

**ANÁLISE DE TORQUE EM COLUNAS DE PERFURAÇÃO DE
POÇOS DIRECIONAIS E SUA INFLUÊNCIA NO
MONITORAMENTO DA LIMPEZA DOS POÇOS**

BIANCA SABRINA COELHO

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

Aprovado por:

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

Eng. Carlos Eduardo da Fonseca
CENPES/PDP/TEP

Prof. Alexandre Leiras Gomes, D.Sc. (EQ/UFRJ)

Eng. João Carlos Ribeiro Plácido, Ph.D.
CENPES/PDP/TEP

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO, 2009

Dedicatória

A minha mãe Tereza, ao meu pai Jailson
e a minha irmãzinha Beatriz por sempre estarem ao meu lado,
apoiando, compreendendo e ajudando.
Obrigada por todo amor, carinho e confiança.

Agradecimentos

Agradeço a Nossa Senhora por sempre me mostrar o caminho, por ter me acompanhado, ter me protegido e ter me abençoado.

Aos meus pais, por todo amor, carinho e incentivo, pela constante presença a cada etapa vencida.

Ao meu professor e orientador Paulo Couto pelo apoio e encorajamentos contínuos na pesquisa e por toda orientação durante minha vida acadêmica e profissional, pela amizade e estímulo.

Aos meus amigos Joseir e Eduardo, pela amizade, apoio e pela inestimável ajuda na elaboração deste trabalho.

Ao meu coordenador e professor Alexandre Leiras, por toda sua amizade, pelo estímulo, compreensão, e todo o carinho e dedicação aos seus alunos. Obrigada por tudo.

Aos professores João Carlos e Roberto por dividirem seus conhecimentos e experiência.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas.....	viii
Nomenclatura.....	ix
Resumo	xi
Abstract.....	xii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	2
2 Revisão da Literatura.....	3
3 Torque.....	8
3.1 Modelo <i>Soft String</i> x <i>Stiff String</i>	10
3.2 Variabilidade dos Fatores de Fricção	12
3.3 Monitoramento de Condições de Poço.....	16
4 Metodologia.....	18
4.1 Equações Governantes.....	18
4.2 Hidrodinâmica ou Lubrificação Fluida.....	20
4.3 Rolamentos Parciais e Rolamentos Encaixados	30
4.3.1 Rolamentos Parciais	30
4.3.2 Rolamentos Encaixados.....	32
5 Simulação	34

5.1	Área Equivalente de Fluxo	34
5.2	Resultados.....	37
5.3	Haste e Rolamento.....	40
5.4	Resultados.....	42
6	Conclusão	44
7	Referências	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Contato em poço de baixa tortuosidade. (Fonte: Rezmer, 1999).....	11
Figura 2 – Tendências de torque na seção de 8 1/2pol causadas por torque mecânicos gerados pelo aumento da camada de cascalho e a redução do torque devido à adição de material de perda de circulação. Poço em Wytch Farm. Fonte: Payne, 1997.....	14
Figura 3 – Diagrama de forças em um elemento da coluna de perfuração.	14
Figura 4 – Correlação entre o torque previsto para a coluna de perfuração e os valores encontrados em campo. Fonte: Payne (1997).....	15
Figura 5 – Forças e geometrias na seção tangente. (a) Forças em um objeto inclinado; (b) forças e geometria na seção tangente. Fonte:Aadnoy,1998.....	19
Figura 6 – Diagrama para fluxo viscoso.....	21
Figura 7 – Rolamento hidrodinâmico de Petroff. A espessura do filme de óleo é constante.	22
Figura 8 – Diagrama de rolamentos sujeitos a cargas transversais (Norton, 1942).	23
Figura 9 – Variação da espessura do filme em rolamento (Norton, 1942).....	24
Figura 10 - Fluido em equilíbrio entre duas placas.	25
Figura 11 – Rolamentos Parciais.Norton,1942.....	30
Figura 12 – Diagrama de rolamentos parciais (Norton, 1942).	30
Figura 13 – Fator de fricção para rolamentos a 90°. Norton, 1942.	32
Figura 14 – Fator de fricção para rolamentos encaixados a 90° (Norton, 1942).....	33
Figura 15 – Desenho esquemático da coluna de perfuração em uma seção horizontal com acúmulo de cascalhos.	35
Figura 16 – Coluna de perfuração analisada.	36
Figura 17 – Gráfico de torque para as diferentes alturas da camada de cascalho.	39
Figura 18 – Gráfico de torque detalhado para as diferentes alturas da camada de cascalho.	39
Figura 19 – Desenho esquemático da coluna de perfuração e a camada de cascalho. ...	40
Figura 20 – Diagrama para o cálculo de correlação entre a altura da camada e o raio da coluna de perfuração.....	41
Figura 21 – Gráfico relacionando C_f e a atitude n	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela Comparativa entre os modelos <i>soft-string</i> e <i>stiff-string</i>	12
Tabela 2 - Configuração do poço analisado.	35
Tabela 3 – Valores dos fatores de fricção considerados.....	36
Tabela 4 – Altura do leito e área equivalente para poço aberto.	36
Tabela 5 – Resultado dos valores de torque para a operação de perfuração.	38
Tabela 6 – Valores dos ângulos inferiores e superiores para a integração.....	42

NOMENCLATURA

A	Área	[ft ²]
A'	Velocidade angular	[rad/seg]
c	Folga entre o rolamento e a haste	[cm]
C	Constante de integração.....	[-]
C_f	Coefficiente de fricção adimensional.....	[-]
D	Diâmetro	[in]
e	Excentricidade	[in]
F	Força de fricção	[lb]
F_c	Força lateral de curvatura	[lb]
F_b	Força lateral de flexão	[lb]
F_N	Força normal	[lb]
F''	Pressão de fricção	[lb/in ²]
G	Torque resistente	[lb in]
L	Comprimento	[ft]
M	Momento	[lb in]
N	Número de revoluções por minuto	[r.p.m.]
n	Atitude	[-]
P	Força transversal	[lb]
Q	Fluxo de óleo	[-]
r	Raio da haste	[in]
S_0	Força cisalhante	[lb]

U	Velocidade da superfície da haste	[in/seg]
V'	Velocidade resultante da haste	[in/seg]
W	Peso da coluna de perfuração	[lb]
W_n	Peso lateral.....	[lb]

Símbolos Gregos:

α	Inclinação da coluna de perfuração	[rad]
β	Ângulo a partir do eixo dos centros e início do contato entre a haste e o rolamento.	[rad]
γ	Fator de flutuação	[-]
ΔS	Comprimento	[ft]
θ	Ângulo entre um ponto da haste e o eixo dos centros.	[rad]
κ	Ângulo de varredura	[rad]
μ'	Coefficiente de fricção aparente	[-]
μ	Viscosidade do fluido	[cp]
ρ_{lama}	Densidade do fluido de perfuração.....	[lb/in ³]
$\rho_{coluna\ de\ perfuração}$	
	Densidade da coluna de perfuração.....	[lb/in ³]
Φ	Ângulo a partir do eixo dos centros a linha de ação da força transversal. [rad]	
ω	Peso linear	[lb/ft]

RESUMO

Poços direcionais tornaram-se freqüentes nas operações de desenvolvimentos de campos de petróleo nas décadas de 80 e 90. Hoje em dia, a grande maioria dos poços exploratórios perfurados é direcional, incluindo poços horizontais e de longo alcance. O avanço das técnicas e ferramentas de perfuração direcional permitiu que poços direcionais atingissem objetivos cada vez mais distantes da sonda. Este aumento no alcance da perfuração direcional atraiu a atenção dos engenheiros e pesquisadores para duas frentes de investigação: análise dos esforços de torque e arraste sobre a coluna de perfuração, e processo de limpeza do poço. Porém, estas duas áreas estão intrinsecamente interligadas uma vez que uma limpeza deficiente do poço causa acúmulo de cascalho no fundo o que, em consequência, aumenta os esforços de torque e arraste sobre a coluna e principalmente sobre o BHA. Por sua vez, o processo de limpeza do fundo do poço está relacionado com a velocidade angular (rotação) da coluna, que direciona os cascalhos à região de maior fluxo de fluido dentro do poço. A circulação do fluido sem a rotação da coluna pode não proporcionar energia suficiente para a remoção dos cascalhos, principalmente em longos trechos horizontais ou de alta inclinação. O presente trabalho tem por objetivo analisar os esforços de torque em colunas de perfuração de poços direcionais e como este parâmetro é influenciado pelo processo de limpeza do poço. A meta é utilizar estes dados para tentar correlacionar o processo de limpeza com valores de torque, parâmetro que pode ser monitorado a partir da sonda. Para se atingir estes objetivos, será efetuada uma revisão bibliográfica sobre os procedimentos de perfuração direcional, modelos de torque e arraste e processos de limpeza de poço para embasar o desenvolvimento seguinte. Este desenvolvimento será efetuado através da utilização de softwares de perfuração comerciais.

