



Paulo Alberto da Costa Mattos

**Vibrações em Colunas de Perfuração
em Operações na Bacia do Solimões**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Rio de Janeiro
Março de 2015



Paulo Alberto da Costa Mattos

**Vibrações em Colunas de Perfuração
em Operações na Bacia do Solimões**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. João Carlos Plácido

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luiz Alberto Santos Rocha

PETROBRAS

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de março de 2015

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

Paulo Alberto da Costa Mattos

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Santa Úrsula em 1993. Especializou-se em Administração Financeira na Fundação Getúlio Vargas em 1994. Especializou-se em Engenharia de Segurança do Trabalho na Universidade Federal Fluminense em 2002. Especializou-se em Engenharia de Petróleo na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2008.

Ficha Catalográfica

Da Costa Mattos, Paulo Alberto

Vibrações em Colunas de Perfuração em Operações na Bacia do S olimões/Paulo Alberto da C osta Mattos; Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga – 2015.

73 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do R io de J aneiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Vibrações Torcionais 3. Fenômeno Stick-Slip. 4. Poços de Perfuração. I. Arthur Martins Barbosa Braga. II. Pontifícia Universidade Católica do R io de J aneiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Para minha esposa Patricia e filhos Pedro Paulo e Miguel,
Pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Arthur Martins Barbosa Braga, que esteve comigo nessa árdua jornada, pela sua imensa paciência em me orientar e auxiliar para obter esse mérito.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À HRT Oil & Gas pela autorização do uso das informações na dissertação.

Ao Sr. Milton Franke, pelos ensinamentos e pelo privilégio de trabalhar na sua equipe durante a campanha exploratória na Bacia do Solimões pela empresa HRT Oil & Gas.

Ao Bruno Cayres, que me ajudou muito na dissertação, e se propôs disponibilizar parte do seu tempo, pois também estava ocupado nas suas tarefas diárias no trabalho.

Ao Prof. João Carlos Plácido, pelos ensinamentos e direcionamento nos assuntos da dissertação.

Ao Prof. Luiz Alberto Santos Rocha, pelos ensinamentos, e um que jamais esquecerei de que devemos sempre adquirir 20% de algum conhecimento a cada ano.

Ao Oswaldo Pedrosa, pelo apoio na proposta da dissertação e várias discussões sobre o tema.

Ao Alberto Sampaio, pelo apoio e sempre ter uma análise sensata sobre vários temas.

Agradeço à minha esposa Patricia e meus filhos Pedro Paulo e Miguel, que me acompanharam nessa longa jornada e me deram incentivo para seguir em frente.

Agradeço aos meus Pais Marcos e Leila, minha irmã Maria Beatriz e meu cunhado Carlos Leandro, pelo apoio de sempre.

Resumo

Mattos, Paulo Alberto da Costa Mattos; Braga, Arthur Martins Barbosa (Orientador). **Vibrações em Colunas de Perfuração em Operações de Perfuração na Bacia do Solimões**. Rio de Janeiro, 2015. 73p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os custos de uma campanha exploratória, incluindo a perfuração de poços de petróleo estão cada vez mais elevados. As vibrações nas colunas de perfuração estão presentes a todo momento nas operações de perfuração, o que podem ocasionar a quebra destas colunas e do BHA (Bottom Hole Assembly), danos em brocas e demais equipamentos. Além do custo do possível dano e/ou perda destes equipamentos, existem os custos da sonda parada e das despesas operacionais das companhias contratadas, o chamado custo de “*Stand by*”, e o mais indesejável, a perda do poço. Fenômenos como *Bit Bounce*, *Stick-Slip* e *Forward/Backward Whirl*, que advêm das vibrações “axiais, torcionais e laterais” respectivamente, são motivos de vários estudos. Esta dissertação pretende fazer a validação do modelo matemático de dinâmica torcional utilizado na dissertação de mestrado de CAYRES (2013) para gerar mapas de estabilidade para vibrações torcionais. Nesta dissertação parâmetros reais de uma coluna de perfuração foram inseridos no modelo com objetivo de obter mapas de estabilidade de vibrações torcionais para a perfuração de um poço na Bacia de Solimões. Tais mapas de estabilidade foram gerados a partir deste modelo matemático, que na tese de CAYRES (2013), é baseado em procedimento experimental, com um atrito não linear induzindo o fenômeno *stick-slip* que está associado às vibrações torcionais. Este fenômeno tem relação entre torque e velocidade angular na broca provocando vibrações indesejáveis na coluna de perfuração. A geração destes mapas permitiu que a análise de sensibilidade e a averiguação da ocorrência ou não de vibrações torcionais fossem feitas, bem como a inserção de valores de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) de um caso real de perfuração de um poço na Bacia do Solimões. Nesta análise de sensibilidade foram considerados, além dos aspectos acima citados, o tipo de broca e formação geológica, permitindo assim a validação do modelo de CAYRES (2013) e contribuindo para a otimização dos processos operacionais da perfuração de poços de petróleo.

Palavras-chave

Vibrações torcionais; Fenômeno Stick-slip; Análise de Sensibilidade; Bacia do Solimões; poços de perfuração.

Abstract

Mattos, Paulo Alberto da Costa Mattos; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Drill String Vibrations in Solimões Basin Operations**. Rio de Janeiro, 2015. 73p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The costs of an exploration campaign, including the drilling of oil wells are increasingly high. The vibrations in the drill strings are present at all times in drilling operations that can cause damage of these drill pipe and BHA (Bottom Hole Assembly), as drill bits and other equipment. Besides the cost of a possible damage or loss of such equipment, there are the costs when the rig is not operating and the expenses of all companies involved in the operations, called the cost of "stand by", and the worst case scenario of the undesirable loss of the well. The Phenomena like *Bit Bounce*, *Stick-Slip* and *Forward/Backward Whirl*, that arises from "*axial, torsional and lateral*" vibrations respectively are the motivation of several studies. This dissertation aims to show the validation of the mathematical modeling of the torsional dynamics used in CAYRES (2013) that generate stability maps for torsional vibrations. In this dissertation real parameters from a drill string were inserted in this mathematical modeling, aiming to obtain stability maps for torsional vibrations during a drilling operation of a well in Solimões Basin. Such stability maps were generated from a dynamic model that in CAYRES (2013) thesis is based on an experimental procedure with a nonlinear friction inducing stick-slip phenomenon associated to torsional vibrations. This phenomenon is related to torque and angular velocity on the bit generating undesirable vibrations. Build stability maps and checking when torsional vibrations happen, and then comparing with a real case of WOB (weight on bit) and RPM (rotary speed) in Solimões Basin. In this sensitivity analysis were considered, besides the aspects mentioned above, the kind of bit and geological formation in order to contribute to the optimization of the oil well drilling operational process.

Keywords

Torsional Vibrations; Solimões Basin; Stick-Slip Phenomemon; Drilling Wells.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Organização da Dissertação	16
1.2. Breve discussão sobre a Bacia de Solimões	16
1.3. Revisão Bibliográfica e estado da Arte de Vibrações na Perfuração	21
1.3.1. As Vibrações	21
1.3.2. Colunas de perfuração	25
1.3.3. As Brocas	28
2. Modelo matemático do sistema	31
2.1. Critério de Severidade	33
2.2. Análise de Sensibilidade	35
2.3. Mapa de Estabilidade	36
2.4. Inserção dos Parâmetros Reais	38
3. Estudo de Casos – Bacia do Solimões	50
3.1. Descrição e relevância dos casos considerados	50
3.2. Mapas de Estabilidade nas várias profundidades	53
4. Validação do modelo, Conclusão e Recomendação	70
5. Referências bibliográficas	72

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Mapa de localização das bacias paleozoicas do Solimões, Amazonas e Parnaíba, modificado de EIRAS (1999).	16
Figura 1.2 – Mapa de Estrutural da Bacia do Solimões e Arco de Carauari (Fonte: Diabásio – Arco ou Rampa).	17
Figura 1.3 – Seção geológica longitudinal da Bacia do Solimões com a distribuição dos campos de óleo e gás, segundo EIRAS (1999) (Fonte: Petrobras).	18
Figura 1.4 – Foto da rocha diabásio (fonte: internet).	18
Figura 1.5 – Carta estratigráfica da Bacia do Solimões, segundo EIRAS (1994) (Fonte: Petrobras).	19
Figura 1.6 – Locação típica na Bacia do Solimões (Fonte: HRT Óleo & Gás).	21
Figura 1.7 – Tipos de Vibrações (Fonte: internet).	22
Figura 1.8 – Stick-slip causado por aumento de peso sobre broca, RICHARD (2001).	23
Figura 1.9 – Comportamento da coluna sob ação do Whirl, JANSEN (1990).	25
Figura 1.10 – Comando Espiralado Drill Colars (Fonte: internet).	26
Figura 1.11 – Tubos pesados (Fonte: internet).	26
Figura 1.12 – Tubos de perfuração/Drill Pipes – DP (fonte: THOMAS 2001).	27
Figura 1.13 – Drill Collar com trinca na caixa (Fonte: HRT Oil & Gas).	27
Figura 1.14 – Broca PDC (Fonte: Smith Bits – Schlumberger Company).	28
Figura 1.15 – Broca tricônica com dentes de aço (Fonte: PLÁCIDO, 2009).	29
Figura 1.16 – Broca tricônica com insertos (PLÁCIDO, 2009).	30
Figura 2.1 – Modelo Torcional com dois Graus de Liberdade – CAYRES (2013).	31
Figura 2.2 – Velocidade na broca sob vibrações torcionais e a linha limite para 60 RPM e 100 kN, CAYRES (2013).	35
Figura 2.3 – Modelo de atrito de Pavone (2004).	36
Figura 2.4 – Coeficiente de atrito estático e dinâmico, CAYRES (2013).	36
Figura 2.5 – PAVONE & DESPLANS (1994) onde mostra as regiões de Estabilidade, ou seja, com e sem vibrações torcionais.	37
Figura 2.6 – Resultado do mapa de estabilidade por CAYRES (2013) usando modelo de atrito de PAVONE (1994).	37
Figura 2.7 – Mapa de Estabilidade para 600 m.	39
Figura 2.8 – Mapa de Estabilidade para 1300 m.	40
Figura 2.9 – Mapa de Estabilidade para 1700 m.	41
Figura 2.10 – Mapa de Estabilidade para 1870 m.	42
Figura 2.11 – Mapa de Estabilidade para 1888 m.	43
Figura 2.12 – Mapa de Estabilidade para 1909 m.	44
Figura 2.13 – Mapa de Estabilidade para 1970 m.	45
Figura 2.14 – Mapa de Estabilidade para 2500 m.	46
Figura 2.15 – Mapa de Estabilidade para 2884 m.	47
Figura 2.16 – Mapa de Estabilidade para 3000 m.	48
Figura 2.17 – Mapa de Estabilidade para 600 m.	49
Figura 2.18 – Mapa de Estabilidade para 1888 m.	49
Figura 3.1 – Quadro de previsão geológica do poço em questão (Fonte: HRT Oil & Gas).	51
Figura 3.2 – Quadro de tempo de perfuração (Fonte: HRT Oil & Gas).	52

Figura 3.3 – Todos os Pontos de WOB vs RPM do Poço.	53
Figura 3.4 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 46 m a 600 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	54
Figura 3.5 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 600 m a 1700 m e o Mapa de Estabilidade para profundidade para até 1700 m.	54
Figura 3.6 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 600 m a 900 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	55
Figura 3.7 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 700 m a 800 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	56
Figura 3.8 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 800 m a 900 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	57
Figura 3.9 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 46 m a 1000 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	57
Figura 3.10 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 900 m a 1300 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m	58
Figura 3.11 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1000 m a 1100 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	59
Figura 3.12 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1100 m a 1200 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	59
Figura 3.13 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1200 m a 1300 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	60
Figura 3.14 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1500 m a 1700 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.	61
Figura 3.15 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1700 m a 3000 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	61
Figura 3.16 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1700 m a 1888 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	62
Figura 3.17 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1800 m a 1888 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	63
Figura 3.18 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1889 m a 1917 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	63
Figura 3.19 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1889 m a 2100 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	64
Figura 3.20 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2100 m a 2700 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	65
Figura 3.21 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2700 m a 2800 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	65
Figura 3.22 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2700 m a 2750 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	66
Figura 3.23 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2750 m a 2773 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	67
Figura 3.24 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2773 m a 2800 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	67
Figura 3.25 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2800 m a 2884 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	68
Figura 3.26 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2884 m a 3000 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.	69

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Quadro de Previsão Geológica (Fonte: HRT Oil & Gas)	20
Tabela 2.1 – Parâmetros da coluna e BHA utilizado por CAYRES (2013).	34
Tabela 2.2 – Formação/ Metros/ Situação da coluna no poço.	38
Tabela 2.3 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 600 m.	39
Tabela 2.4 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1300 m.	40
Tabela 2.5 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1700 m.	41
Tabela 2.6 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1870 m.	42
Tabela 2.7 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1888 m.	43
Tabela 2.8 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1909 m.	44
Tabela 2.9 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1970 m.	45
Tabela 2.10 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 2500 m.	46
Tabela 2.11 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 2884 m	47
Tabela 2.12 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 3000 m.	48

Nomenclatura

BHA - Bottom Hole Assembly

DC - Drill Collar

DOF - Degree Of Freedom (Graus de Liberdade)

DP - Drill Pipe

E - Módulo de Young

HWDP - Heavy Weight Drill Pipe

I - Momento de inércia da área

IDBHA - Diâmetro interno do BHA

IDDP - Diâmetro interno da coluna de perfuração

J - Momento de inércia

K - Rigidez da coluna de perfuração

KBHA - Rigidez do BHA

LBHA - Comprimento do BHA

LDP - Comprimento da coluna de perfuração

MATLAB - MATriz LABoratory

ODBHA - Diâmetro externo do BHA

ODDP - Diâmetro externo da coluna de perfuração

PDC - Polycrystalline Diamond Compact

ROP - Rate of Penetration (Taxa de Penetração)

RPM - Rotações por Minuto

SPRM - Velocidade de rotação na superfície

SSS - Severidade do Stick-Slip

WOB - Weight On Bit (Peso sobre a Broca)

T1 - Torque aplicado na broca

T_2 - Torque aplicado na superfície

μ - Coeficiente de atrito

ρ_{BHA} - Massa específica do BHA

ρ_{DP} - Massa específica da coluna

ν - Coeficiente de Poisson

Ω_1 - Vetor velocidade na broca

Ω_2 - Vetor velocidade na superfície

ϕ_1 - Deslocamento angular - Broca

ϕ_2 - Deslocamento angular – Top Drive

ξ - fator de amortecimento

Introdução

Uma empresa petrolífera tem como objetivo principal retirar petróleo a milhares de metros abaixo da terra, principalmente em bacias brasileiras onde a operação de perfuração é cada vez mais profunda. O petróleo, após ser gerado e migrado, é eventualmente acumulado em uma rocha que é chamada de reservatório, THOMAS (2001). Petróleo este, uma mistura complexa de hidrocarbonetos, é encontrado em rochas reservatório e, dependendo do objetivo da empresa, vários poços serão perfurados no mesmo campo. Os desafios são cada vez maiores, tendo em vista a profundidade destes reservatórios a serem alcançados, com o objetivo a mais de 7000 m de profundidade.

Para que estes desafios sejam vencidos, e chegar ao ponto de ser um negócio rentável para seus acionistas, o gasto com pesquisas geológicas, geofísicas, ambientais e de correlação de poços são fundamentais para se entender melhor a área, e melhorar o grau de acerto. Os gastos crescem mais durante a fase exploratória e melhorar os processos de análise são muito importantes para se programar uma intervenção bem-sucedida, que pode significar o sucesso ou insucesso deste empreendimento.

Dentre todos os desafios descritos acima, um dos mais custosos na fase exploratória é a perfuração de um poço, principalmente aqueles gastos incorridos à quebra de brocas de perfuração, na maioria das vezes, causados por vibrações na coluna de perfuração. O sistema mecânico é basicamente constituído de um torque aplicado na superfície sobre uma coluna que, por sua vez, transmite o torque para a broca. O peso aplicado sobre a broca e a velocidade de rotação aplicada na superfície são fatores que causam vibrações. As vibrações axiais estão relacionadas com o constante impacto da broca com o fundo do poço. As vibrações torcionais estão relacionadas com o atrito seco entre a broca e o poço. As vibrações torcionais na coluna de perfuração geram o fenômeno de stick-slip. A ocorrência do stick-slip é uma das principais causas que geram falha nas brocas e este fenômeno causa uma grande variação na velocidade de rotação no fundo do poço e pode ocasionar a completa parada da operação. Conforme dito

anteriormente, entre os varios fatores que podem ocasionar o fenomeno de stick-slip, podemos ressaltar dois deles que são: velocidade de rotação e peso sobre a broca.

E as vibrações laterais estão relacionadas com o impacto do BHA (Bottom Hole Assembly) e coluna na parede do poço.

A literatura apresenta diversos modelos matemáticos para tratar as vibrações em colunas de perfuração, dentre os quais se destacam: BRETT (1992), SPANOS (1995), LEINE (2000) que modelam as vibrações na coluna de perfuração. Dentre todos os modelos revistos é interessante destacar a dissertação de mestrado de CAYRES (2013), que testou e simulou vários modelos criando um modelo matemático para a obtenção de mapas de estabilidade levando em consideração os parâmetros da coluna de perfuração. O objetivo desta dissertação é validar modelo matemático apresentado na dissertação de CAYRES (2013), gerando mapas de estabilidade com dados reais de uma coluna de perfuração e comparando com uma operação real com dados de peso sobre a broca e velocidade de rotação como parâmetros determinantes para o aparecimento do fenômeno stick-slip gerado por vibrações torcionais na Bacia de Solimões. Vale ressaltar que foram realizadas quase 3000 plotagens de pontos nos mapas típicos de estabilidade gerado do modelo de CAYRES (2013), o que quer dizer que cada ponto está relacionado a uma profundidade com WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) em que foram operados.

A Bacia de Solimões possui característica geológica peculiar em sua estratigrafia, onde a presença da rocha ígnea diabásio ocorre em 3 (três) intervalos distintos de profundidade. A presença de diabásio na coluna de perfuração está comumente associada a uma fase de atenção, pois historicamente são estes intervalos que acusam a maior incidência de vibrações torcionais e consequentemente o fenômeno stick-slip, por conta de seu grau de dureza.

Esta dissertação procura validar o modelo de CAYRES (2013) comparando os momentos mais críticos durante a atividade de perfuração realizada em 2012 pela HRT Oil & Gas. Vale ressaltar que todos os dados disponíveis nesta dissertação foram autorizados pela HRT Oil & Gas.

1.1

Organização da Dissertação

Após esta introdução, será apresentada no item 1.3 a revisão da literatura, onde são mostradas as vibrações axiais, torcionais e laterais e no item 1.4 aborda os aspectos gerais da Bacia de Solimões.

O capítulo 2 apresenta o modelo matemático de CAYRES (2013) e as simulações com os dados reais da coluna de perfuração. Destas simulações são gerados mapas típicos de estabilidade para o poço em questão.

O capítulo 3 são descritos os estudos de caso onde são plotados os pontos de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) para cada profundidade. Comparações entre o modelo e a operação são feitas.

No Capítulo 4 são apresentadas a conclusão e recomendação.

1.2

Breve discussão sobre a Bacia de Solimões

A Bacia do Solimões, produtora de óleo, condensado e gás, localiza-se na região norte do Brasil, Estado do Amazonas, como mostrado no mapa de localização mostrado na figura 1.1.



Figura 1.1 – Mapa de localização das bacias paleozoicas do Solimões, Amazonas e Parnaíba, modificado de EIRAS (1999).

Trata-se de uma bacia paleozóica intracratônica com cerca de 950.000 km² de área sedimentar total, dos quais 480.000 km² correspondem à área prospectável para petróleo (óleo + gás + condensado). Limita-se ao norte pelo Escudo das Guianas, ao sul pelo Escudo Brasileiro, a leste pelo Arco de Purus e a oeste pelo Arco de Iquitos. O Alto de Carauari divide a bacia em Sub-bacia do Juruá, a leste e Sub-bacia do Jandiatuba, a oeste. As rochas paleozóicas não afloram e encontram-se intrudidas por diques e soleiras de diabásio conforme pode ser visto na figura 1.2, os quais influenciaram fortemente a evolução térmica da matéria orgânica contida na rocha geradora e do petróleo acumulado na rocha reservatório, compensando a baixa efetividade da sobrecarga sedimentar e reduzido gradiente geotérmico, BARATA e CAPUTO (2007).

