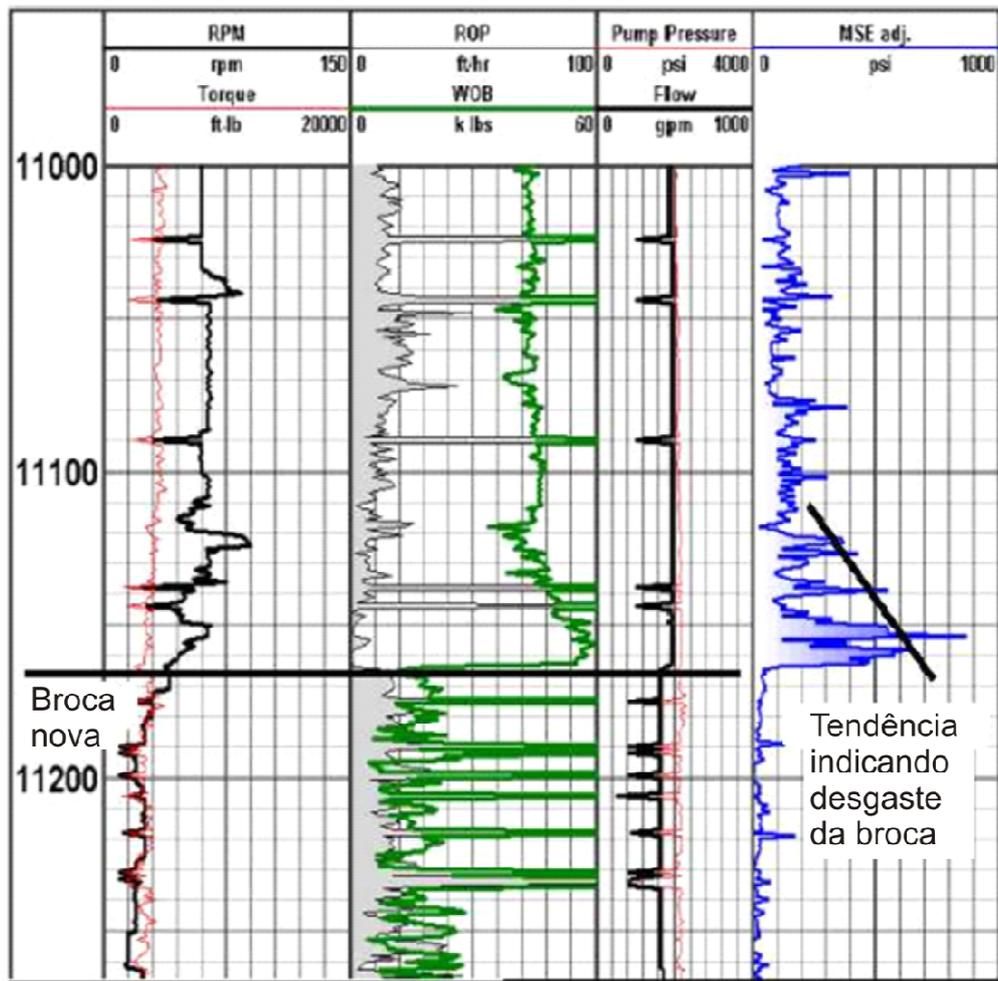


Figura 4.12. Tendência de desgaste de broca de inserto. Substituída por PDC com motor de fundo. (DUPRIEST e KOEDERITZ, 2005)

#### 4.2.2 Análise Crítica

A aplicação do conceito de Energia Mecânica Específica é capaz de contribuir para:

- a identificação de ineficiências durante a perfuração;
- a otimização de parâmetros de perfuração;
- justificar alterações de projetos através de dados quantitativos; e

- havendo muitos poços com litologias e projetos semelhantes, é possível aplicar as ações de melhoria de desempenho em muitos deles, resultando em um considerável impacto financeiro positivo no desenvolvimento de um campo.