Palavras-Chave: perfuração direcional, torque, arraste, limpeza de poços, coluna de perfuração.

ABSTRACT

Directional wells have become a frequent operation during the development of oil fields in the 80s and 90s. Today, the vast majority of wells drilled is directional, including horizontal and long reach wells. The advance of techniques and tools for directional drilling allowed to reach more distant targets. This increase in the extent of directional drilling attracted the attention of engineers and researchers on two research fronts: analysis of torque and drag tension on the drill string and the cleaning process of the well. However, these two areas are intrinsically linked as a poor cleaning operation cause accumulation of gravel at the bottom which, in consequence, increase torque and drag on the column and above the BHA. The process of well cleaning is related to the angular velocity (rotation) of the column, which makes the gravel remains in suspension in the mud. The movement of the mud without the rotation of the column does not provide enough energy for the removal of gravel, especially on long horizontal or inclined wells. This study aims to examine torque in columns of directional drilling of wells and how this parameter is influenced by the process of well cleaning. The goal is to use these data to try to correlate the cleaning process with values of torque, a parameter that can be monitored from the platform. To achieve these goals, will be performed a bibliographic review on the procedures for directional drilling, torque and drag models. This development will be done through the use of commercial software drilling.

Keywords: Directional drilling, torque, drag, hole cleaning, drillstring.

1 INTRODUÇÃO

A técnica de perfuração direcional tem sido cada vez mais utilizada na indústria do petróleo. Esta técnica de perfuração permite que objetivos com coordenadas em ambientes de difícil acesso possam ser atingidos e permite que vários poços possam ser perfurados a partir de uma mesma plataforma. A perfuração direcional pode ser considerada um método de maximização de recuperação de reservatórios. Poços inclinados ou horizontais expõem uma maior área do reservatório, podendo ser considerados métodos de aumento da produtividade.

Em termos simples, o sondador tem a sua disposição três parâmetros que ele pode controlar: o peso sobre broca, a velocidade de rotação e a vazão da bomba de fluido. Ele possui três parâmetros que podem dar informações sobre as condições do poço: o torque, o arraste e a pressão na bomba.

Condições de poço que representam problemas potenciais mas não geram mudanças significativas nos valores de torque e arraste são de difícil detecção. Porém estes fatores geralmente afetam os valores de torque e arraste, sendo possível sua monitoração e prevenção.

O torque é a força rotacional gerada através de várias fontes dentro do poço. O torque total da superfície é composto por torque friccional, torque mecânico e torque da broca. Separar estas componentes permite uma melhor definição da fricção para as projeções de torque.

1.1 Motivação

O torque, o arraste, a deformação e a vibração são considerados pontos chaves que devem ser gerenciados e avaliados efetivamente no planejamento e nas fases operacionais de um poço de longo alcance. As respostas dos valores de torque monitorados durante as operações refletem as diversas situações as quais a coluna de perfuração está submetida no interior do poço. Um estudo mais detalhado das respostas dos valores de torque da coluna de perfuração pode gerar um indicador de possíveis problemas ou do surgimento de situações diferentes das previstas. Isto torna possível ao sondador monitorar o resultado de seu trabalho e estar atento às possíveis situações no interior do poço, podendo se adiantar a sérios problemas e ter um maior controle de suas operações.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo demonstrar que o monitoramento dos valores de torque da coluna de perfuração pode ser utilizado como uma ferramenta para a monitoração da operação de limpeza em poços direcionais. Para isto, foram realizadas duas análises. A primeira considera uma área equivalente formada entre o poço e a camada de cascalho com a coluna de perfuração. Uma segunda análise sobre hastes e rolamentos foi realizada para avaliar a fricção da seção horizontal da coluna de perfuração em relação ao poço. A lubrificação de hastes em rolamentos tem sido largamente estudada nos últimos dois séculos por serem componentes muito usados em equipamentos de geração de energia. Estudos teóricos foram realizados indicando que o coeficiente de fricção entre uma haste girando no interior de um rolamento, com a existência de um lubrificante, era diretamente proporcional a velocidade da haste e a viscosidade do fluido lubrificante. Com isto pretende-se encontrar uma relação entre os altos valores de fricção e a camada de cascalho que surge devido a ineficiência da operação de limpeza de poços.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No Mar do Norte alguns poços perfurados chegam ao alcance de até 8 Km e em um futuro próximo pretende-se que seja possível perfurar poços que vão além de 12 Km. Um dos fatores limitantes mais importantes na perfuração de poços de longo alcance é o fator friccional.

Com o desenvolvimento de novas técnicas de perfuração direcional tornou-se possível a perfuração de poços de maior alcance. Objetivos cada vez mais distantes da sonda puderam ser alcançados com sucesso. Segundo Pilehvari *et al.*(1999) a limpeza de poços se apresenta como um problema comum e custoso na perfuração direcional e horizontal. A limpeza inadequada de poços horizontais pode causar problemas como rápido desgaste da broca, baixas taxas de perfuração, altos valores de torque e arraste, e a prisão da coluna de perfuração. Se a situação não for tratada da maneira correta, podem ocorrer desvios na trajetória ou até mesmo a perda do poço.

Estudos sobre o transporte de cascalhos em poços inclinados foram iniciados pela *Tulsa University Drilling Research Projects (TUDRP)*, há três décadas atrás, onde foi estudada sua relação com a inclinação do poço, as configurações do fluido e a velocidade mais adequada para cada caso estudado. Segundo Pilehvari (1999), os estudos da TUDRP foram seguidos por análises sobre transportes de cascalhos realizados pela Landmark, uma divisão da empresa Halliburton destinada ao desenvolvimento de softwares para simulação de operações em poços de petróleo. Seus estudos concluíram que os mecanismos de transporte de cascalho e comportamento do fluxo em poços horizontais são bem diferentes dos encontrados em poços verticais. Pilehvari concluiu-se que a limpeza do poço é dependente do ângulo de inclinação, da hidráulica, das propriedades reológicas da lama, da excentricidade da haste de perfuração, e da taxa de perfuração.

Aadnoy *et al.*(1998) foca seu trabalho na força friccional surgente em poços direcionais, que é um fator limitante em poços de longo alcance. Eles desenvolvem expressões analíticas para seções de ganho de ângulo, perda de ângulo, seções inclinadas e horizontais. Estas equações tornam dispensável o uso de simuladores para análise friccional. São obtidos modelos para curvatura constante e para o perfil de catenária modificada. O novo modelo de catenária modificada é desenvolvido para inclinações de entrada e saída arbitrárias. São desenvolvidas expressões para torque e

arraste da coluna baseadas nas equações de tensão. Modelos friccionais são obtidos para poços de diversas geometrias. A fricção total do poço é dada pela soma das contribuições das seções reta, de seções de ganho e de perda de ângulo. Usando as equações obtidas, realizou-se um estudo de campo *offshore* no Mar do Norte, no campo de Yme. As equações foram utilizadas na escolha da trajetória do poço minimizando o torque e o arraste. O artigo traz algumas instruções para desenhos de poços de longo alcance.

Um transporte de cascalhos eficiente é um dos principais desafios durante a perfuração de poços de longo alcance com seção de alta inclinação (Guild *et al.* 1995; Gao and Young 1995; Schamp *et al.* 2006). Os cascalhos podem sofrer diminuição de tamanho enquanto são transportados para fora do poço, especialmente quando a operação de perfuração é realizada com rotação da coluna. A operação de perfuração pode ser impedida se não houver um transporte de cascalhos eficiente. Por causa de excessivos valores de torque e arraste causados por partículas de cascalhos que se depositam na parte inferior horizontal ou inclinada do poço, pode não ser possível a realização da operação de descida de revestimento mesmo que a perfuração consiga alcançar o seu alvo. Problemas similares ocorrem em poços horizontais ou de alta inclinação perfurados através de reservatórios apresentando arenitos não consolidados.

Práticas de campo e observações experimentais (Ahmed 2001; Bassal 1995; Gavignet and Sobey 1989; Larsen 1990; Parker 1987) demonstram que cascalhos de menores dimensões são mais difíceis de se transportar sob certas condições. Além disso, partículas menores tendem a se aderir a coluna de perfuração devido ao seu efeito de coesão. (Ahmed 2001; Gailani *et al.* 2001). É ainda mais difícil movimentar a coluna quando ela está presa por cascalhos de pequenas dimensões.

O trabalho de Rae *et al.*(2005) descreve o uso da análise de torque e arraste na perfuração de poços de longo alcance no Campo de Captain, no mar do Norte. Esse campo se caracteriza por reservatórios rasos e de baixa profundidade, necessitando a aplicação de poços de longo alcance para aumentar sua produtividade. O artigo explica o que é a análise de torque e arraste e a sua importância. Também explica como lidar com questões como o risco associado à profundidade medida na perfuração. A modelagem do torque e arraste permite identificar áreas problemáticas em trajetórias de poços direcionais.