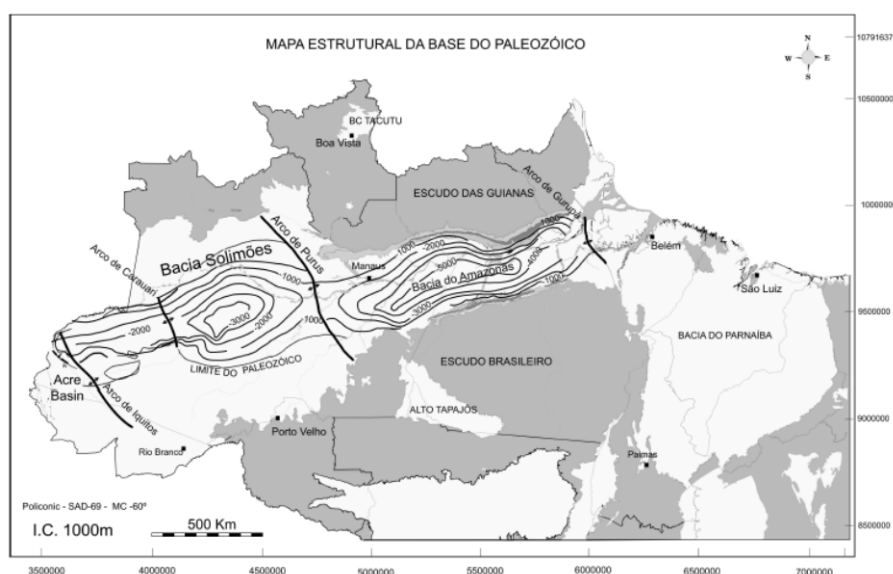


Figura 1.2 – Mapa de Estrutural da Bacia do Solimões e Arco de Carauari
(Fonte: Diabásio – Arco ou Rampa).

O posicionamento estrutural da soleira de diabásio (três soleiras são comuns nesta região) está diretamente relacionado à presença de óleo ou gás. Quanto mais profunda, conseqüentemente mais próxima das rochas geradoras e reservatórios, tem-se a presença do gás como nos campos descobertos na região do Rio Juruá. Se a soleira é mais rasa, menor efeito térmico sobre o gerador e se tem, então, óleo, como nos campos da Província do Rio Urucu. Na figura 1.3, mostra a seção geológica longitudinal da Bacia do Solimões.

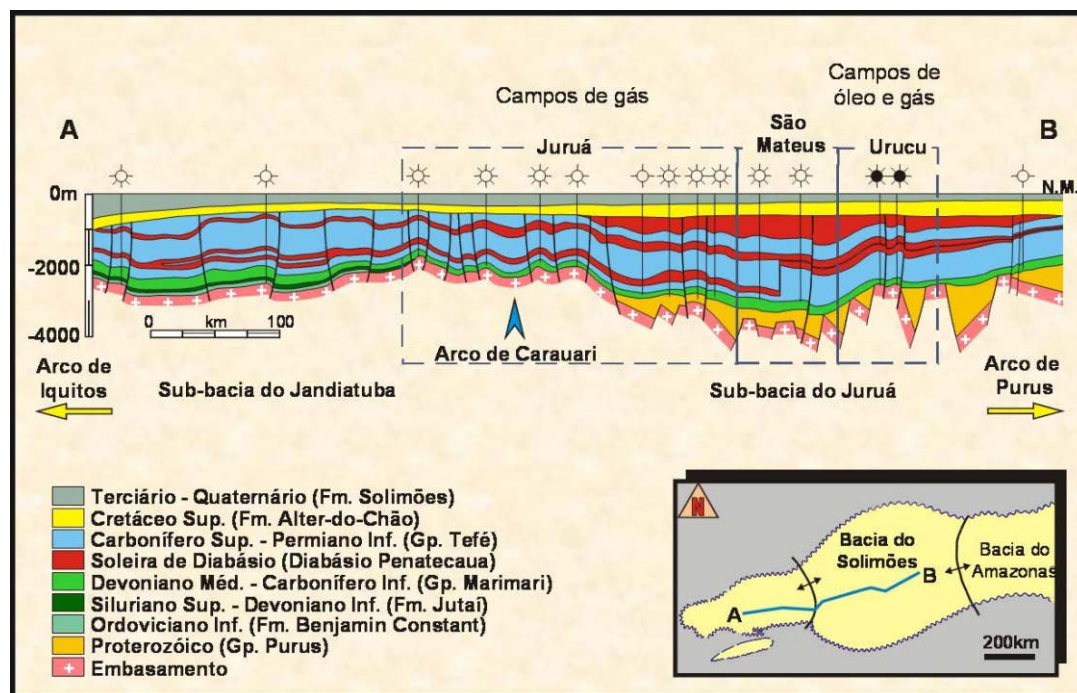


Figura 1.3 – Seção geológica longitudinal da Bacia do Solimões com a distribuição dos campos de óleo e gás, segundo EIRAS (1999) (Fonte: Petrobras).

Existem dois lados, um positivo e outro negativo, em se encontrar a formação diabásio na perfuração de um poço, rocha esta mostrada na figura 1.4. O lado positivo foi a importância na geração de óleo e gás, assim como, no craqueamento de óleo nas duas bacias paleozóicas, pois sem ele não haveria calor para a transformação da matéria orgânica. O lado negativo é que continua sendo vilão quando dificulta a penetração das ondas sísmicas, o que implica seções sísmicas de baixa qualidade. A operação de perfuração é prejudicada uma vez que o planejamento não é preciso e neste caso, a conversão tempo-profundidade é deficitária pois a espessura real das soleiras não são muito bem definidas. Neste caso, a operação fica mais suscetível às vibrações de coluna de perfuração.



Figura 1.4 – Foto da rocha diabásio (fonte: internet).

[illegible]

Com base, principalmente, em informações de poços de correlação, estima-se as formações possíveis a serem encontradas no novo poço a ser perfurado. Formação, litologia, topo e base de cada formação são informações importantes tanto para a equipe geológica, quanto para as equipes de perfuração.

no escritório e no campo. Na tabela 1.1, segue um exemplo onde podemos observar um quadro de previsão geológica.

Tabela 1.1 – Quadro de Previsão Geológica (Fonte: HRT Oil & Gas)

Formação	Litologias Previstas	Gradiente (psi/m)	Topo PM (m)	Base PM (m)	Observações
SOLIMÕES	Argilito, Arenito e Calcarenito.	1,42	0 m	381 m	
ALTER DO CHÃO	Argilito e Arenito	1,42	381 m	749 m	
FONTE BOA	Siltito, Calcarenito e Arenito	1,42	749 m	769 m	
SOLEIRA SUPERIOR	Diabásio	1,42	769 m	919 m	
FONTE BOA	Siltito, Calcarenito e Arenito	1,42	919 m	1067 m	
SOLEIRA SUPERIOR	Diabásio	1,42	1067 m	1423	
CARAUARI	Siltito, Calcarenito, Calcilutito, Folhelho, Anidrita, Arenito e Halita.	1,42	1423 m	1847 m	
SOLEIRA MÉDIA	Diabásio	1,42	1847 m	2018 m	
CARAUARI		1,42	2018 m	2673 m	
SOLEIRA INFERIOR	Diabásio	1,42	2673 m	2870 m	

Na figura 1.6, podemos ver uma locação típica de uma operação de perfuração em terra (Bacia do Solimões/AM). A fotografia foi tirada em 2011, durante a campanha exploratória da empresa HRT Oil & Gas.



Figura 1.6 – Locação típica na Bacia do Solimões (Fonte: HRT Óleo & Gás).

1.3

Revisão Bibliográfica e estado da Arte de Vibrações na Perfuração

1.3.1

As Vibrações

As colunas de perfuração ficam submetidas a diversas formas de vibrações. Essas vibrações podem ter diversas causas, como desbalanceamentos de massa na coluna, desalinhamentos e flexões na coluna, irregularidades no fundo do poço, atritos da broca e coluna com o fundo e parede do poço, a própria dinâmica envolvida na interação da broca com a formação, dentre outras, BESALSOW & PAYNE (1986), DIVENYI (2009).

Fadiga induzida por vibrações severas aparece ao lado de outros eventos, tais como manuseio inadequado de equipamentos, rotação e peso sobre broca excessivos e ambiente corrosivo, como uma das principais causas de rompimento de colunas de perfuração, DIVENYI (2009).

Existem basicamente três tipos de vibrações. Na figura 1.7, mostra as vibrações axiais, as torcionais e as vibrações laterais.

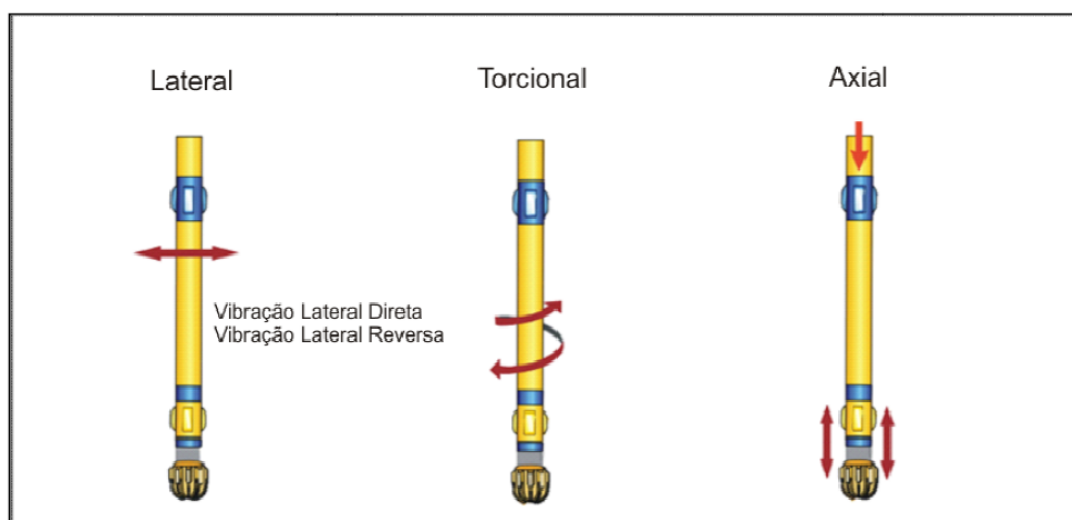


Figura 1.7 – Tipos de Vibrações (Fonte: internet).

As vibrações axiais da coluna de perfuração correspondem às vibrações com movimentos paralelos ao eixo da coluna. Um fenômeno importante e particular das vibrações axiais é o chamado bit bounce. Este fenômeno é caracterizado pela perda de contato de forma intermitente da broca com o fundo do poço, com a broca sofrendo impactos repetidamente contra a formação, DIVENYI (2009).

Um fenômeno típico das vibrações torcionais muito comum em operações de perfuração é o chamado stick-slip. Trata-se de um caso em geral mais severo de vibrações torcionais, em que a broca chega realmente a parar seu movimento torcional em relação à formação por um período finito de tempo (sendo este o período de stick). Quando isso ocorre, a rotação no topo da coluna continua, e a coluna passa a se deformar em torno de seu eixo, armazenando energia torcional como uma mola. Esta deformação prossegue até que o torque aplicado sobre o BHA pela coluna seja suficiente para superar todas as forças de atrito estático atuando sobre o BHA. Neste instante, a broca finalmente volta a girar, liberando a energia que estava armazenada na coluna, agora na forma de energia cinética (este é o período de slip), DIVENYI (2009). Já se observou que este fenômeno ocorre durante até 50% do tempo de perfuração. O fenômeno de stick-slip é tido como um dos modos de vibração mais danosos à coluna quando se perfura com baixas

velocidades de rotação. E até vibrações de stick-slip com baixa amplitude são tidas como sendo uma das maiores causas de desgaste de brocas, TUCKER & WANG, (1999) & DIVENYI (2009).

RICHARD (2001) publicou resultados de fundo de poço, cedidos pela empresa Security-DBS, onde é possível observar a influência do peso sobre broca e da rotação no desenvolvimento/ amortecimento das oscilações do tipo stick-slip. Na figura 1.8 é verificado que o aumento do peso sobre broca induziu a amplificação das vibrações até a ocorrência de stick-slip, ANJOS (2013).

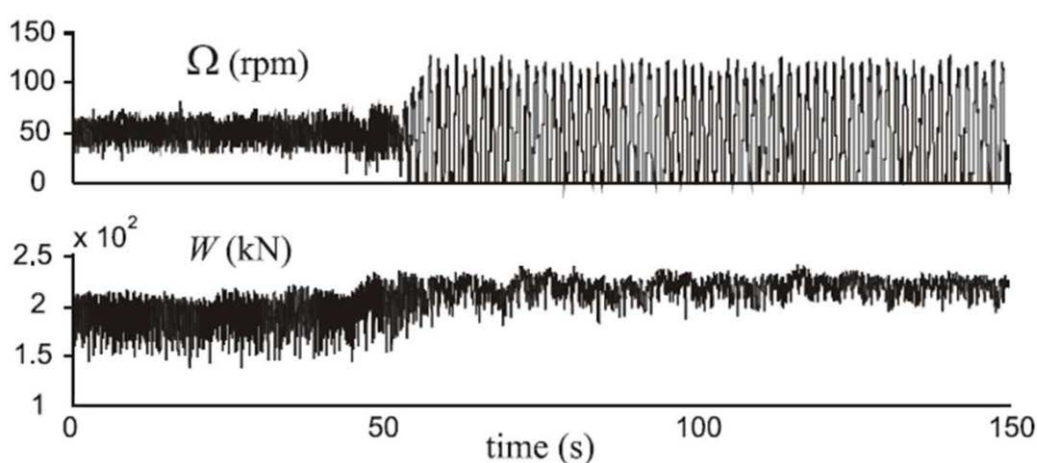


Figura 1.8 – Stick-slip causado por aumento de peso sobre broca, RICHARD (2001).

Em sua dissertação de mestrado, ANJOS (2013) faz um ótimo resumo sobre as vibrações torcionais do tipo stick-slip: Grande variação da rotação de fundo, onde por um tempo finito a broca encontra-se parada e em sequência gira com velocidade de duas a três vezes a rotação imposta em superfície; O aumento do peso sobre broca e/ou redução das rotações pode induzir o desenvolvimento de vibrações torcionais severas. Assim como o inverso tende a eliminar tais oscilações; Vibrações do tipo stick-slip estão mais associadas às brocas PDC, com desgastes na estrutura de corte e durante a perfuração de rochas duras; Brocas caracterizadas com relação decrescente entre torque e velocidade angular estão mais susceptíveis a Stick-slip; Existência de uma velocidade limite da qual, para rotações superiores, oscilações torcionais severas não são mais observadas; A frequência de vibração durante o stick-slip é ligeiramente menor que o primeiro modo natural de vibração da coluna em torção; O espectro de amplitude das forças

apresenta um sinal bastante rico e não se limita às frequências de vibrações da coluna; Vibrações do tipo Stick-slip são inversamente relacionadas às vibrações laterais.

Embora a rotação da coluna seja um parâmetro de entrada do sistema (controlado de superfície), este apresenta flutuações em torno de seu valor médio, decorrentes das vibrações torcionais inevitáveis em qualquer sistema de perfuração rotativa.

PAVONE & DESPLANS (1994) trabalhou com dados experimentais que apresentaram o fenômeno stick-slip e desenvolveu um modelo de atrito para descrever o Torque. Dois métodos de mitigação ao Stick-slip foram observados: Controle PID e uma ferramenta anti Stick-slip.

HALSEY, KYLLINGSTAG, AERRESTAD & LYSNE (1986) apresentaram um método matemático computacional para cálculo de frequências de ressonância torcional em colunas de perfuração e concluíram que estas são independentes dos efeitos da taxa de rotação, peso sobre a broca e amortecimento.

As vibrações laterais são muitas vezes citadas como as vibrações mais danosas às colunas de perfuração. No entanto, durante muito tempo, esse modo de vibração foi desconsiderado pela indústria. Isso se deve ao fato de que é muito difícil detectar sua presença na superfície, e por isso, ainda que no fundo do poço haja vibrações severas neste modo, elas praticamente não são transferidas para a superfície. Este fenômeno curioso ocorre porque as vibrações laterais ficam confinadas à parte comprimida da coluna, não sendo transmitidas para além do ponto neutro. Isso acontece mesmo para poços verticais, nos quais a dissipação até a superfície por conta do atrito com as paredes do poço é muito pequena. Como são as mais danosas e as mais difíceis de serem detectadas, pode-se ver claramente que as vibrações laterais são muito perigosas para operações de perfuração, DIVENYI (2009).

As vibrações laterais também possuem um caso específico de vibrações críticas, chamado whirl, como mostrado na figura 1.9 do artigo de JANSEN (1990). Este fenômeno é comumente encontrado em colunas de perfuração. Trata-se de uma flexão da coluna induzida por forças centrífugas, como resultado de sua rotação, DIVENYI (2009).

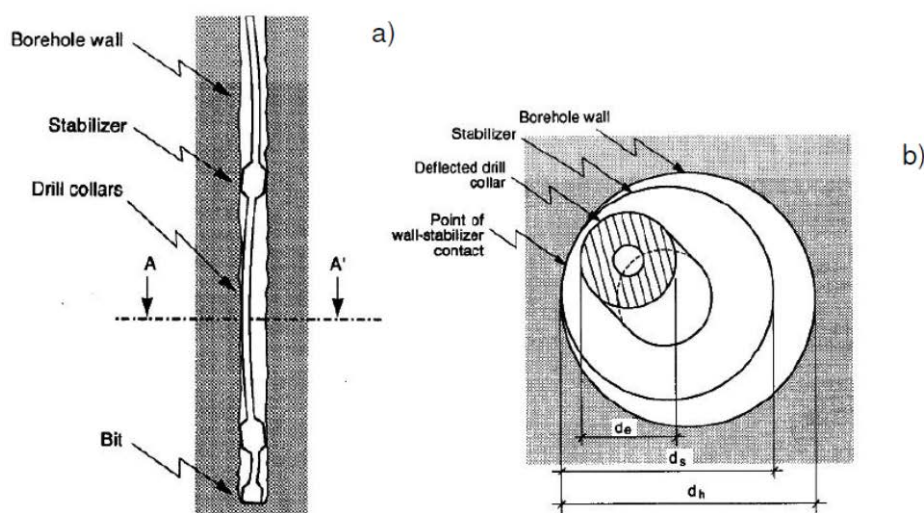


Figura 1.9 – Comportamento da coluna sob ação do Whirl, JANSEN (1990).

LEINE & VAN CAMPBELL (2000) aplicaram a teoria em sistemas de bifurcação descontínuos na vibração de colunas de perfuração, onde foi realizada uma investigação matemática dos movimentos de stick-slip e whirl sob a influência de fluidos de perfuração e VASCONCELOS (2012) menciona o artigo de LEINE & VAN CAMPBELL (2000) em sua dissertação de mestrado.

YIGIT & CHRISTOFOROU (1999) publicaram um artigo sobre vibrações torcionais e laterais acopladas ativamente controladas e suas dependências e em 2002, adicionaram as vibrações axiais às demais vibrações.

SPANOS, SENGUPTA, CUNNINGHAM & PASLAY (1995) publicaram um artigo sobre as flutuações sobre o peso sobre a broca tricônica. Em certos casos, o valor do peso sobre a broca, periodicamente, reduz a zero. Isto acontece quando a broca para de ter contato com a superfície da formação que está sendo perfurada.

1.3.2

Colunas de perfuração

Durante a perfuração é necessária a concentração de grande quantidade de energia na broca para cortar as diversas formações rochosas. Esta energia, em forma de rotação peso aplicados sobre a broca, é transferida às rochas para

promover sua ruptura e desagregação em forma de pequenas lascas, ou cascalhos, que são removidos do fundo do poço e carregados até a superfície pelo fluxo do fluido de perfuração, THOMAS (2001).

A coluna de perfuração é a responsável direta por todo este processo e consta dos seguintes componentes principais: comandos, tubos pesados e tubos de perfuração.

Comandos

Os comandos (Drill Collars – DC) são elementos tubulares fabricados em aço forjado, usinados e que possuem alto peso linear devido à grande espessura de parede como pode ser visto na figura 1.10.