No entanto, o acompanhamento da Energia Mecânica Específica possui algumas limitações:

- requer informações complementares de outras ferramentas para fornecer um diagnóstico confiável;
- a eficiência mecânica máxima usada para calcular  $MSE_{adj}$  é apenas uma aproximação, podendo se afastar bastante da eficiência mecânica máxima real;  
e
- é dependente de medições de campo que, muitas vezes, possuem enormes incertezas associadas.

## **5 Conclusões**

O trabalho fez um estudo de vibrações em colunas de perfuração bem como do conceito de energia mecânica específica. Mostrou-se como a energia mecânica específica torna possível a avaliação da eficiência de sistemas de perfuração e a detecção de ineficiências durante a atividade de perfuração. O acompanhamento em tempo real da tendência da curva de MSE permite saber se a perfuração está ocorrendo de forma eficiente. Dentro da zona de eficiência, é possível otimizar os parâmetros de perfuração com segurança, de forma a maximizar a taxa de penetração evitando ineficiências de perfuração. De forma semelhante, expôs-se como o conceito de “zona ótima”, associado a simulações realizadas por um modelo de dinâmica avançada de coluna de perfuração, pode ser uma referência importante para ajustar parâmetros de perfuração e projetar um conjunto broca/BHA que otimize a perfuração.

### **5.1 Sugestão para Trabalhos Futuros**

O eventual aprofundamento desse estudo deveria incluir a aplicação das metodologias estudadas em uma amostra maior de poços no Brasil e no mundo. Além disso, pode-se integrar o estudo dos conceitos abordados em novos casos.

## 6 Referências Bibliográficas

- ARMENTA, M. **Identifying Inefficient Drilling Conditions Using Drilling-Specific Energy**. 2008 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: Society of Petroleum Engineers. 2008.
- BOURGOYNE JR., A. T. et al. **Applied Drilling Engineering**. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, v. 2, 1986.
- BRITTO, G. A. D. S. **Energia mecânica específica e suas aplicações na perfuração de poços de petróleo**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- CHIPINDU, N. S. C. **Pós-análise em Problemas de Perfuração de Poços Marítimos de Desenvolvimento**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- DUPRIEST, F. E.; KOEDERITZ, W. L. **Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy**. SPE/IADX Drilling Conference. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers. 2005.
- DUPRIEST, F. E.; WITT, J. W.; REMMERT, S. M. **Maximizing ROP with Real-Time Analysis of Digital Data and MSE**. International Petroleum Technology Conference. Doha: International Petroleum Technology Conference. 2005.
- JANSEN, J. D. **Nonlinear Dynamics of Oilwell Drillstrings**. Delft: Delft University Press, 1993.
- LEINE, R. I.; VAN CAMPEN, D. H. Stick-slip whirl interaction in drillstring dynamics. **ASME Journal of Vibration and Acoustics**, Eindhoven, 2002. 209-220.
- PESSIER, R. C.; FEAR, M. J. **Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction**. 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. Washington: Society of Petroleum Engineers. 1992.
- RASHIDI, B.; HARELAND, G.; NYGAARD, R. **Real-Time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts**. 2008 Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers. 2008.
- REY-FABRET, I.; MABILE, M. C.; OUDIN, N. **Detecting Whirling Behaviour of the Drill String from Surface Measurements**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio: Society of Petroleum Engineers. 1997.
- ROCHA, L. A. S. et al. **Perfuração direcional**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- TEALE, R. The concept of specific energy in rock drilling. **Int. J. Rock Mech. Mining Sci.**, Isleworth, 1965. 57-73.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

VANDIVER, K. J.; NICHOLSON, J. W.; SHYU, R.-J. Case Studies of the Bending Vibration Whirling Motion of Drill Collars. **SPE Drilling Engineering**, 1990.

WU, S. X.; PAEZ, L.; AGNIHOTRI, M. **Decoupling Stick-slip and Whirl to Achieve Breakthrough in Drilling Performance**. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Louisiana: Society of Petroleum Engineers. 2010.