Brett *et al.* (1987) apresentam um trabalho sobre os resultados da aplicação das modelagens de torque e de tensões em poços direcionais perfurados pelo mundo todo. O

trabalho traz exemplos que demonstram como as modelagens do torque e das tensões ajudam a escolher a melhor trajetória para o poço, o tipo de coluna de perfuração, o programa de revestimento mais apropriado e o tipo de lama a ser utilizado antes do início da perfuração do poço. O arraste e o torque são estimados a partir de um modelo matemático que é desenvolvido considerando o torque e o arraste atuante em qualquer pequeno elemento da coluna de perfuração, sendo proporcional a força normal atuante neste elemento.

Segundo Yu *et al.*(2004) um importante ponto na perfuração de poços de longo alcance está na limpeza do poço. Os métodos comumente utilizados dão ênfase à capacidade de arraste dos cascalhos produzidos durante a perfuração, porém em poços horizontais e inclinados as forças gravitacionais levam a deposição dos cascalhos diminuindo a capacidade de arraste e a boa limpeza do poço. É proposto então um método que diminui a influência da força gravitacional sobre o comportamento deposicional dos cascalhos permitindo que o arraste seja o fator de maior influência. Para isso adotou-se o uso de surfactantes químicos para unir os cascalhos às bolhas de gás diminuindo a deposição e facilitando o arraste, levando a uma limpeza mais eficiente do poço. São feitos experimentos para determinar quais surfactantes químicos são efetivos para unir bolhas de gás ao cascalho, quais parâmetros devem ser considerados e o quanto o emprego desta técnica pode aprimorar o carregamento dos cascalhos.

Masuda *et al.*(2000) reafirmam que o transporte de cascalhos em poços horizontais e de longo alcance é crucial. A deposição de cascalhos devido a um programa de limpeza deficiente pode gerar aprisionamento da coluna, diminuição da taxa de penetração da broca, causar excentricidade no poço, etc. Masuda realizou experimentos com a finalidade de analisar o comportamento dos cascalhos em fluidos com regimes permanente e transiente e os resultados obtidos foram gravados utilizando sistema de vídeo. Um modelo numérico foi desenvolvido para o estudo. Este modelo permitia interação entre os cascalhos formados e o fluido de perfuração, com isso foi possível determinar a pressão, a velocidade do fluido e das partículas, a concentração de ambos no espaço anular em diferentes períodos. Os resultados obtidos com o modelo numérico utilizado estiveram próximos dos dados experimentais em poços inclinados na maioria dos casos estudados.

O manual da K&M Technology Group.(2003) traz informações para um bom desenvolvimento do poço. O livro especifica diferentes tipos de poços de longo alcance

e descreve as situações que podem ocorrer durante sua perfuração. Indicam uma estrutura organizacional para o planejamento de um poço de longo alcance e o gerenciamento de riscos. Quanto mais detalhado for o planejamento da engenharia e da logística de um poço, menor o risco ao perfurá-lo. O manual exemplifica técnicas que podem ser adotadas para uma boa perfuração, como técnicas para limpeza do poço e como aplicá-las durante a perfuração, a escolha da broca, as ferramentas e as novas tecnologias empregadas, além do controle de poço e as estratégias utilizadas para a perfuração direcional entre outras. Em um poço direcional, surgem forças resultantes do contato entre a coluna de perfuração e o poço. Estas forças, torque e arraste, geralmente atuam contrárias a movimentação da coluna. Quanto mais longo o poço, maiores serão os valores de torque e arraste podendo resultar em alto torque, excedendo a capacidade do topdrive ou da coluna de perfuração podendo levar a impossibilidade de descida da coluna e prejudicar o revestimento.

Em estudos sobre hastes e rolamentos, Petroff (1883) calcula a força de fricção F em hastes lubrificadas conforme ocorre o arraste do fluido viscoso no espaço radial entre a haste e o rolamento, c . A haste apresenta movimento de rotação no interior do rolamento com uma velocidade na superfície equivalente a U . A área molhada considerada é πDL , onde L é o comprimento do rolamento e D é o diâmetro da haste. Assim,

$$F = \frac{\pi \mu DLU}{e} \quad (1)$$

onde, neste caso, F é a força de fricção, μ é a viscosidade do fluido e o coeficiente de atrito pode ser calculado como F/W (onde W é a força aplicada). Esta é a lei de Petroff.

Em 1883, B. Tower apresentou os resultados de seus estudos sobre fricção em rolamentos utilizando um rolamento parcial com o comprimento de seis polegadas e uma haste apresentando quatro polegadas de diâmetro.

A haste foi imersa em óleo e rotacionada com uma carga de 8.008 libras aplicada de forma transversal no rolamento. Ele mediu a pressão hidráulica em vários pontos no pequeno espaço entre a haste e o rolamento. Tower verificou que a eficácia do lubrificante para uma haste rotacionando em um rolamento variava com a viscosidade do lubrificante, as dimensões do rolamento e a velocidade entre outros.

Em 1886, Osbourn. Reynolds desenvolveu algumas equações para rolamentos. Ele descreveu a ação de lubrificação utilizando a idéia de que a rotação da haste arrasta o fluido para a região de contato entre a própria haste e o rolamento, formando uma pressão de fluido que suporta a carga aplicada. Reynolds combinou estas variáveis em uma formulação matemática baseada nas equações de Navier-Stokes para o fluxo de fluido.

Muitos outros autores utilizaram as equações de Reynolds como ponto de partida para análise do comportamento de rolamentos em casos mais complexos.

Em 1994, Sommerfeld publicou variações das equações de Reynolds para um grande número de condições, particularmente para o comportamento de uma haste em um rolamento bem lubrificado.

O estudo desenvolvido neste projeto procurou estabelecer correlações entre os valores de fricção da coluna de perfuração em função do aumento da altura da camada de cascalho.

Esta pesquisa é importante no sentido de lançar as direções segundo as quais as respostas de torque podem ser inseridas como uma ferramenta para o monitoramento da operação de limpeza. A partir disto desenvolveu-se um estudo pretendendo demonstrar as tendências dos valores de fricção em relação ao aumento da altura da camada de cascalho. Com isto objetiva-se conhecer melhor o comportamento das respostas de torque e ter uma maior segurança ao correlacioná-las com possíveis situações de limpeza ineficiente.

3 TORQUE

Em poços verticais problemas de torque e arraste não são considerados de muita significância devido ao fato de que teoricamente considera-se a coluna de perfuração posicionada no centro do poço, sem que haja contato entre suas paredes e a coluna. Desta forma, evita-se o surgimento de forças de contato e o torque e arraste são praticamente nulos. Porém, conforme o poço torna-se inclinado, a ação da gravidade e das tensões na coluna fazem com que este contato surja gerando forças de fricção na coluna de perfuração. Estas forças adicionais são cumulativas, portanto quanto mais longo o poço, maior serão os valores destas forças.

Altos valores de torque e arraste podem ser gerados por numerosos motivos incluindo *key seats*¹, prisão diferencial, aumento da camada de cascalho gerada por uma limpeza de poço ineficiente e a fricção do poço. Estas causas, com exceção da fricção, estão associadas às condições problemáticas encontradas no poço. Em poços apresentando boas condições, a principal fonte de torque e arraste é a fricção.

Torque e arraste originados por qualquer fonte tendem a ser mais problemáticos em poços direcionais. Em poços muito profundos, com grande desvio, torque e arraste podem ser críticos.

O torque friccional é a força friccional gerada pelas cargas de contato entre a coluna de perfuração e o revestimento ou o poço aberto. Este seria o único torque gerado em um poço perfeitamente limpo enquanto rotaciona-se a coluna suspensa (*rotating off bottom*). A magnitude desta componente do torque é determinada pelos seguintes fatores:

- Tensão ou compressão da coluna de perfuração - quanto maior a tensão, maior a força de contato. Em seções de ganho de ângulo, a tensão pode ser alta o suficiente para superar as forças gravitacionais e a força de contato pode surgir no lado superior do poço. O peso sobre broca também pode afetar a tensão na coluna de perfuração, afetando assim, o torque friccional.
- *Dogleg*² - altos valores de dogleg levam ao aumento das forças de contato.
- Diâmetros do poço e da coluna de perfuração - o anular entre a coluna de perfuração e o poço afetará as forças de contato. Uma pequena folga anular

¹ Keyseat: canal de menor diâmetro dentro do poço. Pode ser resultado de uma mudança repentina de direção do poço. O diâmetro do canal é tipicamente parecido com o diâmetro da coluna de perfuração. Ferramentas de perfuração de maior diâmetro tendem a ficar presas.

² Dogleg: lugar no poço onde sua trajetória 3D muda rapidamente.

aumenta a dureza efetiva da coluna de perfuração e assim aumenta as forças de contato.