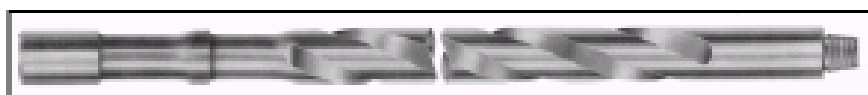


Figura 1.10 – Comando Espiralado Drill Collars (Fonte: internet).

Suas principais funções são fornecer peso sobre a broca e prover rigidez à coluna, permitindo melhor controle da trajetória do poço, THOMAS (2001)

Tubos pesados

Os tubos pesados (Heavy-Weight Drill Pipes – HWDP) são elementos tubulares de aço forjado e usinados (figura 1.11) que tem como função principal promover uma transição de rigidez entre os comandos e os tubos de perfuração, diminuindo a possibilidade de falha por fadiga.

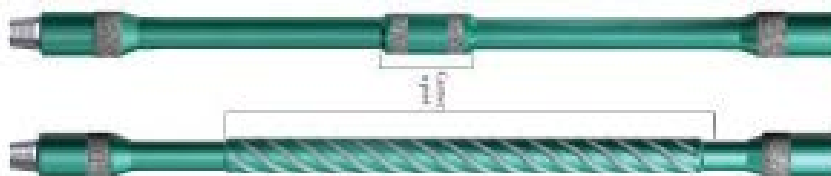


Figura 1.11 – Tubos pesados (Fonte: internet).

Tubos de Perfuração

Os tubos de perfuração (Drill Pipes – DP) são tubos de aço sem costura (figura 1.12), tratados internamente com aplicação de resinas para diminuição do desgaste interno e corrosão, possuindo nas suas extremidades as conexões cônicas conhecidas tool joints, que são soldadas no seu corpo.



Figura 1.12 – Tubos de perfuração/Drill Pipes – DP (fonte: THOMAS 2001).

E ainda existem os acessórios da coluna da perfuração como: Subs (içamento, broca e cruzamento), Estabilizadores, Escareadores, Alargadores e Amortecedores de Vibrações, THOMAS (2001).

Na figura 1.13, podemos ver um drill collar avariado, após uma quebra da coluna de perfuração.



Figura 1.13 – Drill Collar com trinca na caixa (Fonte: HRT Oil & Gas).

1.3.3

As Brocas

As brocas são equipamentos que tem a função de promover a ruptura e desagregação das rochas e formações. O estudo das brocas, considerando seu desempenho e economicidade, é um dos fatores importantes na perfuração de poços de petróleo. Existem brocas sem partes móveis e brocas com partes móveis. THOMAS (2001).

As brocas sem partes móveis: Integral de lâminas de aço, diamantes naturais e diamantes artificiais (PDC).

As brocas PDC (Polycrystalline Diamond Compact), mostrada na figura 1.14, cuja estrutura de corte é formada por pastilhas ou compactos, montadas sobre bases cilíndricas instaladas no corpo da broca. O seu mecanismo de perfuração é por cisalhamento, THOMAS (2001).

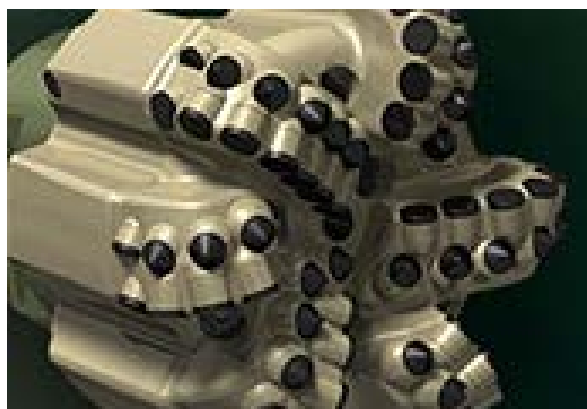


Figura 1.14 – Broca PDC (Fonte: Smith Bits – Schlumberger Company).

As brocas para rochas mais moles possuem poucos cortadores de maior tamanho, enquanto que para rochas mais duras possuem cortadores menores e em maior quantidade. Como nas brocas de diamantes naturais, o tamanho e a quantidade de cortadores definem para que tipo de formação a broca foi projetada.

As brocas PDC foram introduzidas para se perfurar formações moles com altas taxas de penetração e maior vida útil, pois *as formações mais duras o calor gerado durante a perfuração destrói a ligação entre os diamantes e o cobalto*.

Foram então desenvolvidos os compactos TSP (Thermally Stable Polycrystalline), os quais, por não terem cobalto, resistem mais ao calor, THOMAS (2001).

Brocas com partes móveis

As brocas com partes móveis podem ter de um a quatro cones, sendo as mais utilizadas, as brocas tricônicas pela sua eficiência e menor custo inicial em relação às demais. Elas possuem dois elementos principais: estrutura cortante e rolamentos, THOMAS (2001).

Estrutura cortante

Os elementos que compõem a estrutura cortante das brocas tricônicas são fileiras de dentes montados sobre o cone que se interpõem entre as fileiras dos dentes dos cones adjacentes, quando se aplica à rotação da broca.

Quanto à estrutura cortante, as brocas tricônicas são divididas em: brocas dentes de aço (figura 1.15) e brocas de insertos (figura 1.16).

As de dentes de aço tem sua estrutura cortante fresada no próprio cone.



Figura 1.15 – Broca tricônica com dentes de aço (Fonte: PLÁCIDO, 2009).

Já as de inserto tem insertos de carbureto de tungstênio instalados por processo de interferência em orifícios abertos na superfície do cone. Existem vários formatos de dente e de inserto, cada qual para um tipo de formação.



Figura 1.16 – Broca tricônica com insertos (PLÁCIDO, 2009).

A ação da estrutura cortante das brocas tricônicas envolve a combinação de ações de raspagem, lascamento, *esmagamento* e erosão por impacto dos jatos de lama.

Nas bocas projetadas para rochas moles o efeito da raspagem é predominante. *Em rochas duras, onde a taxa de penetração é baixa e os custos de perfuração tendem a ser mais altos, o mecanismo de esmagamento provou ser o mais adequado*, THOMAS (2001).

Modelo matemático do sistema

O modelo matemático para geração de mapas de estabilidade utilizado por CAYRES (2013) em sua dissertação de mestrado, é objeto de validação nesta dissertação.

Segundo CAYRES (2013), modelos determinísticos têm sido amplamente aplicados. No entanto, modelos estocásticos ganharam terreno nas pesquisas acadêmicas de perfuração, a fim de proporcionar uma melhor descrição das condições de perfuração de poços e estimativa de custos. Porém, tais modelos estocásticos apresentam um alto custo computacional e muito difíceis em tê-los rodando em tempo real na indústria, perdendo o aspecto operacional de tomada de decisão que os mapas de estabilidade podem proporcionar. Neste sentido CAYRES (2013) utilizou um modelo determinístico com o objetivo de alcançar rápido desempenho computacional, identificando mapas de estabilidade das vibrações torcionais. Assim a modelagem determinística apresenta custo x benefício para a geração dos mapas de estabilidade identificando os momentos críticos (stick-slip) com antecedência a fim de atenuar vibrações torcionais durante a operação de perfuração. Parâmetros concentrados é o método utilizado. Todos os modelos de espaço da dinâmica de torção da perfuração por CAYRES (2013) foram resolvidas usando solucionadores MATLAB/ODE23t, e este método foi utilizado nas simulações desta dissertação.

CAYRES (2013) diz que a utilização de parâmetros concentrados nos permite reduzir o modelo a equações diferenciais ordinárias. Um critério para vibrações torcionais é estabelecido de modo a distinguir as zonas de vibrações torcionais aceitáveis e inaceitáveis.

Em um modelo dinâmico com dois graus de liberdade, o torque imposto na superfície é aplicado. O modelo é parecido com um pêndulo torcional (duplo) como podemos verificar na figura 2.1. As equações elétricas do motor do top drive não fazem parte do modelo, assim como a dinâmica das vibrações axiais e laterais não foram investigadas. Nesta modelagem, o BHA foi assumido como

corpo rígido. Os dois graus de liberdade são governados pela equação abaixo CAYRES (2013).

A coluna é tratada como um sistema de parâmetros concentrados reduzindo o modelo a equações diferenciais ordinárias.

A rigidez da coluna k é dada pelos drill-pipes e o fluido de perfuração será representado pelo coeficiente de amortecimento viscoso linear, c .

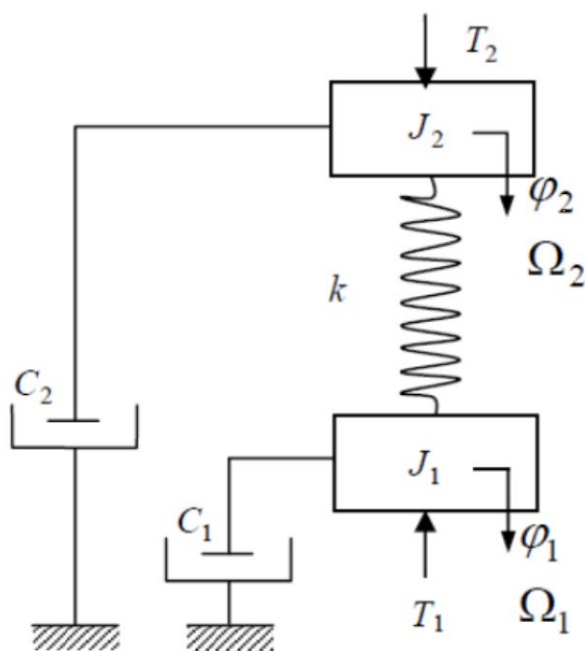


Figura 2.1 – Modelo Torcional com dois Graus de Liberdade – CAYRES (2013).

As duas equações diferenciais a seguir, segundo CAYRES (2013) são governadas por:

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Omega}_1 \\ \dot{\Omega}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + C_s & -C_s \\ -C_s & C_2 + C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

onde T_1 é o torque na broca, T_2 é o torque na superfície. J_1 e J_2 , o equivalente momento de inércia na extremidade inferior e extremidade superior, respectivamente. C_1 e C_2 são amortecimento da lama, Ω_1 a velocidade de rotação na broca e Ω_2 a velocidade de rotação na superfície (SRPM), C_s o amortecimento estrutural, φ_1 e φ_2 , o deslocamento rotacional (angular) da broca e

no top drive (equipamento), respectivamente, começando com zero no tempo $t = 0$, e k é a equivalente de rigidez do tubo de perfuração.

Os comprimentos LDP, LBHA, as densidades ρ_{DP} e ρ_{BHA} (kg/m³), os outros diâmetros ODDP, ODBHA, os diâmetros internos IDDP, IDBHA, os momentos de inércia da área IDP, IBHA para o tubo de perfuração, e o BHA, respectivamente.

Os momentos de inércia da área são dadas por:

$$I_{BHA} = \frac{\pi}{32} (OD_{BHA}^4 - ID_{BHA}^4),$$

$$I_{DP} = \frac{\pi}{32} (OD_{DP}^4 - ID_{DP}^4).$$

Da segunda equação acima, a rigidez k é dada por

$$k = \frac{G I_{DP}}{L_{DP}},$$

Onde, G é o modulo de cisalhamento:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

O momento de inércia de massa equivalente de o BHA pode ser escrito

$$J_1 = \rho_{BHA} I_{BHA} L_{BHA},$$

e o momento de inércia em extremidade superior é assumido 1000 kgm².

O amortecimento lama é escrito em termos de um fator de amortecimento da lama:

$$C_1 = D r L_{DP}.$$

O amortecimento estrutural é dada por $C_s = 2\xi \sqrt{k J_1}$, onde ξ é o fator de amortecimento. O valor do fator de amortecimento é $\xi = 0.02$

2.1

Critério de Severidade

CAYRES (2013) em sua dissertação mostra a equação de critério que é usada na indústria para avaliar a severidade do stick-slip (SSS):

$$SSS = \left(\frac{DRPM_{max} - DRPM_{min}}{2 SRPM} \right) \cdot 100.$$

Por exemplo, se o SSS é igual a 1 significa que a amplitude de oscilação atinge o valor duplo do SRPM (velocidade de rotação imposta na superfície). Na figura 2.2 é mostrado dois graus de liberdade no sistema de vibrações de torção e o limite. Ainda na figura 2.2 as linhas vermelhas no gráfico descrevem que entre elas não há vibração e o peso (WOB) é aplicado depois de 60 segundos para eliminar o comportamento transiente do sistema de perfuração. As velocidades, mínima e máxima na broca representadas por DRPM_{máx} (máxima velocidade de rotação no fundo do poço) e DRPM_{min} (mínima velocidade de rotação no fundo do poço) significa que o cálculo da amplitude de oscilação foi comparada com a velocidade imposta na superfície. CAYRES (2013) assumiu que, o valor de SSS (severidade do stick-slip) é comparado com um valor empírico de 15%, ou seja, se SSS (severidade do stick-slip) é maior ou igual 15% significa que o sistema estará em vibração torcional indesejável.

Abaixo, seguem os parâmetros utilizados na dissertação de CAYRES (2013) utilizados no modelo:

Tabela 2.1 – Parâmetros da coluna e BHA utilizado por CAYRES (2013).

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρDP	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	2750	M
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	M
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	M
Massa específica do BHA	ρBHA	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	400	M
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2095	M
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0714	M
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

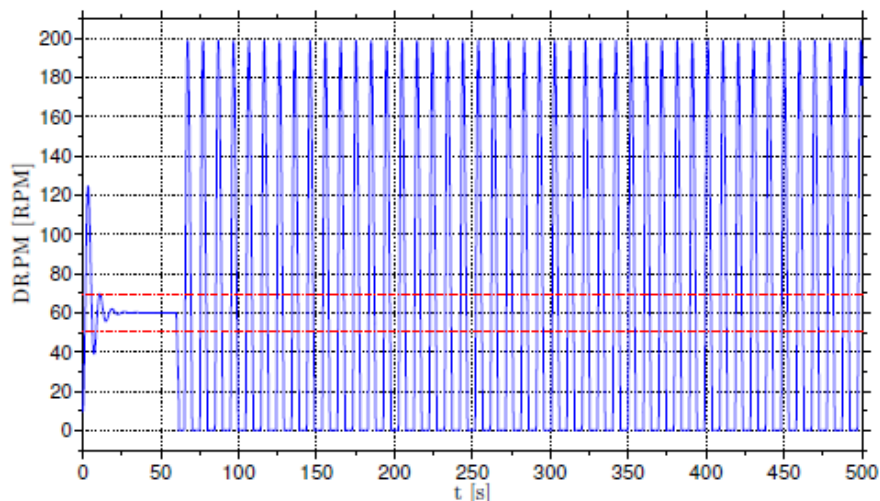


Figura 2.2 – Velocidade na broca sob vibrações trocionais e a linha limite para 60 RPM e 100 kN, CAYRES (2013).

2.2

Análise de Sensibilidade

Segundo CAYRES (2013) o torque aplicado na broca, T_1 , é modelado como o atrito responsável por dissipar energia do sistema na interação broca-rocha. Os parâmetros preponderantes são WOB (peso sobre a broca), (Pf) fator proporcional (relacionado ao raio da broca) e coeficiente de atrito (μ). A expressão abaixo representa o Torque aplicado na broca:

$$T_1(\Omega_1) = Pf \cdot WOB \cdot \mu(\Omega_1)$$

PAVONE e DESPLANS (1994) desenvolveram um modelo de atrito baseado em dados de campo coletados através de um dispositivo chamado “The televigile measurement device”. Este dispositivo foi colocado sobre a broca e sua função era medir e transmitir dados sobre a dinâmica do BHA. Este modelo pode ser visto na figura 2.3, CAYRES (2013).

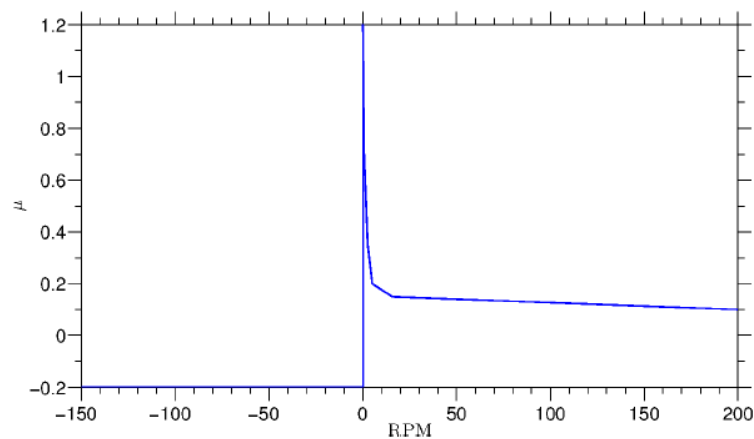


Figura 2.3 – Modelo de atrito de Pavone (2004).

CAYRES (2013) menciona em sua dissertação que utilizou nos modelos de atrito, o atrito estático e atrito dinâmico, respectivamente os valores de 1,1 e 1, figura 2.4. Estes valores de atrito foram utilizados nas simulações para obtenção dos mapas de estabilidade.

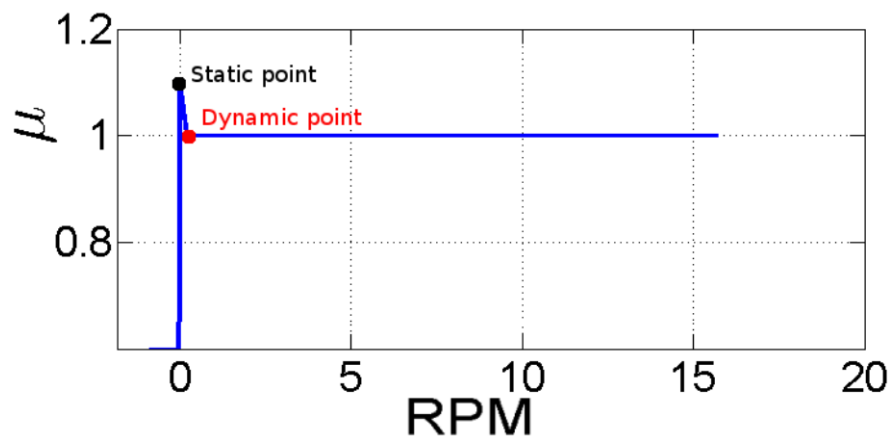


Figura 2.4 – Coeficiente de atrito estático e dinâmico, CAYRES (2013).

2.3

Mapa de Estabilidade

Em PAVONE e DESPLANS (1994), o mapa de estabilidade apresentado como na figura 2.5.

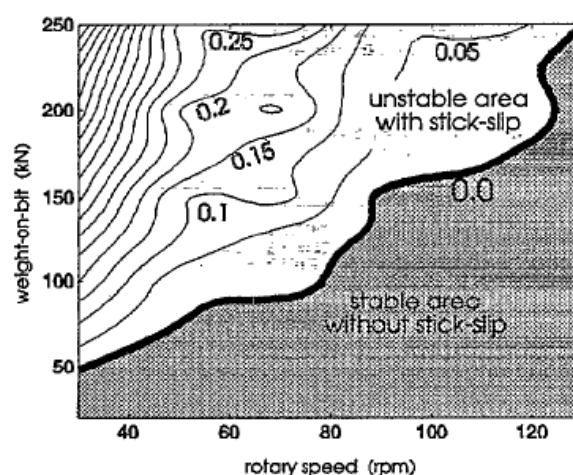


Figura 2.5 – PAVONE & DESPLANS (1994) mostra as regiões de estabilidade, ou seja, com e sem vibrações torcionais.