- Peso da coluna - maiores valores de peso de coluna (i.e. *HWDP*³) resultarão em maiores forças de contato. (i.e. mais peso empurrado contra as paredes do poço).
- Inclinação - a inclinação do poço afetará a força de contato, assim, uma maior inclinação resulta em uma maior componente do peso da coluna perpendicular ao poço. Porém, em inclinações muito grandes, o torque pode sofrer redução devido ao fato de que, como o peso da coluna está distribuído pela parede do poço, a tensão na coluna de perfuração e as forças de contato serão reduzidas.
- Lubricidade ou fator de fricção - a lubricidade é controlada majoritariamente pelas propriedades da lama e pelo tipo de formação.

O torque mecânico é gerado pela interação da coluna de perfuração e o BHA⁴ com a camada de cascalho, formações instáveis (inchamento de argilas) ou por prisão diferencial. Também é regularmente notado devido a interação excessiva dos componentes do BHA com a formação.

O torque da broca é resultado direto da interação entre a broca e a formação sendo perfurada. O torque resultante irá depender em grande parte do formato da broca, sendo que a PDC⁵ normalmente irá gerar mais torque que a tricônica. *Downhole torque subs*⁶ (DTOR) são os melhores meios de se determinar o torque na broca. O torque resultante também será função do peso sobre broca, da taxa de rotação, características da formação, variações do formato da broca, desgaste da broca e hidráulica. Estes fatores fazem com que seja necessária muita cautela ao se adotar um modelo para a broca. Uma aproximação mais empírica é a de se utilizar um limite superior conservativo para o torque da broca, preferencialmente baseado em dados de campo.

Johancsik, 1984, afirma em seu trabalho “*Torque and Drag in Directional Wells*” que o princípio do modelo preditivo para torque e arraste na coluna de perfuração é que as forças de torque e o arraste em um poço inclinado são principalmente causados por fricção por deslizamento (*sliding friction*). A força de fricção por deslizamento é calculada pela multiplicação entre as forças de contato laterais e um coeficiente de fricção.

3 HWDP - Heavy Weight Drill Pipe: coluna de perfuração que apresenta grande peso

4 BHA – Bottomhole Assembly: conjunto de fundo da coluna de perfuração.

5 PDC: ferramenta de perfuração que utiliza lâminas de diamante policristalino compacto para cortar a rocha perfurada.

6 Downhole Torque Subs: pequeno componente da coluna de perfuração utilizado na monitoração do torque.

Esta força de contato lateral, segundo Iain Rezmer-Cooper(1999), pode ser subdividida em três componentes principais:

A primeira componente é o peso Lateral, W_n , que é a componente do peso da coluna de perfuração que é perpendicular ao eixo do poço horizontal. Este peso tende a forçar a coluna de perfuração para o lado inferior do poço.

A segunda componente é a força lateral de curvatura, F_c . Este é um produto da tensão e da curvatura da coluna na área de contato. Uma coluna de perfuração tracionada é similar a um pedaço de coluna que apresenta uma força de tração aplicada em cada ponta. Quando a coluna está tracionada sua tendência natural é assumir uma posição reta. Para curvar a coluna, uma força lateral deve ser aplicada a algum ponto de contato na coluna. Da mesma forma, o poço deve aplicar uma força lateral na coluna de perfuração em vários pontos de contato para que a coluna se curve.

A terceira componente é a força lateral de flexão F_b . Esta força é similar a força lateral de curvatura, mas sendo um resultado da resistência a flexão da coluna e não da tração. Quando a coluna de perfuração é flexionada surge uma força natural restaurativa que tenta trazê-la de volta ao seu formato reto original. Esta força é a força lateral de flexão entre a coluna e o poço.

3.1 Modelo *Soft String* x *Stiff String*

Existem essencialmente dois modelos de torque e arraste: o *soft-string* e o *stiff-string*. O modelo *soft-string* divide a coluna de perfuração em elementos distintos formando uma cadeia. Assume-se que as forças axiais (tensão e torque) são advindas da própria coluna de perfuração e que as forças laterais (forças de contato) são dadas pelo poço. O modelo assume que a coluna de perfuração sempre se deforma tomando a forma do poço, e assim, apresenta contato contínuo através de todo seu comprimento. Em contrapartida, o modelo *stiff-string* utiliza análise em elementos finitos. Esta técnica produz uma análise mais realística das tensões e dos carregamentos agindo sobre a coluna de perfuração e o poço.

Os modelos *stiff-string* e *soft-string* calculam as forças de contato de maneira diferente. O modelo *soft-string* negligencia completamente a rigidez na flexão da coluna de perfuração. Como resultado, ambos os modelos reagem de forma diferente dependendo da trajetória e da tortuosidade do poço.

Durante o planejamento do poço, a trajetória gerada a partir de considerações geométricas (pontos de ganho de ângulo, localização do alvo) geralmente é um conjunto de curvas suaves. Ao aplicar um projeto de trajetória suave para o poço, o torque previsto e a carga no gancho são sempre menores que as obtidas na realidade devido a irregularidades do poço e micro-angulações resultantes da operação de perfuração. Para melhor representar o torque e o arraste em um poço, tortuosidades podem ser adicionadas ao planejamento do poço.

A inclinação do poço vai definir qual componente da força de contato tem o maior impacto na força de contato total. Enquanto a inclinação aumenta, a componente normal do peso da coluna de perfuração aumenta (peso lateral W_n). Assim, a contribuição da componente normal do peso da coluna para a força de contato total aumenta. Ambos os modelos *soft-string* e *stiff-string* calculam a força de contato identicamente.

A curvatura e a tortuosidade do poço apresentam grande impacto na distribuição das forças de contato. A Figura 1 ilustra o contato entre a parede do poço e a coluna de perfuração em poços de baixa tortuosidade. Segundo Ian Rezmer-Cooper (1999), em seu trabalho “*Field Data Supports the use of Stiffness and Tortuosity in Solving Complex Well Design Problems*”, ambos os modelos darão resultados semelhantes, já que a força lateral de dobramento ou flexão (*bending side force*) é bem menor que a força lateral de curvatura (*curvature side force*). Ambos os modelos *stiff* e *soft-string* apresentarão os mesmos resultados para uma mesma trajetória sem tortuosidade.

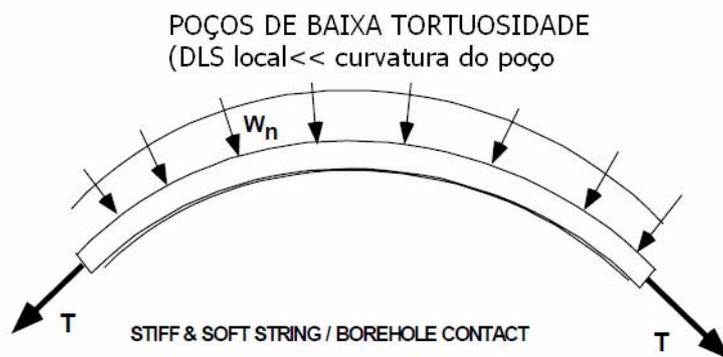


Figura 1 – Contato em poço de baixa tortuosidade. (Fonte: Rezmer, 1999)

Para o modelo *soft-string*, a curvatura da coluna de perfuração é sempre igual à curvatura do poço. Assim, a coluna de perfuração está sempre em contato com as paredes do poço para este modelo. Ao fazer esta consideração, o modelo *soft-string*

superestima a área de contato e a força lateral de curvatura no caso de poços com grande tortuosidade. O modelo *stiff-string*, em contraste, permite que a curvatura da coluna de perfuração seja diferente da curvatura do poço. Como resultado, a área de contato torna-se reduzida e a força lateral de curvatura torna-se mais realística.

Para poços de pequena inclinação, onde a componente do peso é aproximadamente nula, a diferença na força lateral de curvatura entre os modelos *soft-string* e *stiff-string* é bem mais pronunciada na presença de tortuosidades. As principais características de ambos os modelos são demonstradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela Comparativa entre os modelos *soft-string* e *stiff-string*.

<i>Soft-string</i>	<i>Stiff-string</i>
Negligencia a rigidez da coluna de perfuração	Coluna de perfuração rígida
Força lateral de curvatura superestimada	Força lateral de curvatura mais realística
Maior área de contato gerando maior fricção	Área de contato mais realística

3.2 Variabilidade dos Fatores de Fricção

O torque friccional é o menor torque associado à coluna de perfuração rotacionando em um poço considerado limpo, utilizando-se um fluido de perfuração específico. Analogamente, o arraste friccional é o menor valor de arraste associado à coluna de perfuração durante as operações de subida ou de descida de coluna. Vários efeitos mecânicos podem agravar estas situações ótimas e causar aumento nos valores de torque. Estas situações incluem acúmulo de cascalho, formações instáveis, inchamento de argilas e interações excessivas entre a coluna de perfuração e o poço.

Medidas podem ser tomadas para minimizar este efeito, mas antes é importante que se reconheça a situação que está causando a variação no fator de fricção. Maiores taxas de fluxo de fluido de perfuração, controle de sua reologia e rotação da coluna de perfuração podem ser aplicados na melhora das operações de limpeza de poço, minimizando a formação da camada de cascalho. Análises químicas e mecânicas da estabilidade do poço podem resultar nas características químicas e de peso de lama necessárias para controlar a instabilidade do poço. A identificação de torques excessivos em estabilizadores possibilita uma melhor seleção de equipamentos.

Um exemplo de variações de torque induzidas mecanicamente são apresentadas por Payne *et al.* (1997), em seu trabalho “*Advanced Torque and drag considerations in Extended-Reack Wells*”, onde são analisados poços em Wytch Farm. Na Figura 2, vemos uma tendência bem definida do comportamento do torque estabelecido para os poços F19, F20 e F21 estudados por Payne. No poço M2 problemas de perdas de circulação na seção de 8 ½ pol levaram a adição de material fibroso para perda de circulação (LCM⁷). O LCM formou uma camada na parte inferior que combinado com o fluido de perfuração de base óleosa produziu uma menor interface friccional para a coluna de perfuração e BHA do que com o anterior contato entre o aço e o arenito. A tendência de torque do poço M2 é muito complexa. Esta tendência envolve um processo cíclico de perfuração da seção de reservatório aberta (com sua íngreme tendência de torque associada) seguida pelo condicionamento desta seção de poço aberto através primeiramente, da limpeza do cascalho composto por finos grãos de areia enquanto adiciona-se simultaneamente LCM (com a redução de torque associada). Estes comportamentos sublinham as variações de torque que ocorrem como resultado das condições do poço e do papel dominante que os fatores mecânicos exercem na projeção de toque sobre as considerações friccionalis.

Brett *et al.* (1987), apresenta os resultados de uma aplicação de um modelo de torque e tensão para poços direcionais. Este modelo foi utilizado para a monitoração de poços durante a perfuração. O modelo utilizado foi o desenvolvido por Sheppard *et al.* (1987) considerando que o torque e o arraste atuando em cada elemento da coluna de perfuração é proporcional a força normal atuando em cada elemento como na figura 3.

O modelo de torque e tensão utilizado por Brett faz um balanço entre as forças em cada elemento, resultantes do peso e da tensão da coluna, força de contato com a parede do poço e fricção aparente. A Figura 3 representa o balanço de forças em cada elemento. A constante de proporcionalidade μ' , neste caso, é o coeficiente de fricção aparente da equação de fricção Newtoniana $F_d = \mu' F_n$, onde F_d é a força de arraste friccional e F_n é a força normal. Quando aplicado a perfuração, μ' não é um coeficiente de fricção real e sim um coeficiente que engloba a fricção gerada por vários aspectos, incluindo a fricção de Coulomb e prisão de coluna por diferencial de pressão.

⁷ Fiber LCM – um tipo de material para perda de circulação longo e flexível que é adicionado a lama para retardar a sua perda para fraturas ou para zonas de alta permeabilidade

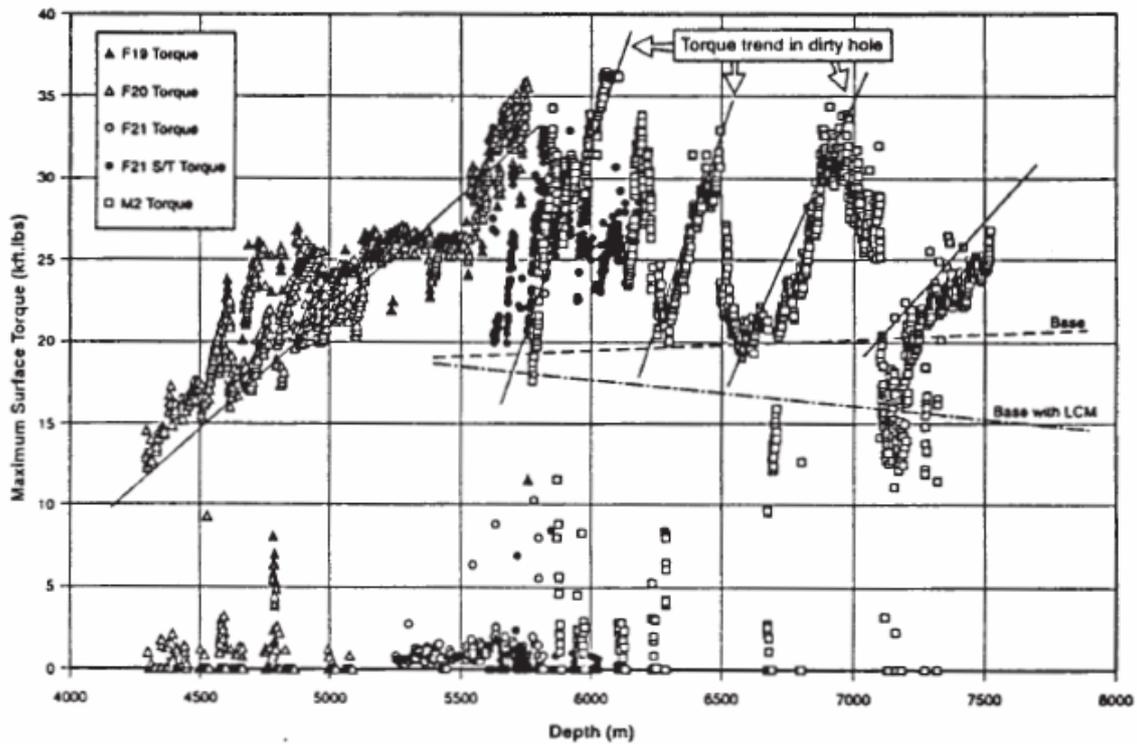


Figura 2 – Tendências de torque na seção de 8 1/2pol causadas por torque mecânicos gerados pelo aumento da camada de cascalho e a redução do torque devido à adição de material de perda de circulação. Poço em Wytch Farm. Fonte: Payne, 1997.

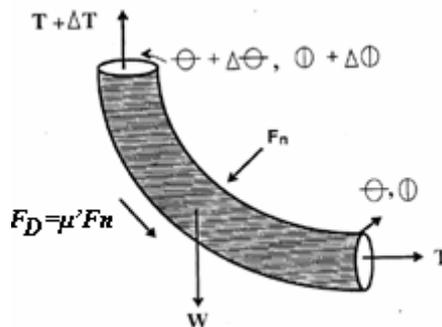


Figura 3 – Diagrama de forças em um elemento da coluna de perfuração.

É importante saber que para as operações de subida de coluna e descida, os fatores de fricção não são os mesmos. De fato, muitos modelos de torque e arraste permitem apenas uma entrada para o fator de fricção de um revestimento e um outro fator de fricção para o poço aberto.

As variações nos valores de torque ocorrem devido a variações em lubricidade, limpeza de poço eficiente, dinâmica da coluna de perfuração, efeitos de subida e descida de coluna, e o uso de ferramentas para redução de torque. Em poços de longo alcance, as projeções de torque devem ser baseadas em uma aproximação integrada utilizando as informações de campo para a calibração do modelo. Os valores de torque devem ser medidos, monitorados, gravados e comparados com modelos preditivos em tempo real. Mesmo sem a existência de um modelo de comparação em tempo real, tendências em desvios de torque fornecem um aviso antecedente a problemas de limpeza de poço, na broca ou composição de fundo ou problemas de estabilidade do poço.

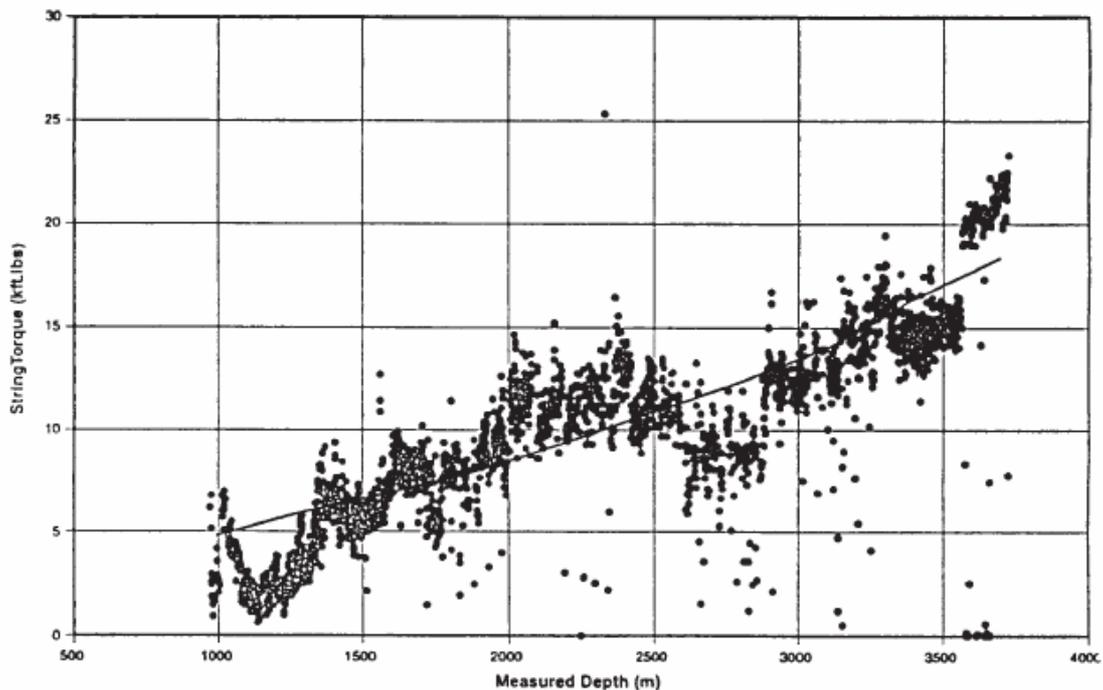


Figura 4 – Correlação entre o torque previsto para a coluna de perfuração e os valores encontrados em campo. Fonte: Payne (1997).