Um mapa típico de estabilidade para vibrações torcionais é representado por set-points de WOB x RPM, isto porque são parâmetros que podem ser controlados nas operações de campo. Parâmetros que influenciam na estabilidade como característica geológica e tipo de broca não podem ser mudados quando necessário. O mapa de estabilidade construído a partir do modelo de CAYRES (2013) é mostrado na figura 2.6 como resultado do mapa de estabilidade por CAYRES (2013) usando modelo de atrito de PAVONE (1994)

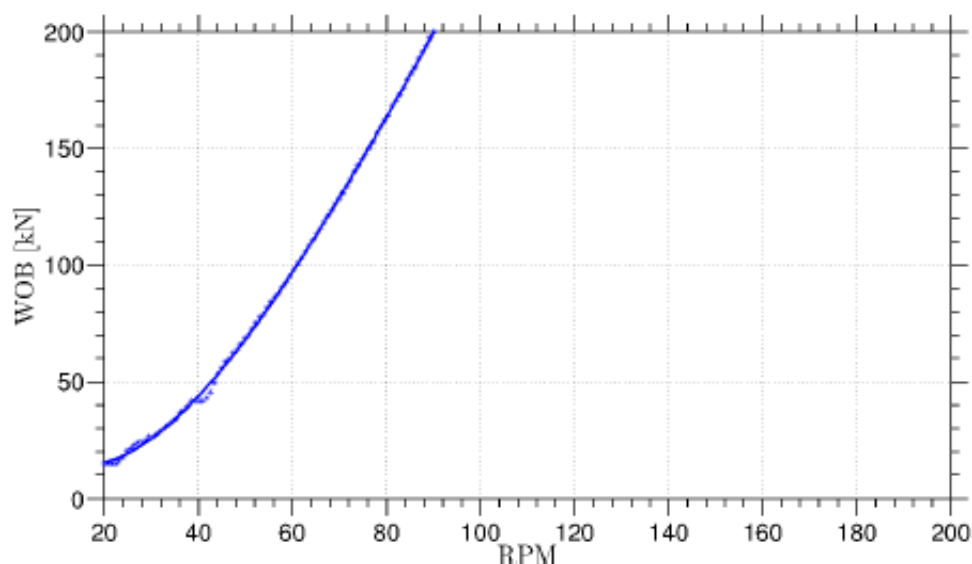


Figura 2.6 – Resultado do mapa de estabilidade por CAYRES (2013) usando modelo de atrito de PAVONE (1994).

2.4

Inserção dos Parâmetros Reais

Os parâmetros da coluna foram inseridos no modelo mostrado por CAYRES (2013). Foram simulados para 10 (dez) profundidades diferentes. As profundidades foram escolhidas pelo critério operacional da coluna de perfuração. Foram estabelecidas duas situações: profundidade de operação normal e profundidade quando há quebra da coluna.

Pelo quadro mostrado na Tabela 2.2, foram escolhidas 04 (quatro) profundidades com quebras na coluna de perfuração a seguir: 1888 m, 1909 m, 1970 m e 2884 m. e 06 (seis) profundidades onde a coluna estava perfurando normalmente a seguir descritas: 600 m, 1300 m, 1700 m, 1870m, 2500m e 3000 m.

Tabela 2.2 – Formação/ Metros/ Situação da coluna no poço.

	Formação	Metros	Situação
1	Alter do Chão	600	Perfurando
2	Soleira Superior	1300	Perfurando
3	Carauari	1700	Perfurando
4	Soleira Média	1870	Perfurando
5	Soleira Média	1888	Quebra
6	Soleira Média	1909	Quebra
7	Soleira Média	1917	Quebra
8	Carauari	2500	Perfurando
9	Soleira Inferior	2884	Quebra
10	Soleira Inferior	3000	Perfurando

Os mapas obtidos para cada simulação para 2 (dois) graus de liberdade utilizando o modelo de Cayres (2013) serão mostrados a seguir.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 600 m, como visto na tabela 2.3:

Tabela 2.3 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 600 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	600	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.7, vemos que a curva se mostrou bem diferente das encontradas para maiores profundidades como veremos mais à frente.

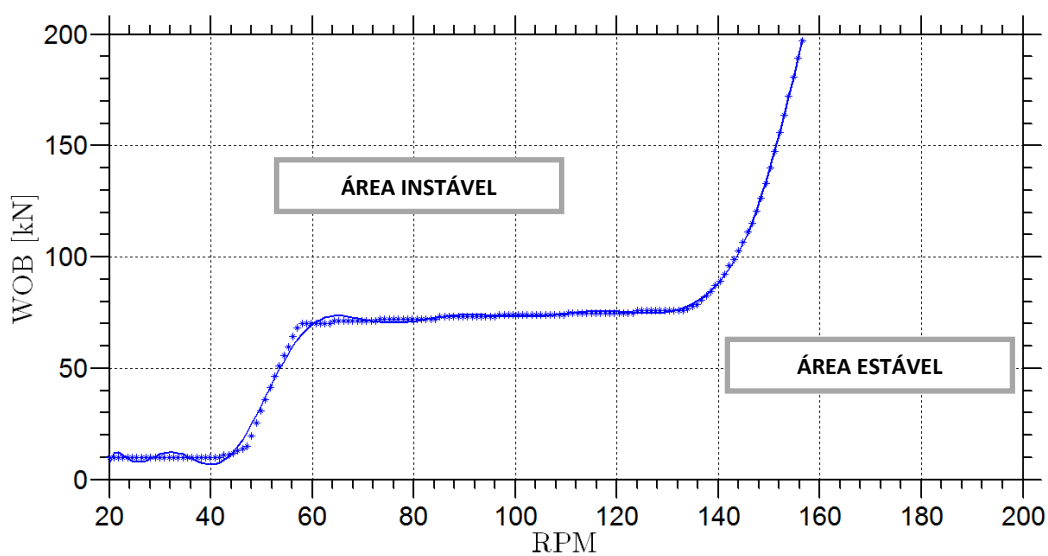


Figura 2.7 – Mapa de Estabilidade para 600 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 1300 m, como visto na tabela 2.4:

Tabela 2.4 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1300 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	1300	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.8, vemos que outra curva diferente das de maior profundidade, como veremos mais à frente.

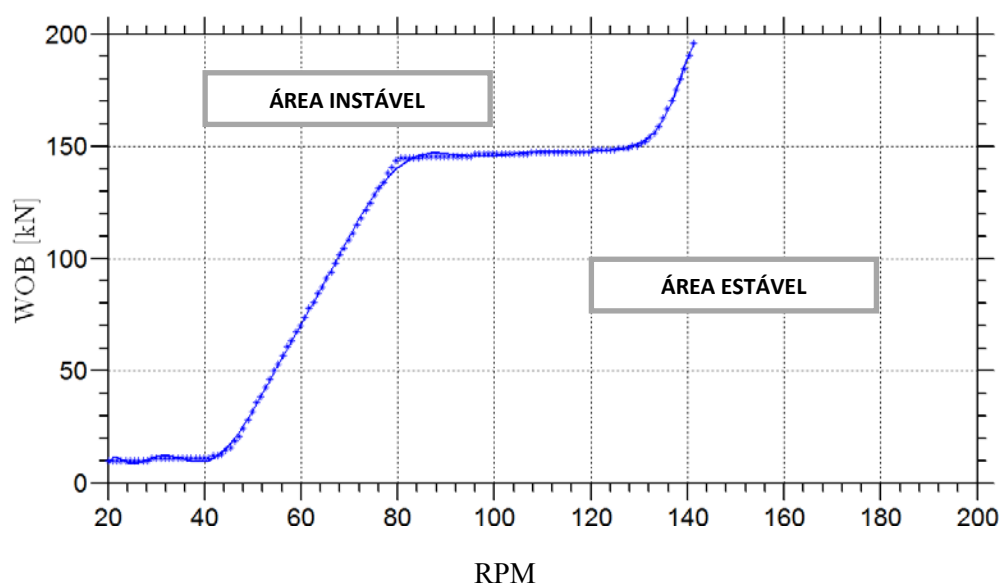


Figura 2.8 – Mapa de Estabilidade para 1300 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 1700 m, como visto na tabela 2.5:

Tabela 2.5 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1700 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	1700	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.9, vemos que o mapa de estabilidade vai tomando a forma do que foi encontrado por CAYRES (2013) na sua dissertação quando fez a simulação com a coluna a uma profundidade de 2870 m.

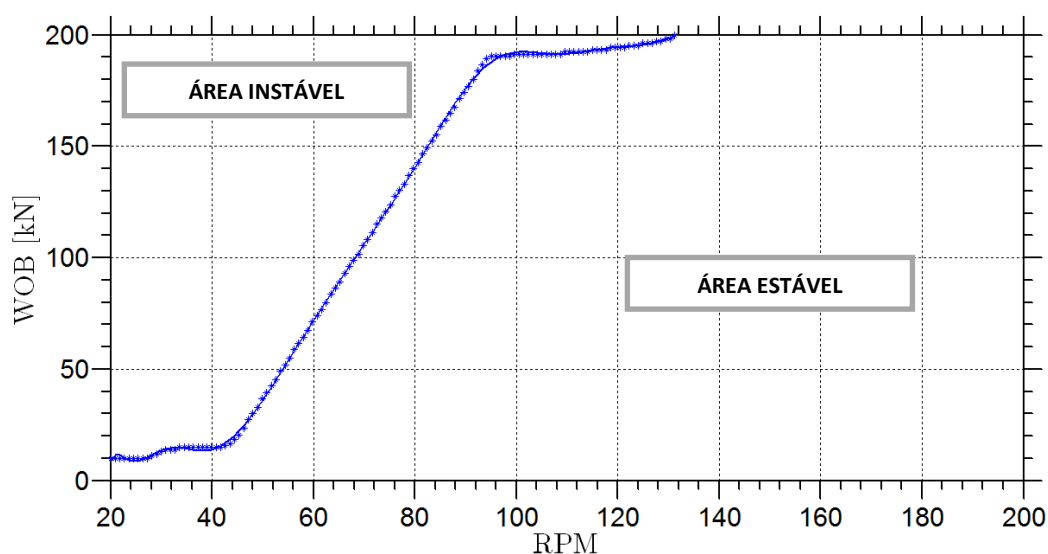


Figura 2.9 – Mapa de Estabilidade para 1700 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 1870 m, como visto na tabela 2.6:

Tabela 2.6 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1870 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	1870	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.10, como podemos ver abaixo, o mapa de instabilidade a partir da profundidade de 1870 m, não apresenta alterações até 3000 m.

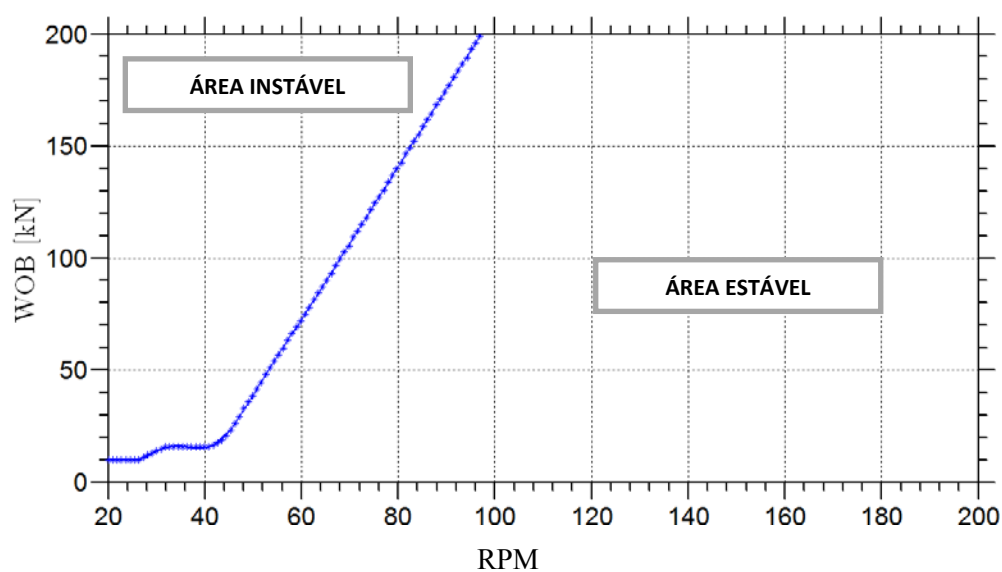


Figura 2.10 – Mapa de Estabilidade para 1870 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 1888 m, como visto na tabela 2.7:

Tabela 2.7 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1888 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	1888	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.11, como podemos ver abaixo, o mapa de instabilidade a partir da profundidade de 1880 m continua muito grandes variações.

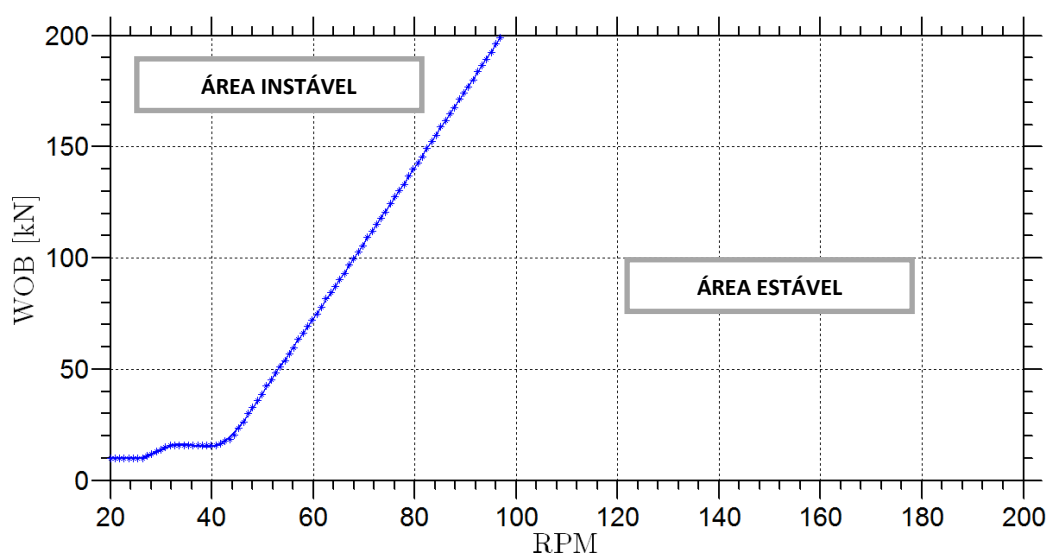


Figura 2.11 – Mapa de Estabilidade para 1888 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 1909 m, como visto na tabela 2.8:

Tabela 2.8 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1909 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	1909	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.12, como podemos ver abaixo, o mapa de instabilidade a partir da profundidade de 1909 m continua sem grandes variações.

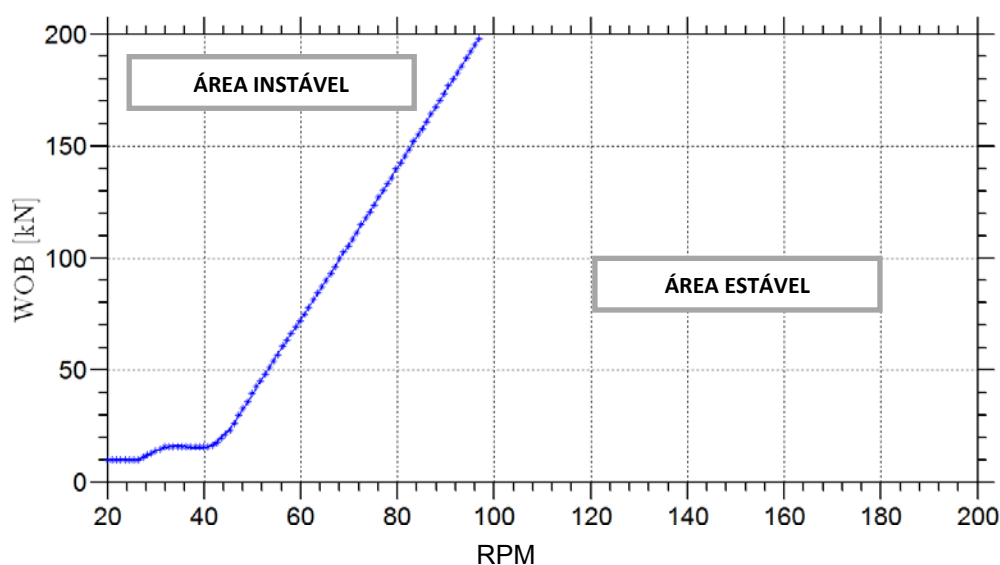


Figura 2.12 – Mapa de Estabilidade para 1909 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 1970 m, como visto na tabela 2.9:

Tabela 2.9 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 1970 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	1970	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.13, como podemos ver abaixo, o mapa de instabilidade a partir da profundidade de 1970 m continua muito grandes variações.

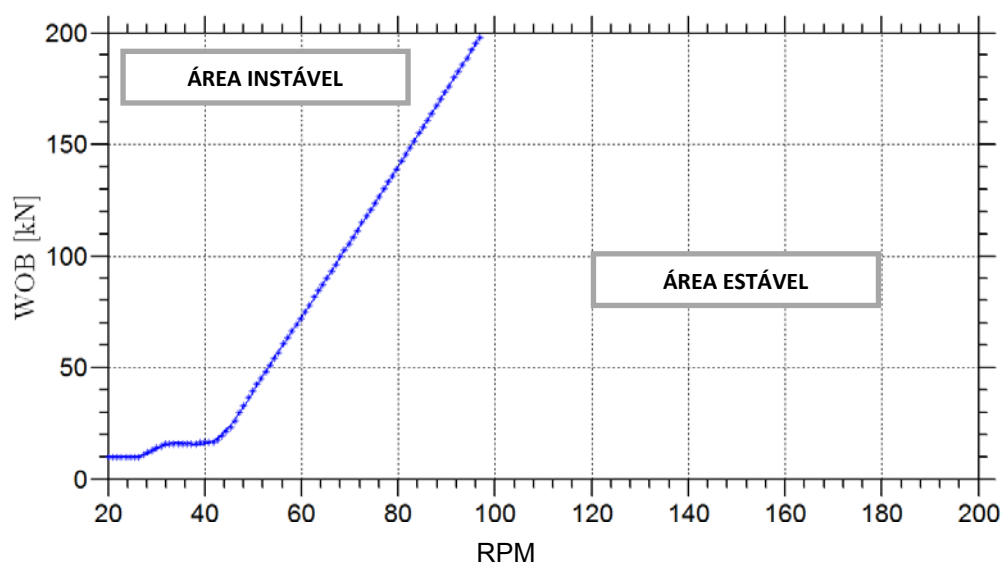


Figura 2.13 – Mapa de Estabilidade para 1970 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 2500 m, como visto na tabela 2.10:

Tabela 2.10 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 2500 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	2500	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.14, como podemos ver abaixo, o mapa de instabilidade a partir da profundidade de 2500 m continua sem grandes variações.

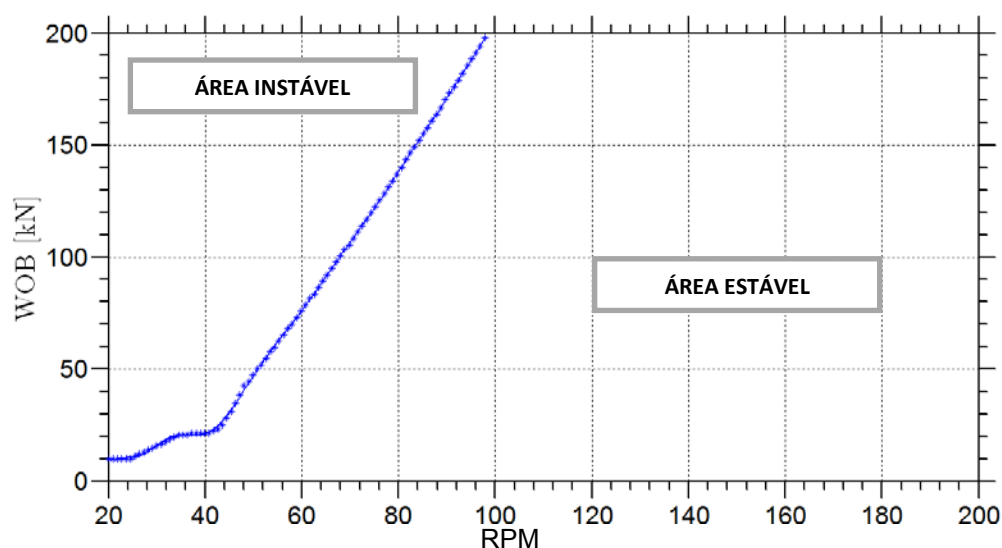


Figura 2.14 – Mapa de Estabilidade para 2500 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 2884 m, como visto na tabela 2.11:

Tabela 2.11 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 2884 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	2884	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.15, como podemos ver abaixo, o mapa de instabilidade a partir da profundidade de 2884 m continua sem grandes variações.