A Figura 4 mostra uma comparação entre valores de torque previstos e medidos para a coluna de perfuração em uma seção 12 ¼ pol. de um dos poços de longo alcance estudados por Payne (1997) em Wytch Farm. A modelagem do torque foi baseada em parâmetros do poço e o fator de fricção definido para fluido de base óleo. As informações medidas são baseadas em medidas de torque de superfície corrigidas para o torque na broca (*downhole torque-on-bit*). O torque medido está sujeito a erros pois a medição do torque na superfície ocorre várias vezes por segundo enquanto as medidas

de torque na broca são atualizadas a cada ciclo de comunicação do MWD⁸, a cada 30 a 45 segundos. Como as medidas não são sincronizadas, o torque na coluna não pode ser medido com exatidão.

3.3 Monitoramento de Condições de Poço

Limitações inerentes da habilidade de se prever o comportamento futuro do poço levam a conclusão de que mesmo os melhores planejamentos de poços estão sujeitos a revisões. Mudanças inesperadas de litologia, sistema de circulação ou a performance direcional podem levar a mudanças no planejamento inicial. Muito comumente, o impacto de mudanças inesperadas não é notado até que seja tarde demais, especialmente em poços direcionais. Uma grande porcentagem extra de coluna de revestimento, operações de pescaria, prisão de coluna, e perda do poço são experimentados em poços direcionais. O custo de problemas em poços é elevado, sendo importante a identificação de problemas potenciais em um espaço de tempo em que seja possível a adoção de medidas preventivas ou de remediação.

A análise de torque e de tensão é útil no diagnóstico de problemas em tempo real pois muitas das variáveis que afetam a performance da perfuração também afetam o comportamento de torque no poço. A detecção prévia de problemas, indicados pelo aumento aparente do valor de fricção, podem ajudar a reduzir as ocorrências de problemas de limpeza de poço, prisão diferencial ou estabilidade de poço.

Brett *et al.* (1987), realizou um estudo sobre a aplicação de modelos de torque e tensão em poços direcionais perfurados em todo o mundo. A inclinação final destes poços se encontravam entre 25° a 70° e o modelo de torque e tensão desenvolvido foi utilizado nestes casos para auxiliar no programa de planejamento direcional para ajudar na análise de problemas particulares de perfuração. Ao comparar o resultado previsto do modelo de toque e arraste com os dados reais foi possível prescrever medidas de remediação para estes poços. Baseados na análise em tempo real de torque e tensão, as operações foram modificadas quanto a propriedade do fluido de perfuração para operações de subida e reposição da coluna de perfuração onde a broca ou toda a composição de fundo passariam pela região problemática do poço, para operações de

⁸MWD (*Measurement While Drilling*): ferramenta para a realização de medições enquanto se perfura.

circulação no fundo do poço enquanto a coluna de perfuração ou o revestimento é movimentada alternadamente ao longo do eixo da coluna. É difícil provar conclusivamente que problemas foram prevenidos, entretanto, poços onde o modelo estudado por Brett foi aplicado rotineiramente como uma ferramenta para o diagnóstico das condições do poço foram operados sem apresentar problemas.

A habilidade de obter leituras apuradas de cargas na coluna de perfuração depende da precisão do equipamento de leitura. Quase todas as plataformas possuem indicadores de peso para fornecer ao operador informações sobre peso da coluna, peso sobre broca e forças de arraste. O indicador de peso geralmente inclui o peso da manobra do conjunto e do Kelly⁹. Para a análise das forças de arraste deve ser estudada a tração no topo da coluna de perfuração, abaixo do Kelly.

Segundo Johancsik (1984), as medidas de torque são problemáticas pois é difícil sentir e comunicar o torque de um equipamento. A maioria das plataformas estão equipadas com algum método de medição de torque. Porém algumas destas técnicas não são precisas, e muitos dos equipamentos não são calibrados de forma a dar resultados em unidades de torque práticas. Mesmo quando estes métodos funcionam bem, há uma deficiência na questão da portabilidade. Um medidor de torque portátil pode ser levado de plataforma a plataforma conforme seja necessário, e pode ser levado a alguma base onde possa ser reparado ou calibrado.

⁹ Kelly - haste/tubo utilizado para transmitir rotação para a coluna.

4 METODOLOGIA

Neste Capítulo, são apresentadas as equações que serão utilizadas como base para este estudo. Serão apresentadas as equações de torque e arraste dadas por Aadnoy e Andersen (1998) para análise de fricção da coluna de perfuração.

É apresentado também um estudo sobre hidrodinâmica ou lubrificação fluida desenvolvido por A.E.Norton (1942) e suas equações governamentais para fricção. Norton estudou a interação entre a rotação de hastes em rolamentos na presença de lubrificantes. O estudo desenvolvido por Norton será utilizado para uma correlação entre a coluna de perfuração sendo rotacionada no interior do poço na presença de fluido lubrificante, no caso, o próprio fluido de perfuração.

4.1 Equações Governantes

Os modelos aqui mostrados são resultado do trabalho de Aadnoy and Andersen (1998) para torque e arraste em seções tangentes considerando o modelo soft-string, ou seja, considera-se a coluna em contato contínuo com o poço excluindo-se este contato nas seções verticais. Considera-se que a coluna de perfuração se deforma tomando o formato do poço. As forças atuantes na coluna de perfuração inclinada estão representadas na Figura 5.

A força requerida para puxar a coluna de perfuração sobre um plano inclinado é:

$$F = mg\cos\alpha + \mu' mg\sin\alpha \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, m é a massa e α é o ângulo de inclinação da coluna conforme representado na figura 5.

Se a coluna de perfuração ao invés de estar sendo puxada para fora do poço estiver sendo empurrada para dentro, a fricção atuando contrária a movimentação da coluna resulta em uma força igual a:

$$F = mg\cos\alpha - \mu' mg\sin\alpha \quad (2)$$

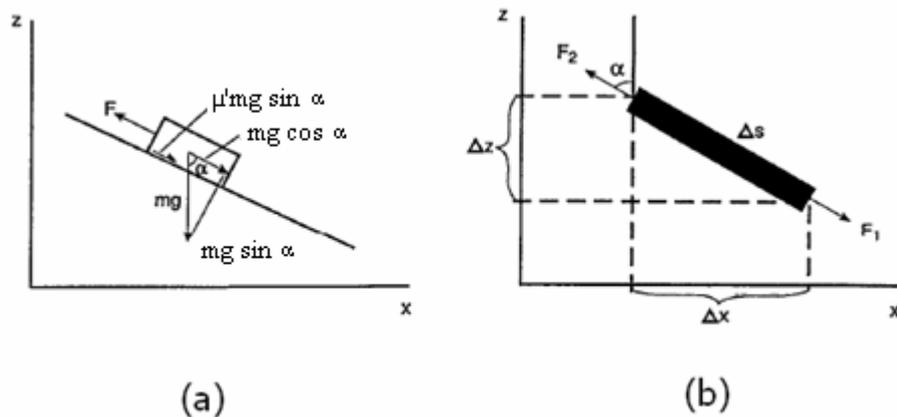


Figura 5 – Forças e geometrias na seção tangente. (a) Forças em um objeto inclinado; (b) forças e geometria na seção tangente. Fonte: Aadnoy, 1998

Este é o modelo friccional de Coulomb. A partir de uma posição estacionária, ao aumentar ou diminuir a carga, um mesmo valor irá gerar movimentação de subida ou descida da coluna de perfuração. Para uma coluna de perfuração de peso $mg (= \omega \Delta S)$ e inclinação α , o peso axial e a força de arraste na seção tangente torna-se:

$$F_{1,2} = F_{1,1} + (\omega \Delta S (\cos \alpha \pm \mu' \sin \alpha)) \quad (3)$$

onde ω é o peso linear da coluna de perfuração e ΔS é o comprimento do segmento de coluna considerado.

O sinal positivo define a subida da coluna e o sinal negativo define a descida da coluna de perfuração. O primeiro termo dentro dos parênteses representa o peso da coluna e o segundo termo representa a força friccional adicional requerida para mover a coluna. A mudança do valor da força ao iniciar a movimentação de subida ou descida da coluna é dada pela subtração do peso pelas forças definidas acima. O peso é:

$$\omega \Delta S \cos \alpha \quad (4)$$

O mesmo princípio se aplica para a rotação da coluna, o torque. O torque aplicado é igual ao momento normal ($w \Delta S r$) multiplicado pelo coeficiente de fricção (μ'). O valor de torque se torna:

$$T = \mu' \omega \Delta S r \sin(\alpha) \quad (5)$$

Onde r é o raio da coluna. Neste caso, não há influência da força axial. O torque pode ser considerado independente da direção da rotação. Como a seção da coluna de perfuração possui um comprimento ΔS , as projeções verticais e horizontais são:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta S \cdot \sin(\alpha) \\ \Delta y &= \Delta S \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

A unidade de massa da coluna de perfuração ou seu peso deve sempre ser corrigido para peso flutuado. O fator de flutuação é dado por:

$$\gamma = 1 - \frac{\rho_{\text{lama}}}{\rho_{\text{coluna de perfuração}}} \quad (7)$$

e a unidade de massa flutuada é dada por:

$$W = \gamma \rho_{\text{coluna de perfuração}} \quad (8)$$

onde $\rho_{\text{coluna de perfuração}}$ refere-se a unidade de peso da coluna no ar. Esta definição somente é válida para a utilização de fluidos de mesma densidade em ambos os lados da coluna de perfuração.

A equação 2, analisada em conjunto com a figura 5 (a), indica que a condição requerida para que haja a descida da coluna de perfuração é $\cos(\alpha) \geq \mu \cdot \sin(\alpha)$, portanto a inclinação máxima para a descida da coluna é dada por:

$$\alpha_{\text{max}} \leq \text{Tan}^{-1}(1/\mu') \quad (9)$$

4.2 Hidrodinâmica ou Lubrificação Fluida

Algumas vezes fluidos são definidos como materiais que não suportam forças cisalhantes. Esta definição não está correta pois é conhecida a resistência de líquidos

viscosos a uma mudança de forma. Esta propriedade de fricção interna, ou viscosidade, é muito importante na lubrificação.

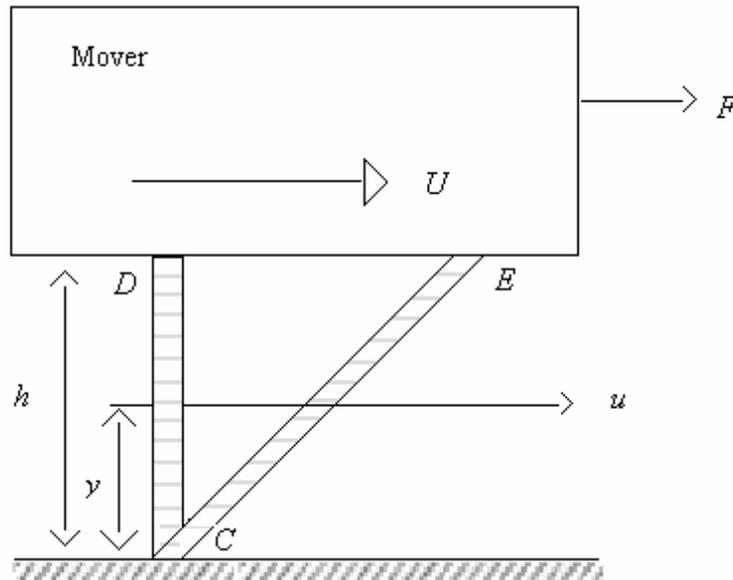


Figura 6 – Diagrama para fluxo viscoso.

A Figura 6 demonstra duas placas paralelas separadas por um filme de espessura h . A placa inferior é fixa enquanto a superior está submetida a uma força horizontal F . Imaginando o filme de óleo dividido em várias camadas aderidas umas as outras, a força F fará com que uma camada deslize sobre a outra. Cada camada está então sujeita a uma tensão cisalhante s , onde $s = F/A$, e A é a área molhada do prato que está se movendo.

Na lubrificação fluida, entre as superfícies de dois corpos há uma película lubrificante. As superfícies estão completamente separadas por um filme contínuo de lubrificante e a resistência à movimentação é dada somente pela viscosidade do lubrificante. Uma idéia da resistência envolvida na rotação de uma haste em um rolamento pode ser obtida de uma forma bem simples, assumindo que o filme de óleo apresenta espessura uniforme ao redor da haste como na figura 7. A tensão cisalhante é dada em função da taxa de cisalhamento por

$$s = \mu \frac{du}{dy}. \quad (10)$$

Supondo que o raio da haste seja r , a espessura do filme de óleo seja igual a folga entre a haste e o rolamento c , em centímetros e o número de revoluções seja N . A velocidade da superfície da haste equivale a $2\pi rN/60$ cm/sec. Neste caso, aceita-se que não exista escorregamento entre o líquido e a superfície sólida de forma que toda a

diferença de velocidade entre o rolamento e a haste seja tomada pelo cisalhamento no fluido lubrificante. Caso deseje-se considerar o filme apresentando pequena espessura, a taxa de cisalhamento no filme é uniforme e igual a $2\pi rN\mu/60c$ dinas/cm², onde c é a folga entre o rolamento e a haste.

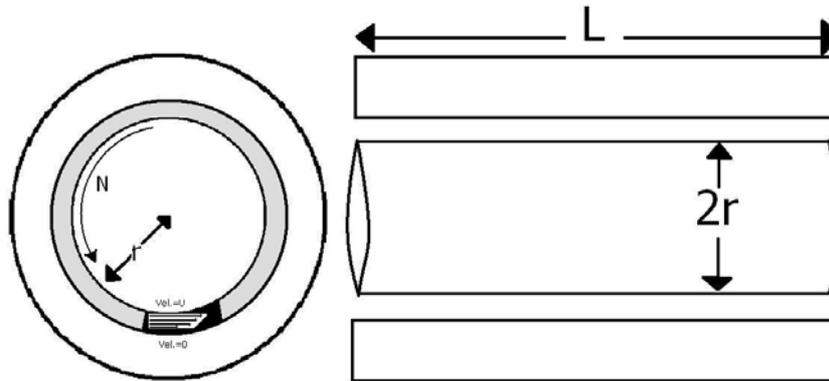


Figura 7 – Rolamento hidrodinâmico de Petroff. A espessura do filme de óleo é constante.

Lembrando que a força cisalhante s equivale a F/A , onde F é a força que gera o movimento da placa superior na figura 6 e A é a área da placa, se o comprimento do rolamento for L , a área sobre a qual esta tensão atua é $2\pi rL$. A força viscosa resultante opera a uma distancia r do centro da haste, assim o torque resistente G é dado por:

$$G = \frac{r \cdot 2\pi r L \cdot 2\pi r N \mu}{60c} \quad (11)$$

$$= \frac{4\pi^2 r^3 L}{60c} N \mu \quad (12)$$

Neste caso considera-se excentricidade nula e μ é a viscosidade do fluido.

Um sistema haste-rolamento completo consiste em uma casca cilíndrica, também conhecida por rolamento, envolvendo completamente uma haste de menor eixo. Considera-se que os eixos da haste e do rolamento sejam paralelos. Existe rotação relativa entre a haste e o rolamento.

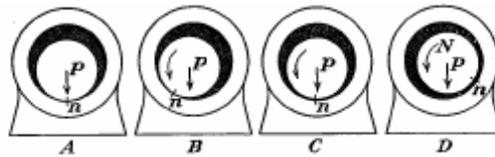


Figura 8 – Diagrama de rolamentos sujeitos a cargas transversais (Norton, 1942).