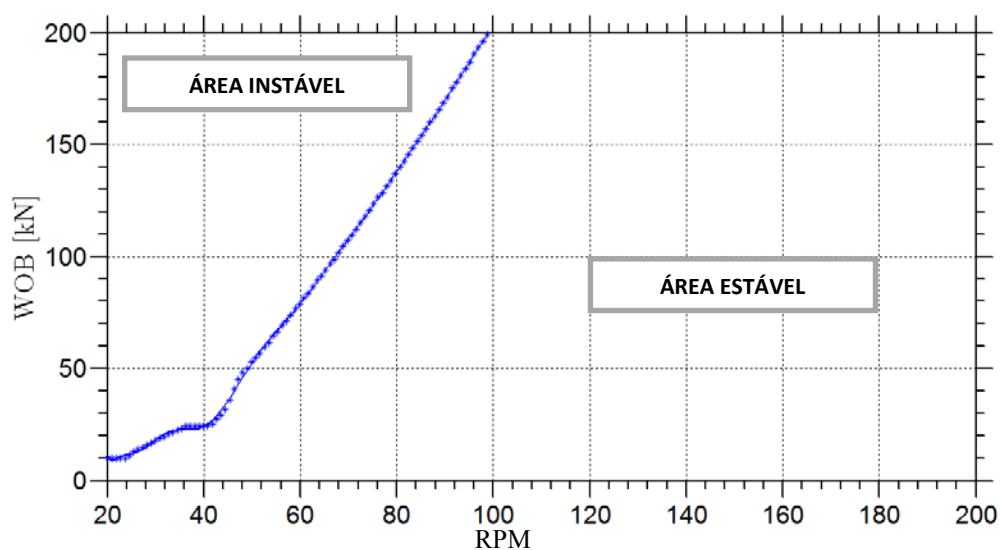


Figura 2.15 – Mapa de Estabilidade para 2884 m.

Parâmetros da coluna e BHA para a profundidade de 3000 m, como visto na tabela 2.12:

Tabela 2.12 – Parâmetros da coluna e BHA para profundidade de 3000 m.

Descrição	Parâmetros	Valor	Unidade
Massa específica da coluna	ρ_{DP}	7850	kg / m ³
Comprimento da coluna	LDP	3000	m
Diâmetro externo da coluna	ODDP	0,1397	m
Diâmetro interno da coluna	IDDP	0.1186	m
Massa específica do BHA	ρ_{BHA}	7850	kg / m ³
Comprimento da BHA	LBHA	348.43	m
Diâmetro externo do BHA	ODBHA	0.2025	m
Diâmetro interno do BHA	IDBHA	0.0619	m
Modulo de Young	E	210	Gpa
Coefficiente de Poisson	ν	0.33	-

Na figura 2.16, como podemos ver abaixo, o mapa de instabilidade a partir da profundidade de 3000 m continua sem grandes variações.

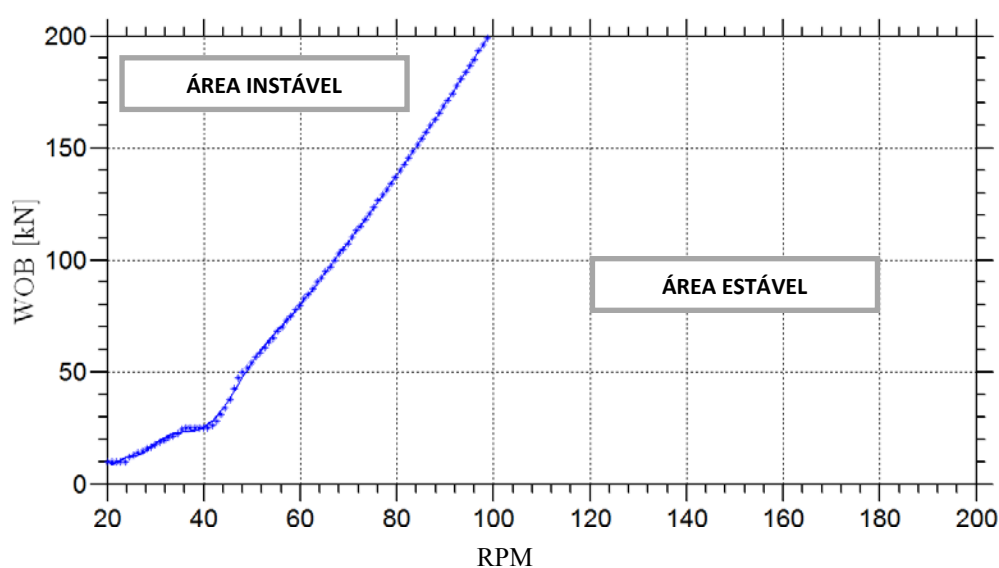


Figura 2.16 – Mapa de Estabilidade para 3000 m.

Para a análise de sensibilidade dos 2954 pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) para profundidade de até 3000 m do poço estudado nesta dissertação, foram considerados 02 (dois) tipos de mapas de estabilidade, dos 10 (dez) simulados acima, por não nos mostrar muitas variações. Foram considerados: Mapa de estabilidade à 600 m e Mapa de estabilidade à 1888

m. As variações da curva do mapa à 600 m e 1700 m mostraram variações como mencionadas anteriormente. Para este intervalo, iremos fazer a análise com o mapa da figura 2.17 abaixo:

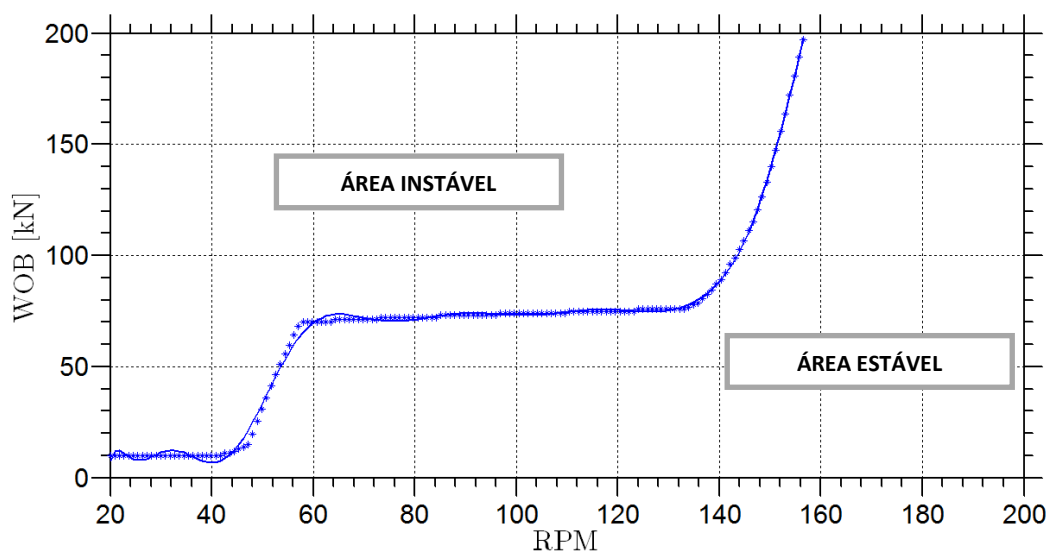


Figura 2.17 – Mapa de Típico de Estabilidade

E as profundidades de 1700 m a 3000 m foi utilizado o mapa da figura 2.18 abaixo:

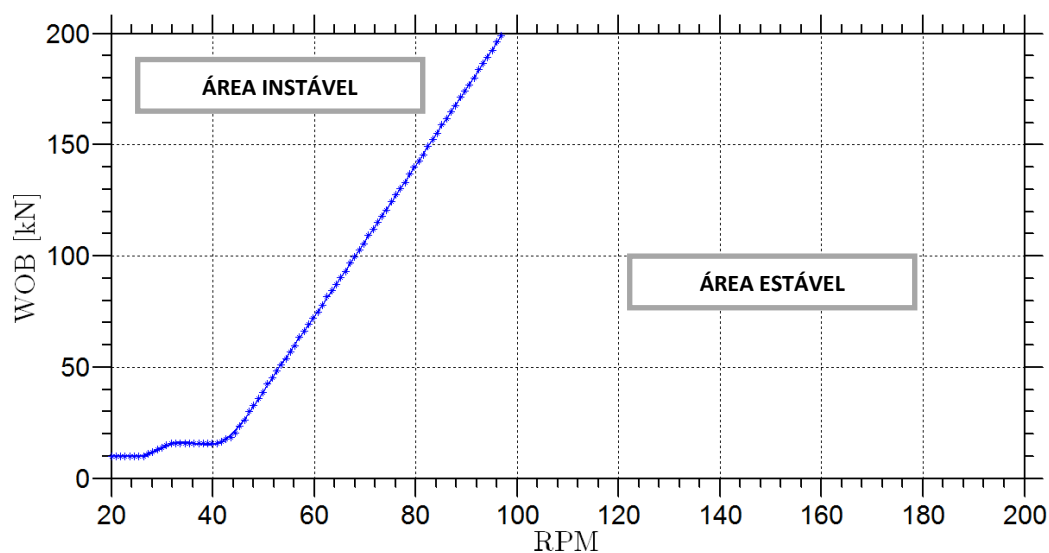


Figura 2.18 – Mapa de Estabilidade para 1888 m.

3

Estudo de Casos – Bacia do Solimões

3.1

Descrição e relevância dos casos considerados

Na Bacia do Solimões, a empresa HRT Oil & Gas perfurou vários poços verticais exploratórios. No entanto, antes da perfuração a empresa fez seu planejamento para esta operação. Um dos itens do planejamento está o quadro previsão geológica, figura 3.1. Tal quadro indica, baseado em poços de correlação, pesquisa sísmica e dados secundários, quais seriam os intervalos mais prováveis das formações geológicas. No entanto, como dito anteriormente, as rochas diabásio, devido à sua característica, oferecem dificuldade em determinar o limite da soleira. Este intervalo de incerteza pode indicar uma zona crítica propícia para vibrações na coluna de perfuração.

Não foi considerado neste trabalho o estado dos equipamentos durante a perfuração do poço, ou seja, se os equipamentos eram novos ou usados. Foram utilizados os dados de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) do poço após este ter sido perfurado.

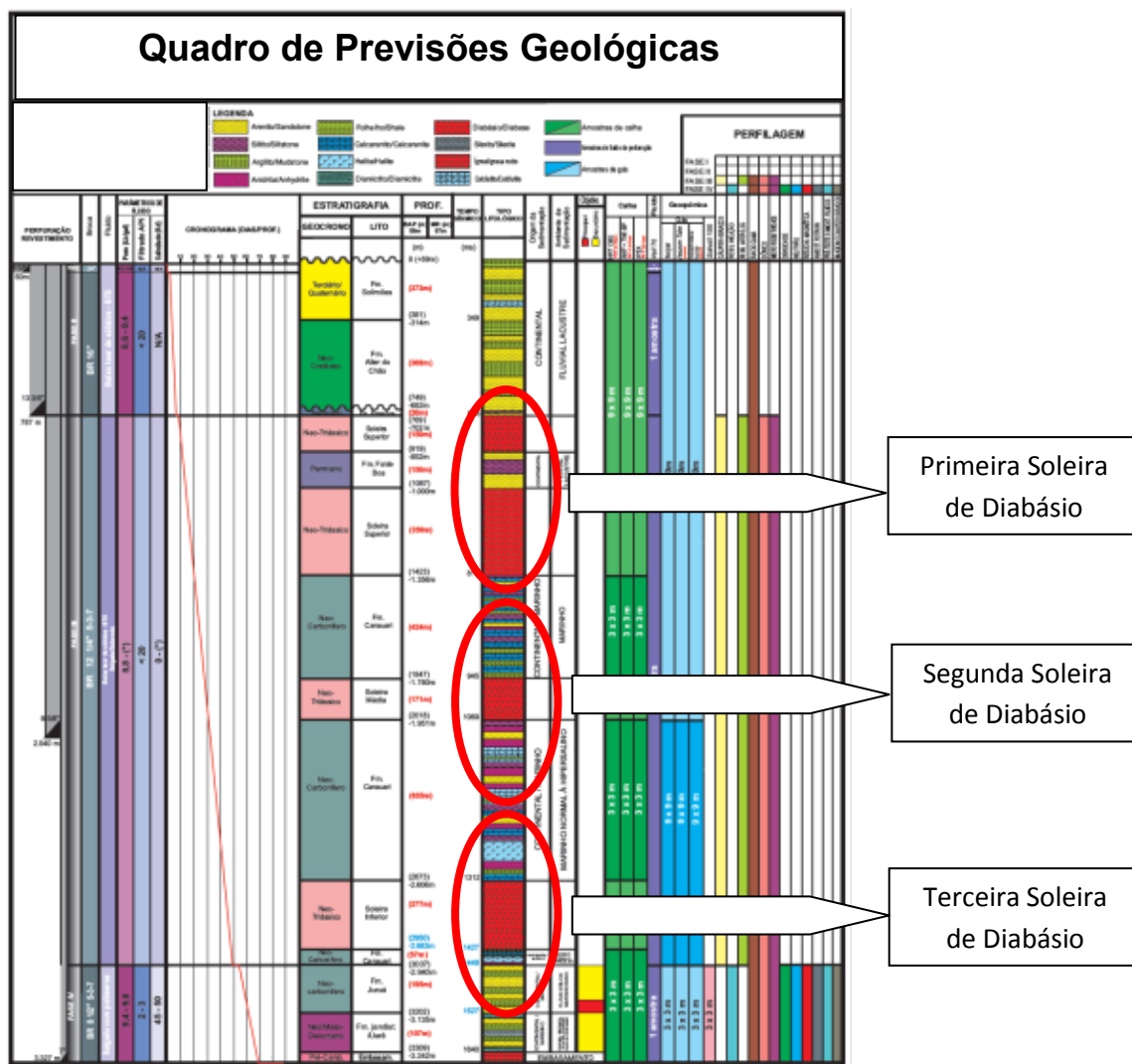


Figura 3.1 – Quadro de previsão geológica (Fonte: HRT Oil & Gas).

A Figura 3.2 refere-se a um quadro de tempo de perfuração. Como podemos ver à esquerda deste quadro, três colunas: a primeira coluna se refere às formações esperadas, ou seja, fizeram parte do planejamento da perfuração. A terceira coluna se refere a um poço de correlação, bem próximo ao poço a ser perfurado, que serviu de base para o planejamento do novo poço. A coluna do meio (segunda), nos mostra as formações reais encontradas durante a perfuração do poço até o reservatório que é o objetivo a ser alcançado.

A linha azul claro mostra o planejamento feito pela HRT Oil & Gas para a perfuração do poço em questão, considerando o tempo operacional como a troca de broca e formações a serem encontradas.

A linha vermelha mostra o tempo real da perfuração com os problemas relacionados à operação. A formação diabásio aparece em vermelho, como dito anteriormente, em 03 (três) fases distintas. Soleira superior com topo está a 786 m e se estende até a profundidade aproximada de 1500 m. A segunda soleira está com a sua base, aproximadamente, em 1820 m e o topo a 2100 m e a terceira soleira está com a base a 2760 m e o topo a 3000 m.

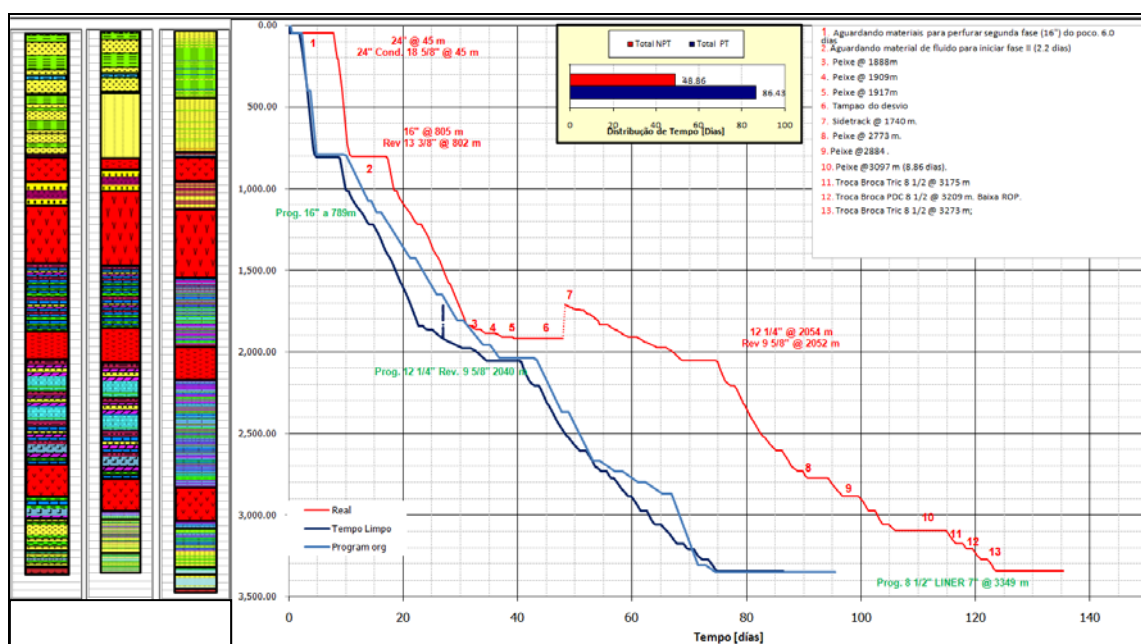


Figura 3.2 – Quadro de tempo de perfuração (Fonte: HRT Oil & Gas).

Com a plotagem dos pontos de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) para cada profundidade nos dois mapas típicos de estabilidade, a análise de sensibilidade foi feita. Tendo estes resultados em mãos e, após uma comparação com a litoestratigrafia, esta irá nos mostrar se a formação diabásio pode ter influência direta nas vibrações torcionais. A resposta irá validar o modelo de CAYRES (2013). Os equipamentos utilizados pelas companhias de serviços não foram analisados nesta dissertação, ou seja, não foram levados em conta o estado da plataforma de perfuração, colunas, BHAs e demais. Foram levados em consideração apenas os parâmetros de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação).

3.2

Mapas de Estabilidade nas várias profundidades

A Figura 3.3 abaixo mostra os 2954 pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). São todos os pontos entre 46 m e 3000 m.

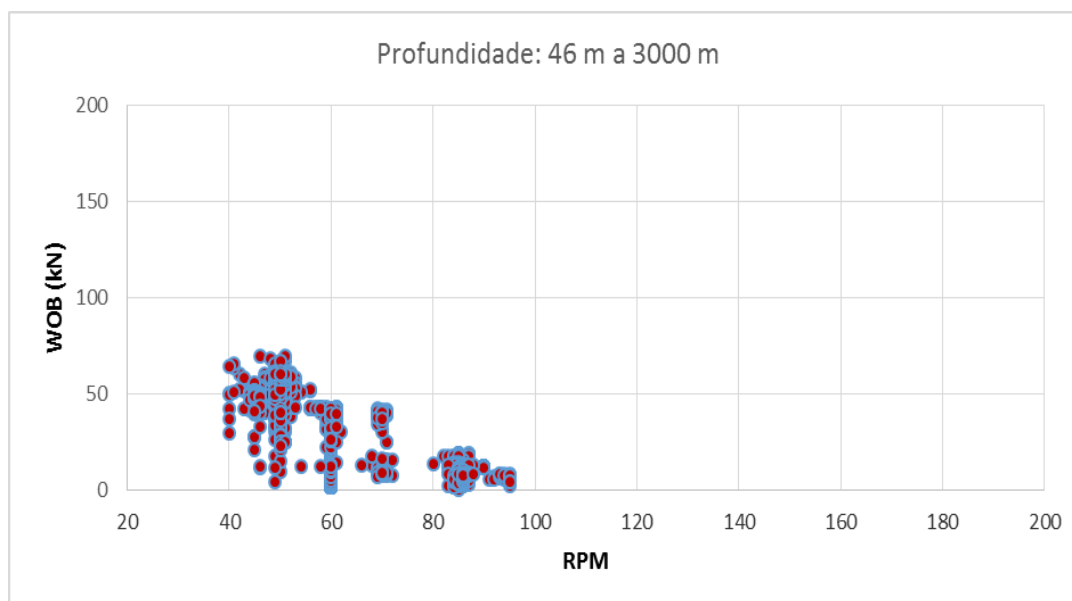


Figura 3.3 – Todos os Pontos de WOB vs RPM do Poço.

A Figura 3.4 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 600 m a 1700 m. Para as profundidades de 46 m a 600 m, podemos perceber que todos eles se encontram na área estável.

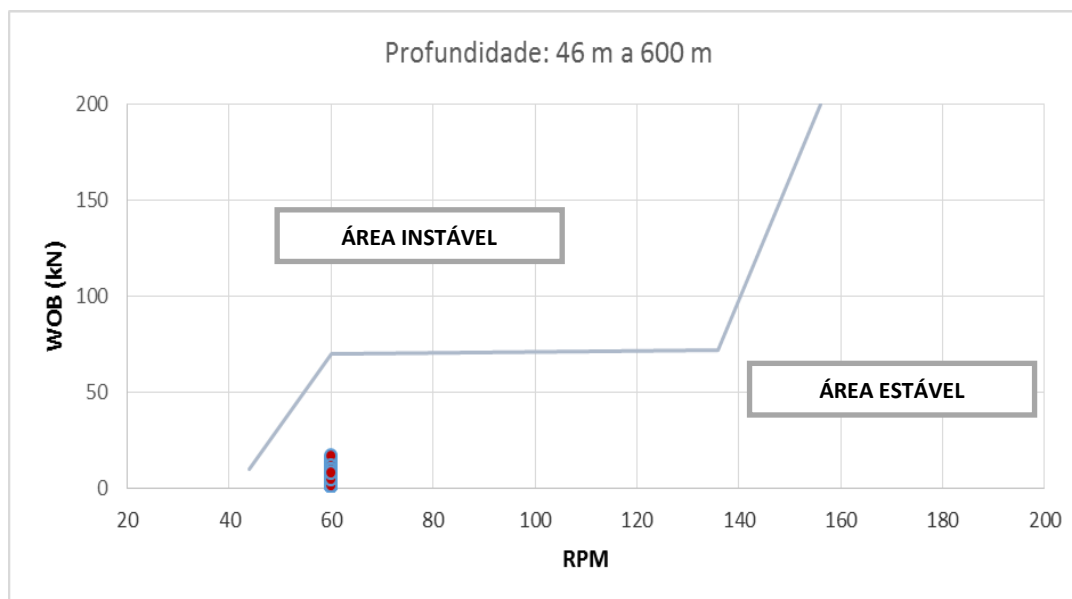


Figura 3.4 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 46 m a 600 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.5 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa de estabilidade para 600 m a 1700 m. Para as profundidades de 600 m a 1700 m, podemos perceber que a maioria dos pontos aparecem no mapa na área instável. A intenção foi entender em quais profundidades percebemos a ocorrência destes pontos.

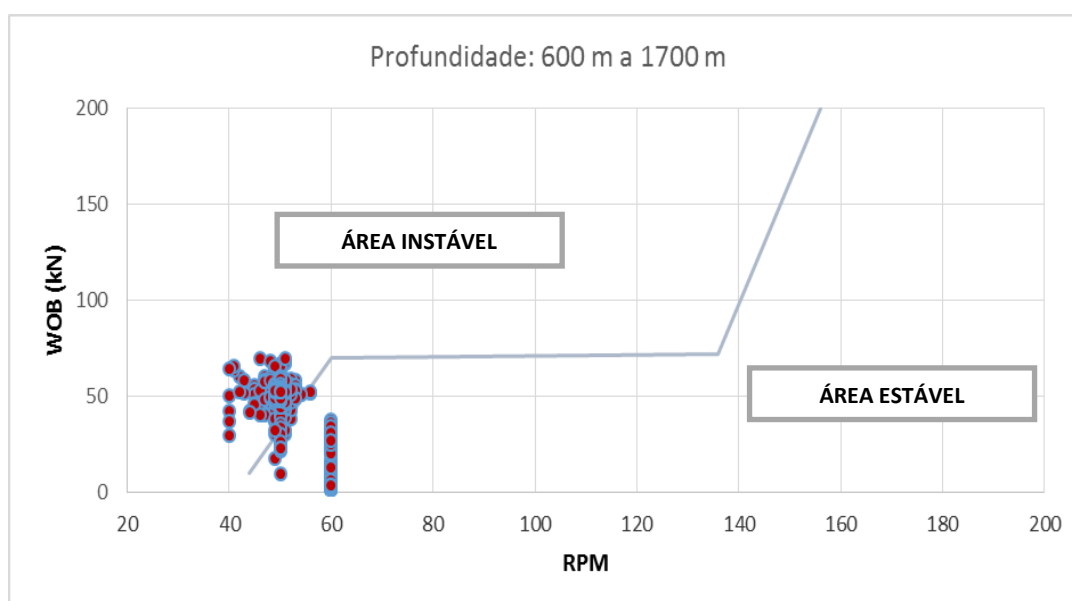


Figura 3.5 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 600 m a 1700 m e o Mapa de Estabilidade para profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.6 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 600 m a 900 m, onde foi notada a diminuição da concentração de pontos na área instável em consequência da retirada do intervalo superior a 900 metros (900 m a 1700 m).

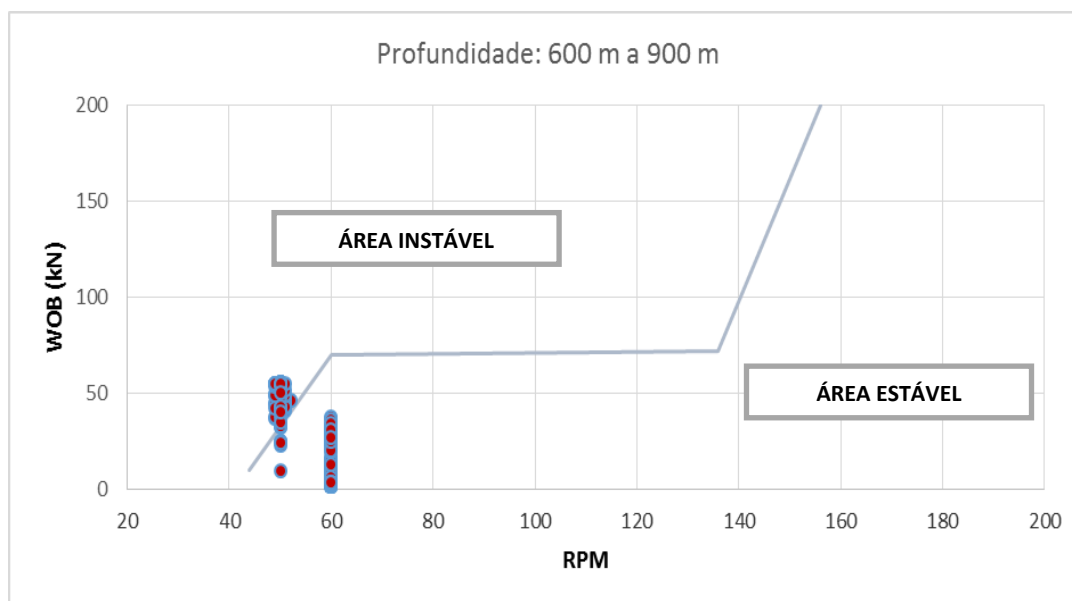


Figura 3.6 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 600 m a 900 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.7 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade o intervalo de profundidades de 700 m a 800 m, foi notado que os pontos estão somente na área estável. Nova plotagem será feita.

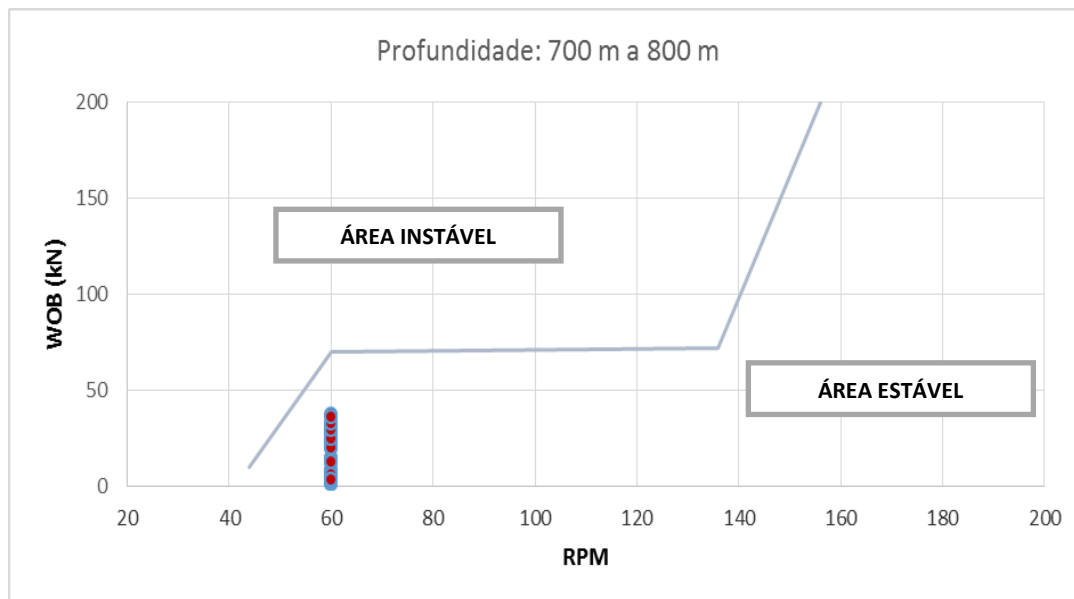


Figura 3.7 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 700 m a 800 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.8 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 800 m a 900 m, alguns pontos aparecem na área estável, mas a maioria está na área instável. Notadamente, a partir, podemos assim dizer, da profundidade de 800 m, começa a aparecer pontos de instabilidade torcional no mapa, percebendo o aumento do peso sobre a broca e diminuição da velocidade de rotação. A primeira soleira de diabásio se encontra a 786 m e se estende até 1500 m.

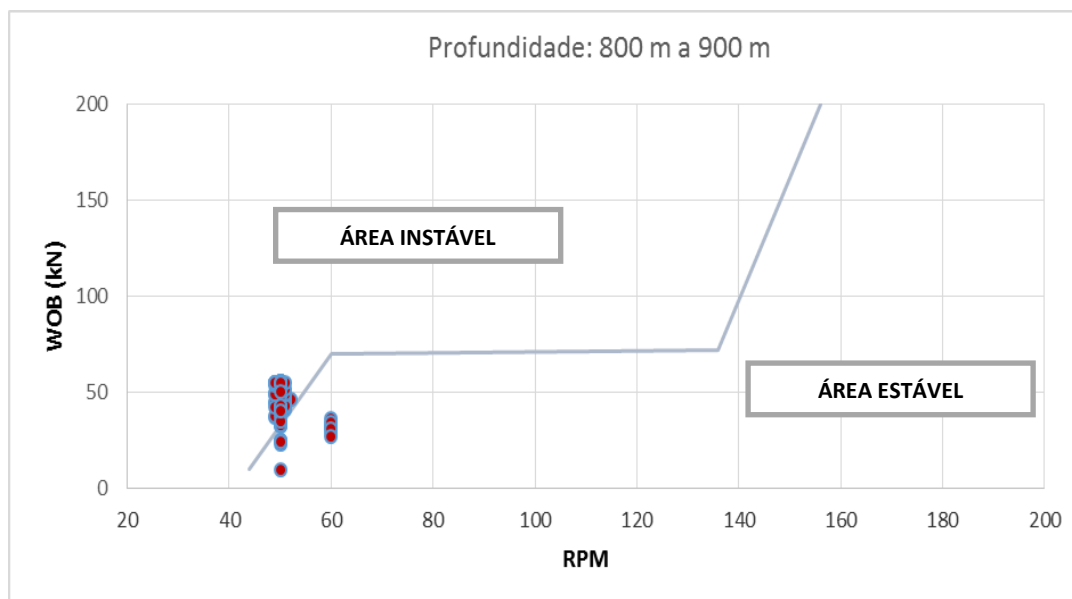


Figura 3.8 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 800 m a 900 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.9 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 900 m a 1000 m foi notado que os pontos estão na maioria na área instável, Nova plotagem será feita.

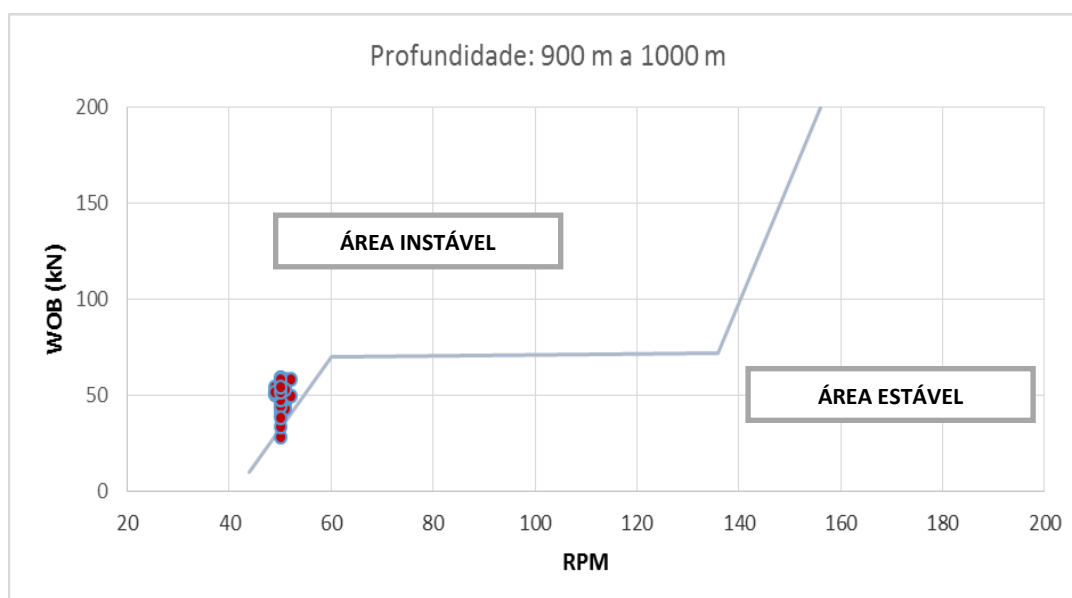


Figura 3.9 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 46 m a 1000 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.10 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 900 m a 1300 m, foi notado que os pontos estão em sua maioria na área instável. Mas percebe-se alguns pontos migrando para a área estável. Nova plotagem será feita.

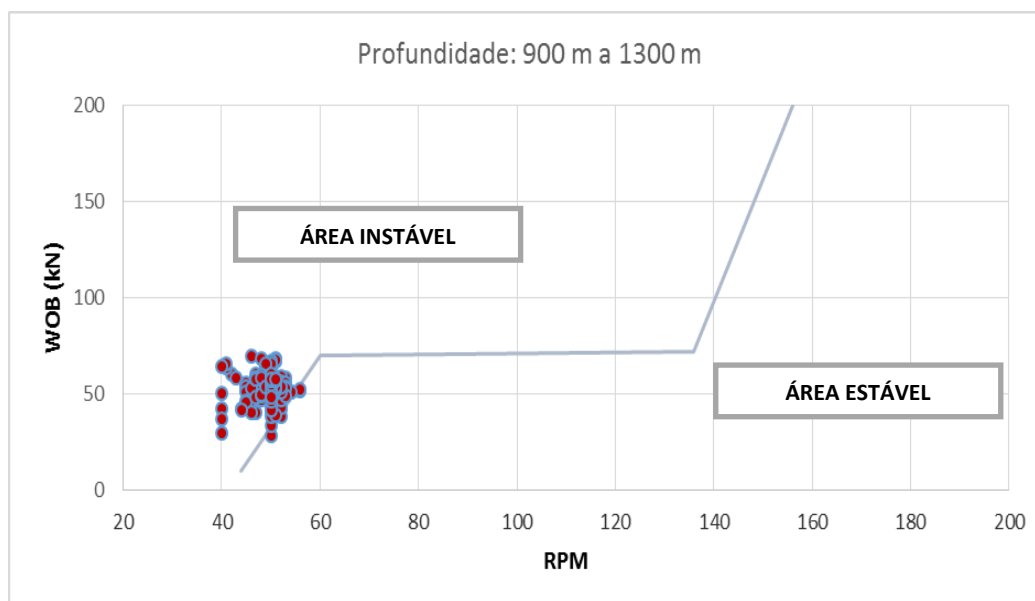


Figura 3.10 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 900 m a 1300 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m

A Figura 3.11 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 1000 m a 1100 m, os pontos continuam no limite da linha que divide a instabilidade e estabilidade torcional e uma gradual diminuição da velocidade de rotação.

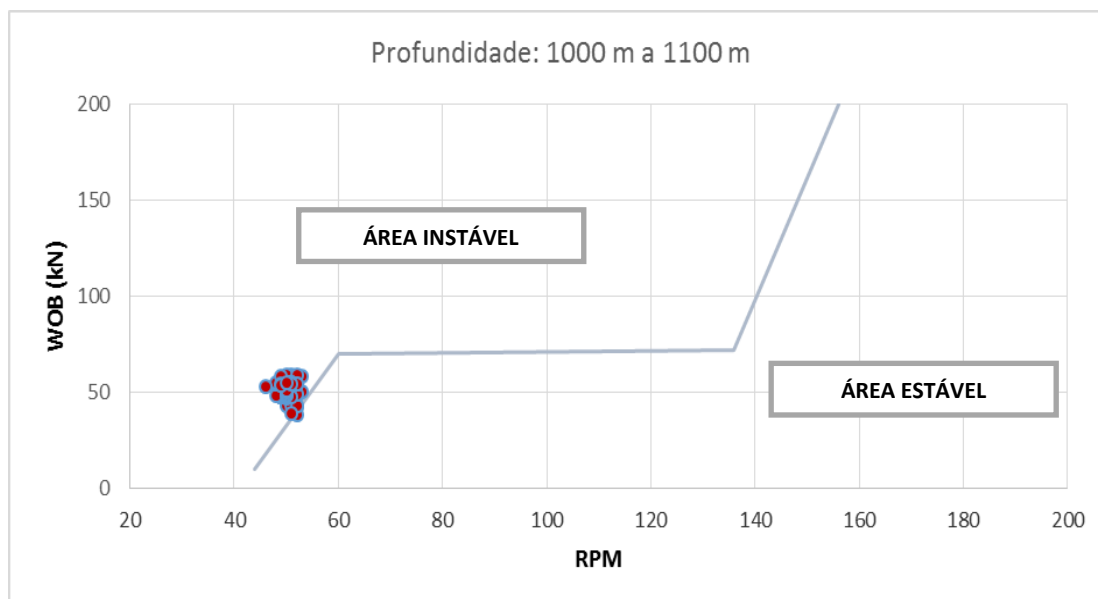


Figura 3.11 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1000 m a 1100 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.12 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 1100 m a 1200 m, a maioria dos pontos na área instável e a velocidade de rotação diminuindo chegando a 40 RPM.

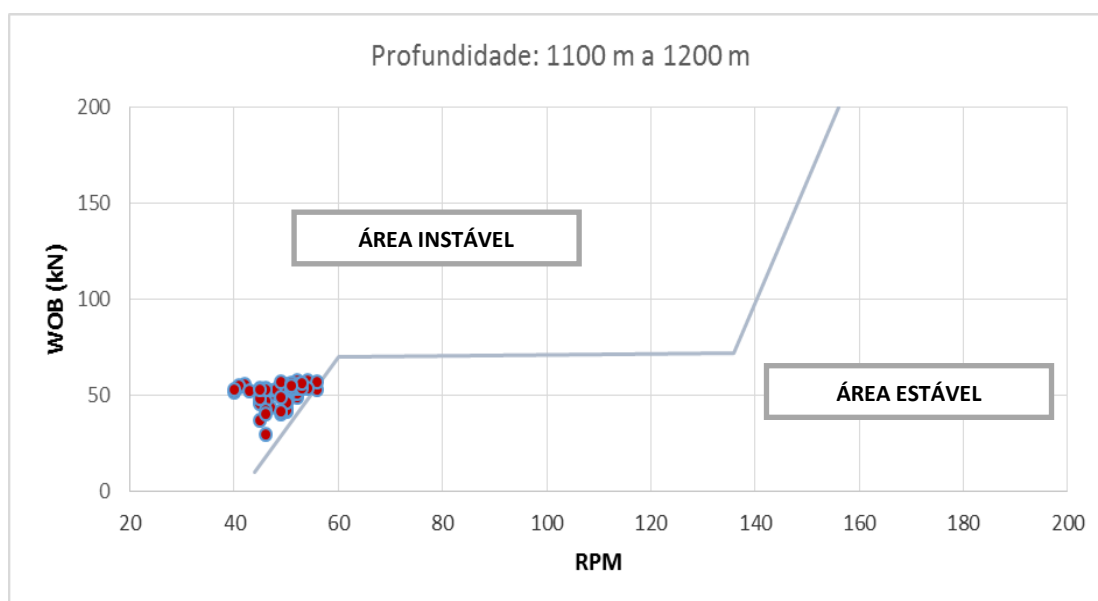


Figura 3.12 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1100 m a 1200 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.13 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 1200 m a 1300 m foi observado que aparecem pontos na área estável.

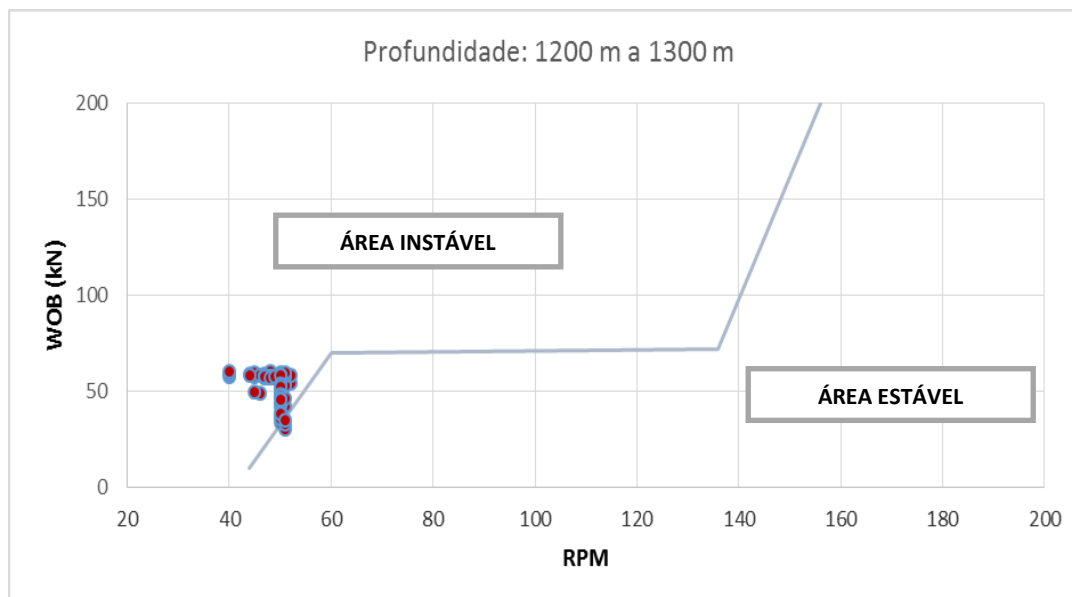


Figura 3.13 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1200 m a 1300 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.14 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação). Plotando os pontos no mapa típico de estabilidade para o intervalo de profundidades de 1500 m a 1700 m foi observado que aparecem mais pontos na área estável provavelmente associado a saída do limite inferior (base) da formação diabásio.

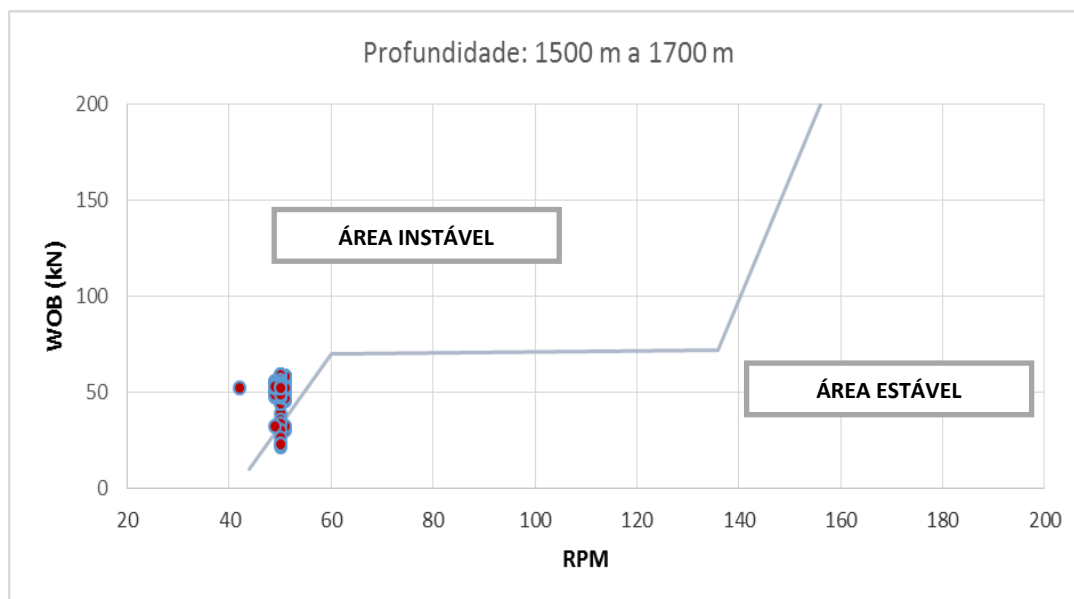


Figura 3.14 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1500 m a 1700 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade para até 1700 m.

A Figura 3.15 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m. Para as profundidades de 1700 m a 3000 m podemos perceber que existem muitos pontos espalhados no mapa na área instável e estável.

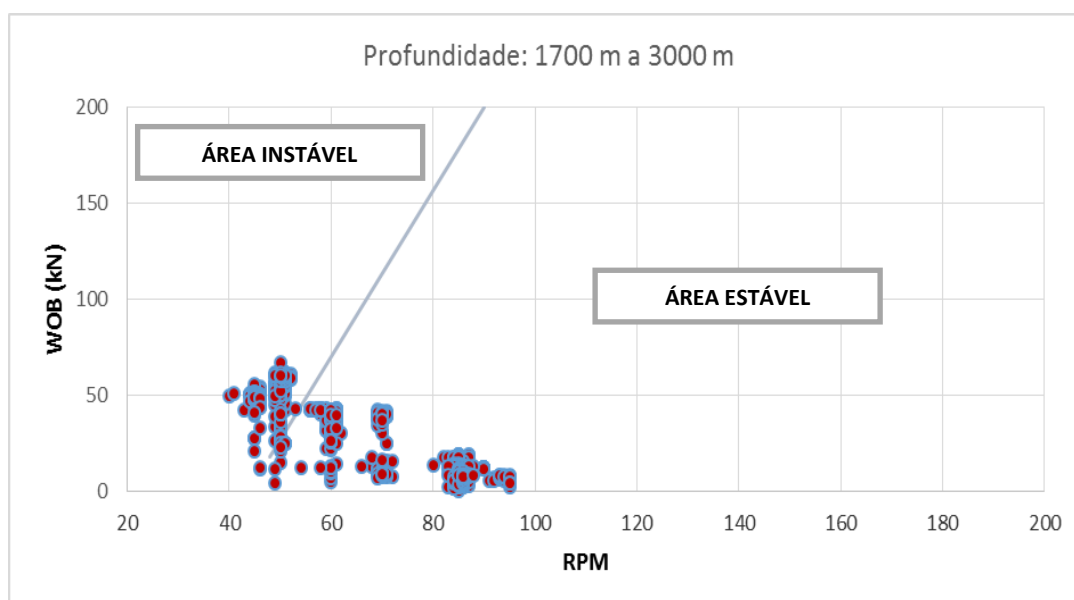


Figura 3.15 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1700 m a 3000 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.16 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m, para as profundidades de 1700 m a 1888 m. Na profundidade de 1888 m, houve a primeira quebra da coluna de perfuração. Pontos são percebidos na área instável. A presença da segunda soleira de diabásio se percebe em 1820 m e se estende até aproximadamente 2100 m.

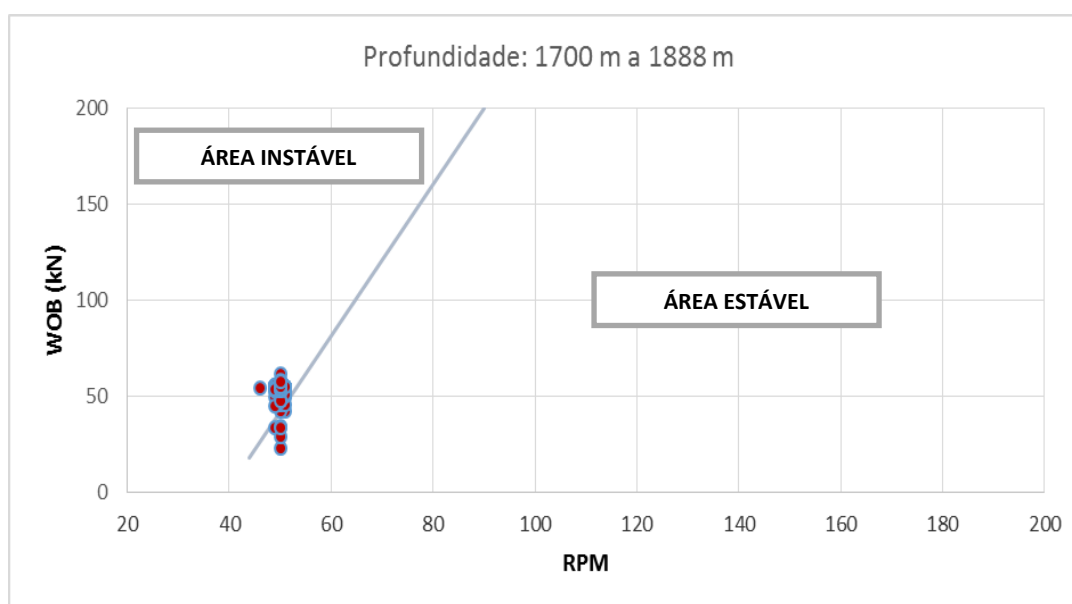


Figura 3.16 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1700 m a 1888 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.17 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m. Para as profundidades de 1800 m a 1888 m foi constatado que os pontos, em sua maioria, estão na área instável. Início do diabásio 1820 m. Pontos de estabilidade quase desaparecem com a diminuição do intervalo de 1700 m e 1800 m para 1800 e 1888 m.

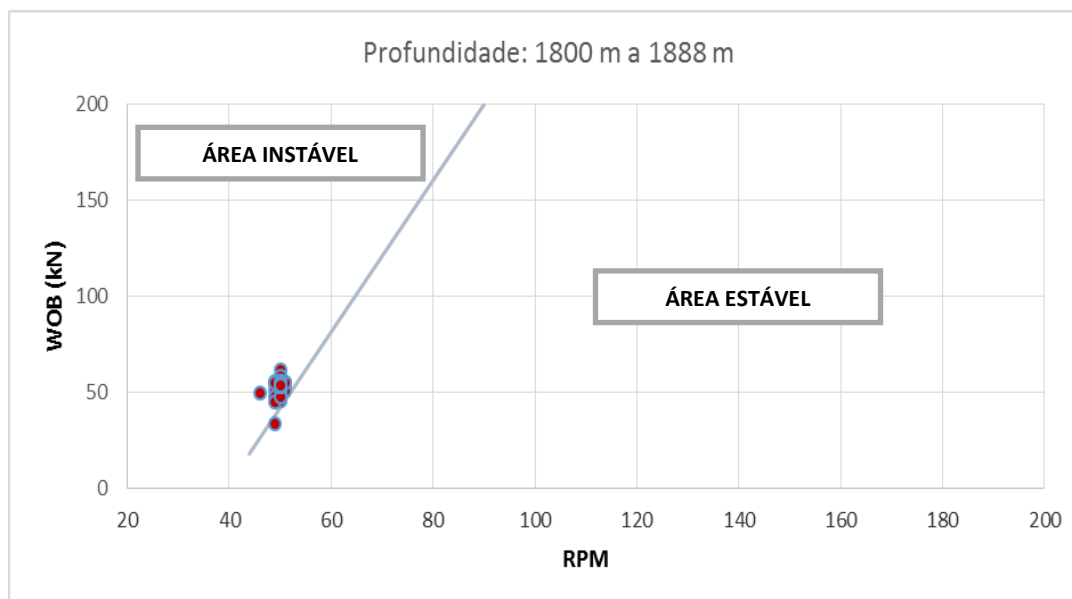


Figura 3.17 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1800 m a 1888 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.18 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m. Para as profundidades de 1889 m a 1917 m. A segunda e terceira quebra da coluna de perfuração são relatadas em 1909 e 1917 m. Pontos de instabilidade na sua maioria no mapa. Segunda soleira de diabásio de 1820 m a 2100 m.

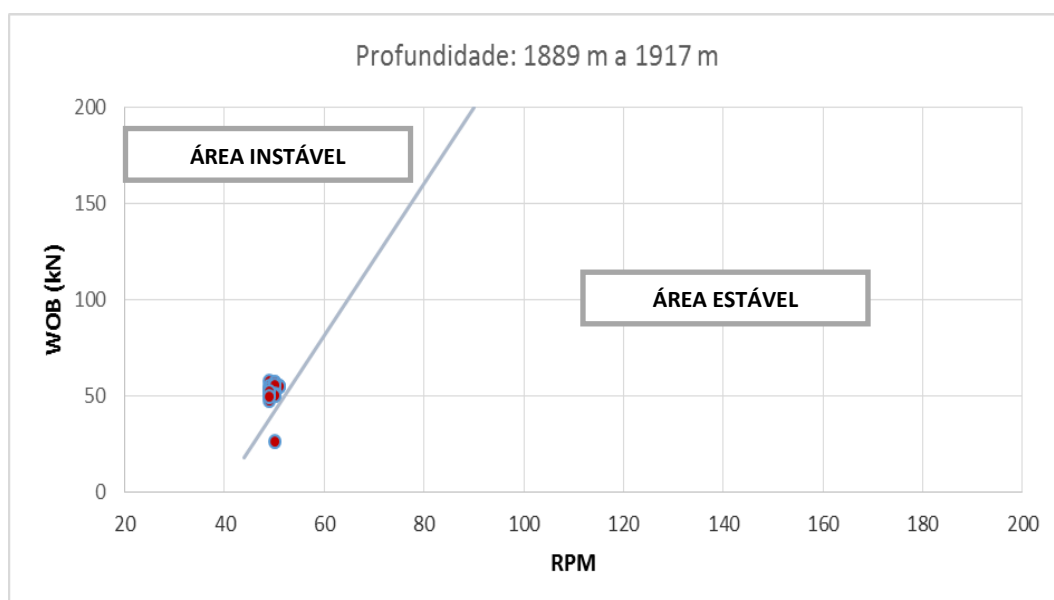


Figura 3.18 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1889 m a 1917 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.19 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m. Para as profundidades de 1889 m a 2100 m. Foi constatado que muitos pontos se encontram com menor peso sobre a broca (WOB) comparados com da figura anterior e começam aparecer pontos na área estável do mapa provavelmente ligados ao fim da segunda soleira de diabásio a 2100 m.

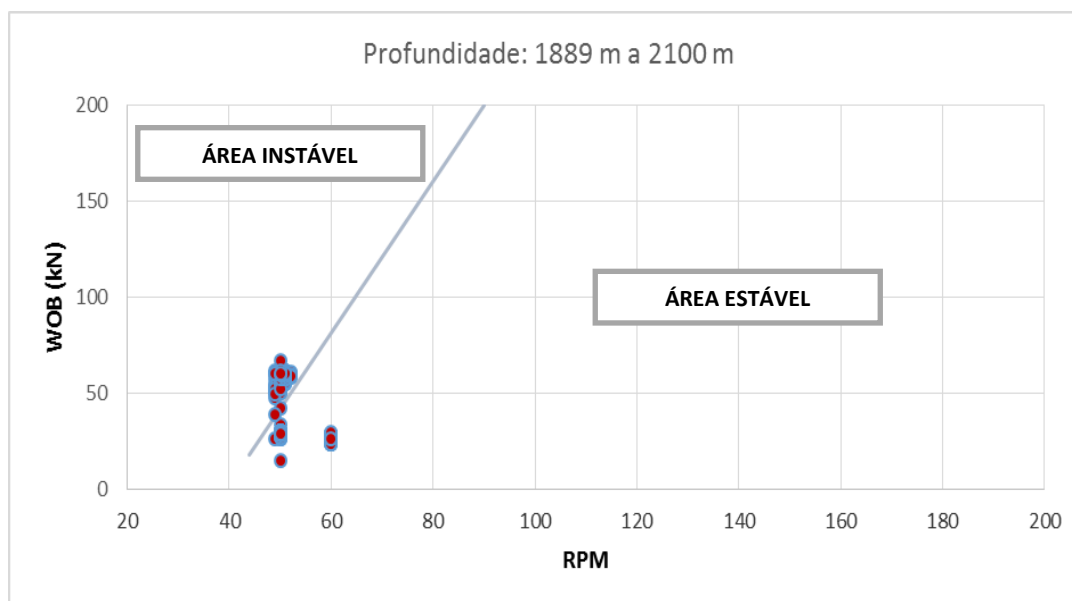


Figura 3.19 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 1889 m a 2100 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.20 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m. Para as profundidades de 2100 m a 2700 m. O que se percebe agora que todos os pontos estão no lado estável do mapa. Com o fim da segunda soleira a 2100 m. A terceira soleira inicia-se a 2760 m chegando até 3000 m.

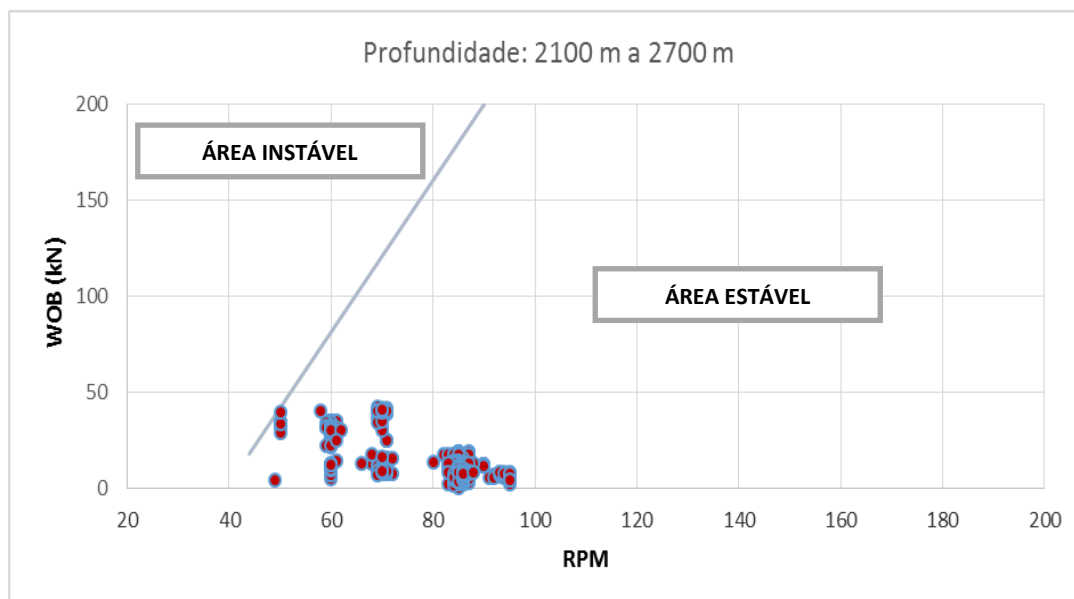


Figura 3.20 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2100 m a 2700 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.21 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m. Para as profundidades de 2700 m a 2800 m. A terceira soleira tem o seu topo em 2760 m. Para análise mais refinada, estimou-se um intervalo de 100 m, e começam a aparecer novamente pontos no lado instável.

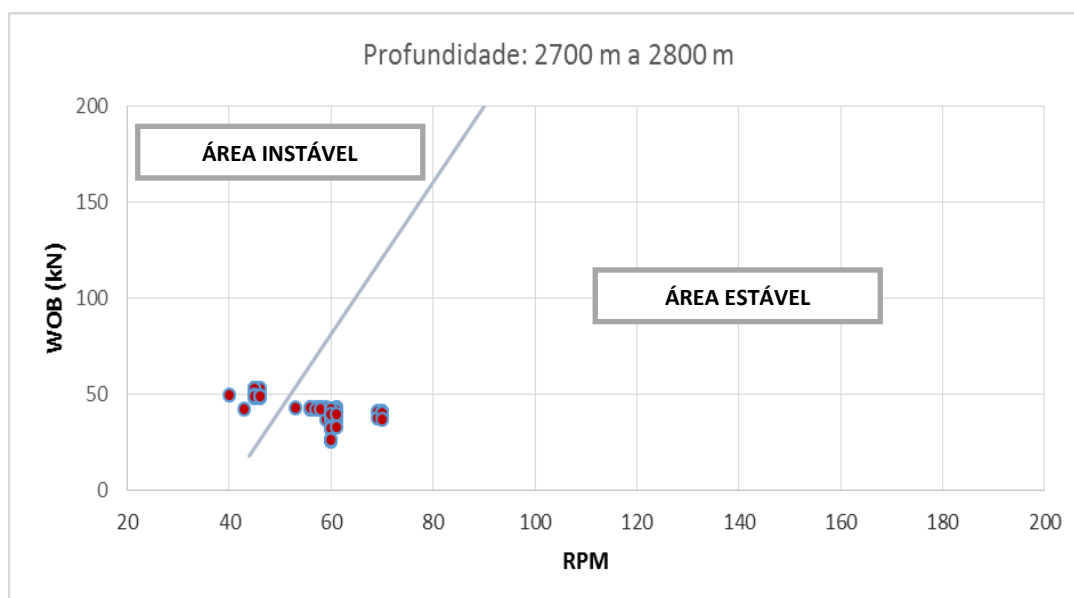


Figura 3.21 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2700 m a 2800 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.22 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m, para as profundidades de 2700 m a 2750 m. Pontos na área estável. O topo da terceira soleira inicia-se na profundidade 2760 m.

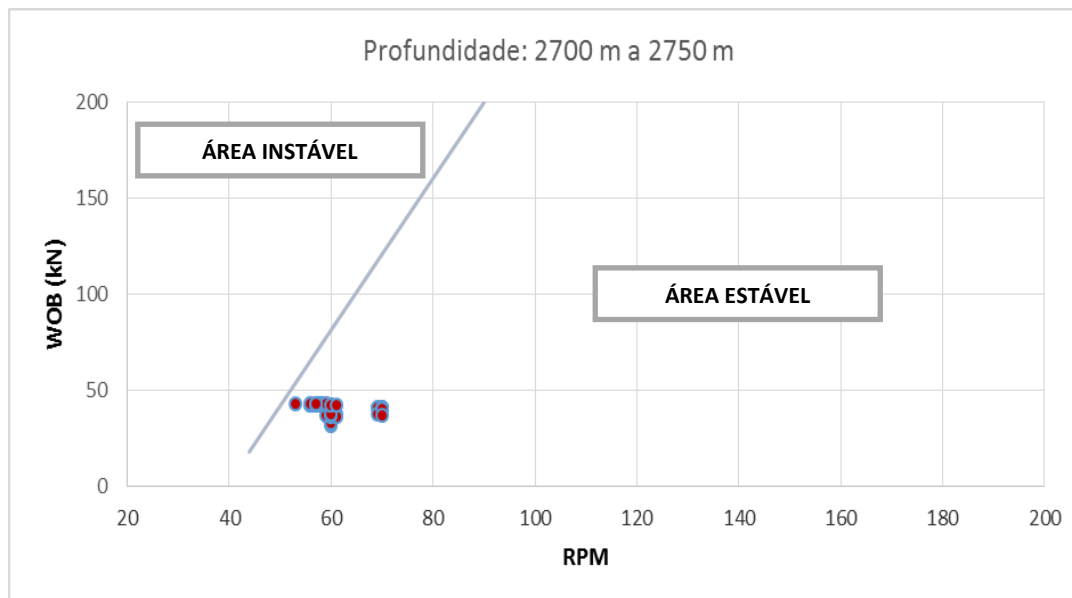


Figura 3.22 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2700 m a 2750 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.23 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m, para as profundidades de 2750 m a 2773 m. A maioria dos pontos está no lado estável do mapa, sendo que existe um ponto no outro lado instável que representa o início da terceira soleira a 2760 m. Quebra da coluna na profundidade 2773 m.

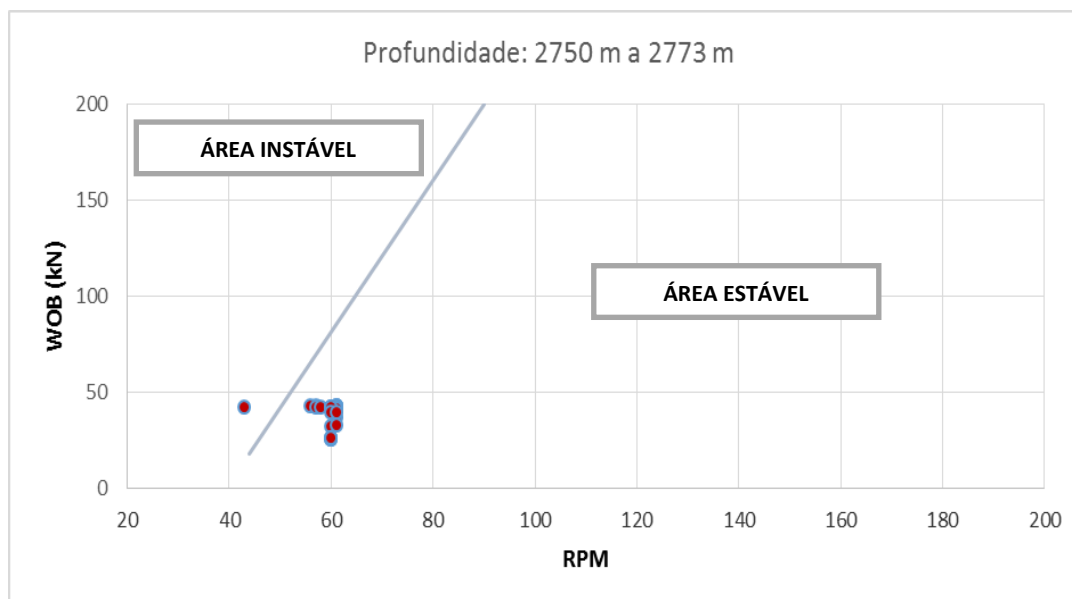


Figura 3.23 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2750 m a 2773 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.24 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m. Para as profundidades de 2773 m a 2800 m. A maioria dos pontos estão no lado instável do mapa.

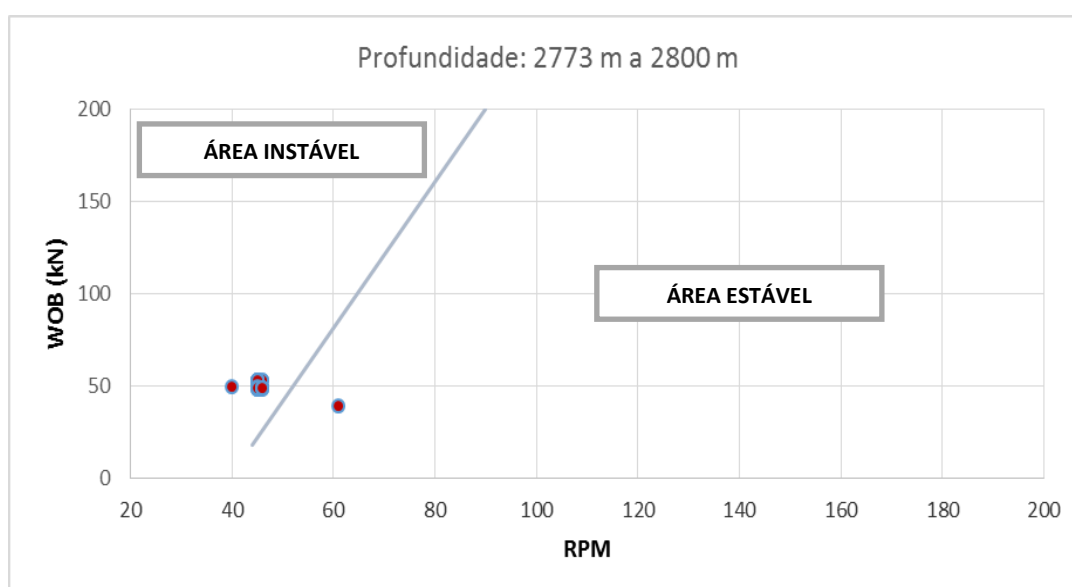


Figura 3.24 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2773 m a 2800 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.25 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m, para as profundidades de 2800 m a 2884 m. A maioria dos pontos estão no lado instável do mapa. Quebra de coluna a 2884 m.

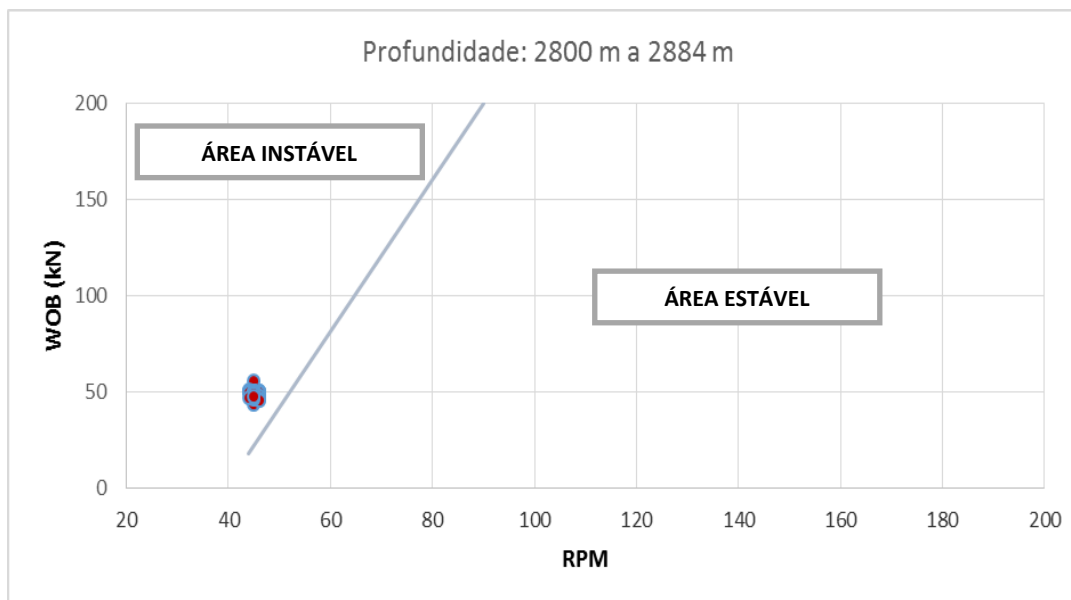


Figura 3.25 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2800 m a 2884 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

A Figura 3.26 abaixo mostra todos os pontos de WOB (peso sobre a broca) vs RPM (velocidade de rotação) em cima do mapa típico de estabilidade para 1700 m a 3000 m, para as profundidades de 2884 m a 3000 m. Os pontos estão distribuídos entre o lado instável e estável do mapa. A Topo da terceira soleira a 2760 m e finalizando em 3000 m.

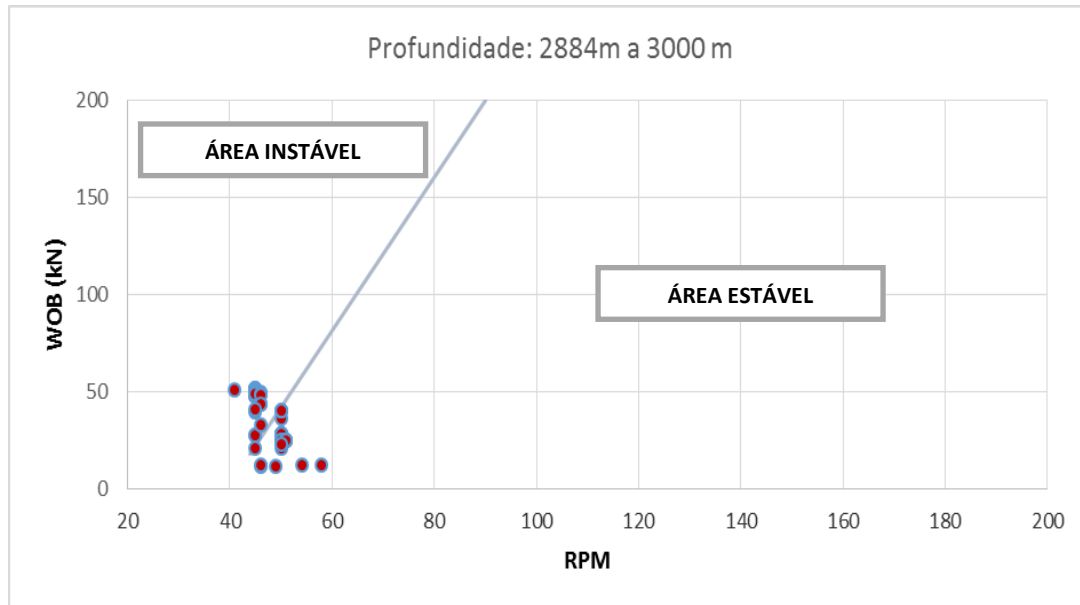


Figura 3.26 – Pontos de WOB vs RPM do Poço de 2884 m a 3000 m e o Mapa de Estabilidade para os casos de profundidade de 1700 m a 3000 m.

Validação do modelo, Conclusão e Recomendação

O modelo desenvolvido na dissertação de mestrado de CAYRES (2013) tem base teórica e foi concebido com objetivo de estabelecer uma plataforma de baixo custo e de tomada de decisão operacional. A relevância desta dissertação está na inserção de dados reais de uma coluna de perfuração no referido modelo para a obtenção de mapas de estabilidade e na inserção dados da de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) de um poço na Bacia do Solimões para comprovação e validação do modelo.

O referido modelo procura identificar, através da geração de mapas de estabilidade, os intervalos críticos onde poderia haver vibrações, auxiliando sobremaneira no planejamento da operação e melhorando a assertividade.

Compreendendo a importância dos modelos de análise para planejamento de perfuração, esta dissertação insere dados valiosos de perfuração, cedidos gentilmente pela HRT Oil & Gas, revelando o grande número de desafios e custos envolvidos em uma exploração de petróleo. O poço escolhido tem uma característica muito marcante, pois apresenta três intervalos da formação diabásio. O diabásio, por seu caráter de dureza, apesar de indicar possível formação petrogênica, pela selagem da rocha reservatório e garantindo alta temperatura para transformação da matéria orgânica, também oferece grandes incertezas quanto ao limite estratigráfico de sua formação. Estas incertezas, na maioria das vezes, só serão verificadas em campo, durante a operação, o que pode significar intervalos de possíveis vibrações.

A dissertação concentrou-se basicamente nas vibrações torcionais que geram o fenômeno de stick-slip e que podem ocasionar a quebra da coluna e o dano à broca.

A primeira etapa do trabalho foi estabelecer uma análise de sensibilidade, através de inserção de dados reais da coluna de perfuração, com o objetivo de estabelecer os mapas típicos de estabilidade. Para o poço em questão foram eleitos dois mapas típicos: um para profundidades entre 46 metros e 1700 metros e outro, para profundidades entre 1700 metros e 3000 metros.

A segunda etapa foi baseada na inserção de dados reais de WOB (peso sobre broca) e RPM (velocidade de rotação). Estes parâmetros foram escolhidos pelo caráter operacional, pois o operador da sonda (sondador) tinha o controle destes durante a operação.

Uma vez que os dados foram inseridos nos mapas típicos de estabilidade, o entendimento da resposta do modelo aos dados inseridos foi cada vez mais realçado. Variações de intervalos nos vários mapas gerados permitiu o refinamento das profundidades exatas onde e quando os pontos apareciam na área estável e na área instável. Após a análise de sensibilidade utilizando os parâmetros de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação), e comparando com a litoestratigrafia do poço perfurado, percebeu-se que a quebra da coluna e a aparecimento de pontos na área instável estão associadas a ocorrência da formação diabásio. As quebras de coluna ocorreram quando a formação estava no diabásio e a aumento de pontos na área instável estão associadas aos limites superiores e inferiores desta formação.

Após 2954 inserções de dados de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) em todas as profundidades após 46 metros até 3000 metros nos mapas típicos de estabilidade, percebeu-se a constância e coerência dos resultados obtidos dos mapas com os dados de operação cedidos pela HRT Oil & Gas, validando e comprovando a robustez do modelo de CAYRES (2013).

Como recomendação para o planejamento da perfuração de futuros poços, utilizar o modelo utilizado por CAYRES (2013) para definição dos parâmetros ótimos de WOB (peso sobre a broca) e RPM (velocidade de rotação) visando o custo mínimo e ROP (*rate of penetration* – taxa de penetração) máximo.

Como recomendação para estudos futuros, propõe-se a análise de um modelo que considere também as vibrações laterais na perfuração de poços de petróleo.

Referências bibliográficas

ANJOS, J.L.R. Análise de Vibrações Torcionais em Perfuração de Poços Poços de Petróleo. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

BARATA, C.F. & CAPUTO, M.V.C. Geologia do Petróleo da Bacia do Solimões. **O “Estado da Arte”**, 4ºPDPETRO, Campinas, SP, 2007.

BESALSOW, A.A. & PAYNE, L.M. A Study of Excitation Mechanisms and Resonances Inducing Bottomhole-Assembly Vibrations. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, New Orleans, 1986.

BRETT, J.F. The Genesis of Bit-Induced Torsional Drill-String Vibrations. **SPE/IADC Drilling Conference**, Amsterdam, Holanda, 1991.

CAYRES, B. Numerical and Experimental Analysis of Nonlinear Torsional Dynamics of a Drilling System. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

CHRISTOFOROU, A.P. & YIGIT, A.S. Coupled torsion and bending vibrations of actively controlled drillstring **Journal of Sound and Vibration**, v. 234, pp. 67-83, 2000.

CHRISTOFOROU, A.P. & YIGIT, A.S. Fully Coupled Vibrations of Actively Controlled Drillstring. **Journal of Sound and Vibration**, v. 267, pp. 1029-1045, 2003.

DIVENYI, S. Dinâmica de Sistemas Não-suaves Aplicada à Perfuração de Poços de Petróleo. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

HALSEY, G.W.; KYLLINGSTAD, A.; AARRESTAD, T.V.; LYSNE, D. Drillstring Torsional Vibrations: Comparison Between Theory and Experiment on a Full-Scale Research Drilling Rig. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, New Orleans, USA, 1986.

JANSEN, J.D. Whirl and Chaotic Motion of Stabilizes Drill Collars. **EuRPMean Petroleum Conference**, The Hague, 1990.

KYLLINGSTAD, A. & HALSEY, G.W. A Study of the Stick/Slip Motion of the Bit. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Dallas, 1987.

LISBOA, L.G.S.; FILHO, J.R.W. & Travassos W.A.S.; Bacia do Solimões - Arco ou Rampa de Carauari. **Anais do 13º Simpósio de Geologia da Amazônia**, 2013.

LEINE, R.I. & VAN CAMPEN, D.H. Discontinuous Bifurcations of Periodic Solutions. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 36, pp. 259-273, 2000.

LEINE, R.I. & VAN CAMPEN, D.H. Discontinuous Fold Bifurcation in Mechanical Systems. **Archive of Applied Mechanics**, v. 72, pp.138-146, 2000.

LEINE, R.I. Bifurcations in Discontinuous Mechanical Systems of Filippov-Type. Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Holanda, 2000.

PAVONE, D.; DEPLANS, J., 2004, Application of high sampling rate downhole measurements for analysis and cure of stick-slip in drilling. In: congresso anual de la amca 2004, number SPE 28324, New Orleans, USA, Setp. 25th - 28th 1994.

PLÁCIDO, J.C.R.; PINHO, R. 2009, Brocas de Perfuração de Poços de Petróleo. Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. 63p. Apostila.

RICHARD, T. Self-Excited Stick-Slip Oscillations of Drag Bits. Ph.D. dissertation, University of Minnesota. Minneapolis, Minnesota, USA. 2001.

SPANOS, P.D.; SENGUPTA, A.K.; CUNNINGHAM, R.A.; PASLAY, P.R. Modelling of Roller Cone Bit Lift-off Dynamics in Rotary Drilling, **ASME Journal of Energy Resources Technology**, v. 117, pp. 197-207, 1995.

THOMAS, J.E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2001.

TUCKER, R.W. & WANG, C. An Integrated Model for Drill-String Dynamics. **Journal of Sound and Vibration**, v. 224, pp. 123-165, 1999.

VASCONCELLOS, M.N. Análise de Vibrações na Perfuração de Poços de Petróleo a Partir de Modelos Não-Suaves. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.