Devido a carregamentos transversais, a haste move-se excentricamente como mostrado na figura 8. Assim, o filme de óleo que envolve a haste passa a apresentar espessura variável como mostrado na figura 9. Se a extensão deste filme de óleo ao redor da haste for menos que 360° , então será considerado rolamento parcial. O centro do rolamento será chamado de O' e o centro da haste será O . A distância entre estes centros é a excentricidade e será representada por e . A folga radial entre a haste e o rolamento será representada por c . O ângulo Φ é o ângulo a partir do eixo que liga os centros até a linha de ação da carga. O ângulo θ é medido entre qualquer ponto da haste que desejemos considerar ao eixo formado pelos pontos O e O' , na direção de rotação. A espessura do filme de óleo é dada por h , sendo h_n a menor espessura. A velocidade da haste é N , dado em r.p.m., e a velocidade da superfície da haste é $2\pi rN/60$ pol./seg., no sistema de unidades britânico. A configuração do filme é dada por:

$$h = c + e \cos(\theta) \quad (13)$$

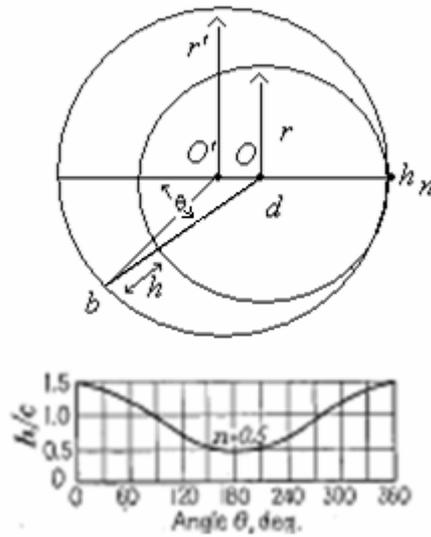


Figura 9 – Variação da espessura do filme em rolamento (Norton, 1942).

As equações apresentadas a seguir foram obtidas a partir do trabalho de Norton (1942). A evidência da fricção na haste é o torque ou momento requerido para manter a haste girando a uma velocidade constante contra a fricção pelo filme de óleo. Segundo Norton, o cálculo do momento é dado pela integral de $Ls_0r^2d\theta$ em 2π , onde s_0 é a força cisalhante exercida pelo óleo na haste.

$$M = \int Ls_0r^2 2d\theta \quad (14)$$

Devido à força transversal, fig.8, a distribuição da pressão no fluido lubrificante passa a variar também de acordo com o ponto da superfície da haste escolhido.

Ao considerando a figura abaixo, temos variações de pressão notadas nas direções x e y.

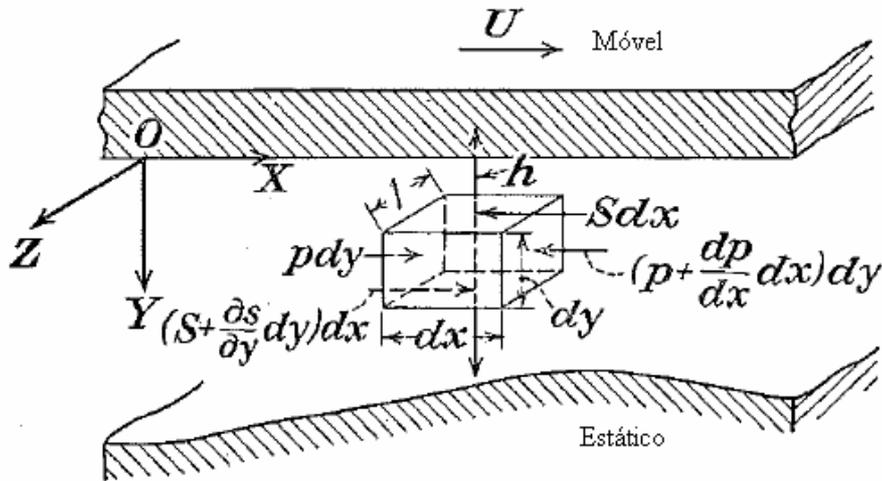


Figura 10 - Fluido em equilíbrio entre duas placas.

para o equilíbrio, temos:

$$p dy + \left(S + \frac{\partial S}{\partial y} dy \right) dx = S dx + \left(p + \frac{dp}{dx} dx \right) dy \quad (15)$$

desenvolvendo esta equação temos:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial S}{\partial y} \quad (16)$$

considerando a equação 10:

$$s = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

temos que:

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Calculando a integral dupla de u em relação a y considerando x constante temos:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} y + C_1 \quad (17)$$

$$e \quad u = 2 \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (18)$$

pela figura 10 notamos que $u=U$ se $y=0$ e $u=0$ se $y=h$. Com isso chegamos a conclusão que:

$$u = \frac{U(h-y)}{h} - \frac{y(h-y)}{2\mu} \frac{dp}{dx} \quad (19)$$

assim, novamente temos:

$$S = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\mu U}{h} - \frac{(h-2y)}{2} \frac{dp}{dx} \quad (20)$$

Considerando Q como o volume de óleo movendo-se em uma seção transversal do filme (plano yz) pela unidade de tempo, o fluxo Q pode ser dado por:

$$Q = \int_0^h u \, dy \quad (21)$$

Pela equação 19 chegamos a:

$$Q = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (22)$$

Qualquer quantidade de fluido entrando em uma porção do filme deve ser igual a quantidade de fluido saindo desta mesma porção. Com isso temos:

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad (23)$$

Pela equação 22:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{U}{2} \frac{dh}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} \right) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{dx} \right) = 6U \frac{dh}{dx} \quad (25)$$

daí:

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu U \left(\frac{U}{h^2} - \frac{C}{h^3} \right) \quad (26)$$

onde C é uma constante de integração.

A partir da equação 20 temos que

$$S_0 = \frac{\mu U}{h} + \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} = \frac{\mu U}{h} + \frac{h}{2r} \frac{dp}{d\theta}, \quad (\text{em } y=0) \quad (27)$$

Daí, substituindo h a partir da equação 13, a equação 27 e a equação 26 temos:

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{\mu U r}{c^2} \left[\frac{6}{(1+n \cos \theta)^2} - \frac{6C}{c(1+n \cos \theta)^3} \right] \quad (28)$$

O aumento de pressão esperado para $\theta=0$ e $\theta=2\pi$ é nulo. Então C é dado por:

$$C = \frac{2c(1-n^2)}{(2+n^2)} \quad (29)$$

Fazendo a substituição de $dp/d\theta$ na equação 27 temos:

$$S_0 = \frac{\mu U}{c} \left[\frac{4}{1+n \cos \theta} - \frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)(1+n \cos \theta)^2} \right] \quad (30)$$

e a equação do momento da haste se torna:

$$M = Lr^2 \int_0^{2\pi} S_0 d\theta \quad (31)$$

$$= \frac{\mu ULr^2}{c} \int_0^{2\pi} \left[\frac{4}{1+n\cos\theta} - \frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)(1+n\cos\theta)^2} \right] d\theta \quad (32)$$

Separando a primeira integral:

$$4 \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(1+n\cos\theta)} = 4 \frac{2\pi}{(1-n^2)^{0.5}} \quad (33)$$

A segunda:

$$\frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(1+n\cos\theta)^2} \quad (34)$$

Que resulta em:

$$\frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)} \cdot \frac{2\pi}{(1-n^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (35)$$

Como resposta temos:

$$M = \frac{\mu ULr^2}{c} \cdot \left[4 \cdot \frac{2\pi}{(2+n^2)\sqrt{1-n^2}} - \frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)} \cdot \frac{2\pi}{(1-n^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (36)$$

Onde

$$C_f = 4 \cdot \frac{2\pi}{(2+n^2)\sqrt{1-n^2}} - \frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)} \cdot \frac{2\pi}{(1-n^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (37)$$

onde C_f é o coeficiente de fricção adimensional.

A maioria dos problemas em rolamentos completos são desenvolvidos com a velocidade em rpm e a carga em libras por polegada ao quadrado em área projetada. A equação operacional para fricção dada por Norton é:

Fricção da haste:

$$F' = \frac{\mu N r \pi}{c} C_f \quad (38)$$

4.3 Rolamentos Parciais e Rolamentos Encaixados

Segundo Norton, um rolamento parcial é aquele em que o filme não envolve completamente a haste. Nestes casos, o filme geralmente envolve menos de 180° . Entenderemos por rolamento parcial o caso em que existe uma distância entre a superfície interior do rolamento e a superfície externa da haste. O caso onde esta distância é nula será considerado rolamento encaixado.

4.3.1 Rolamentos Parciais

A Figura 11 apresenta dois tipos de rolamentos parciais.

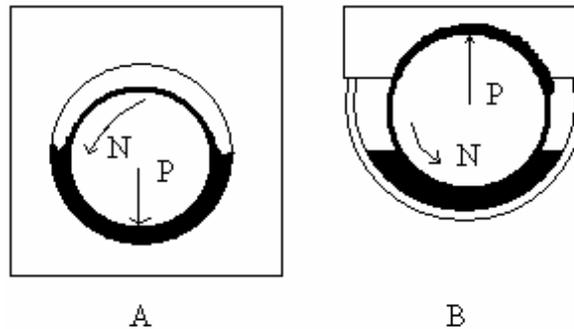


Figura 11 – Rolamentos Parciais. Norton, 1942.

No primeiro caso, o rolamento pressiona a haste de baixo para cima. Deve ser observado que um rolamento completo pode funcionar como um rolamento parcial se não existir óleo suficiente para preencher todo o espaço entre a haste e o rolamento. Na figura B, o rolamento pressiona a haste de cima para baixo. Um diagrama de rolamentos parciais é demonstrado na Figura 12.

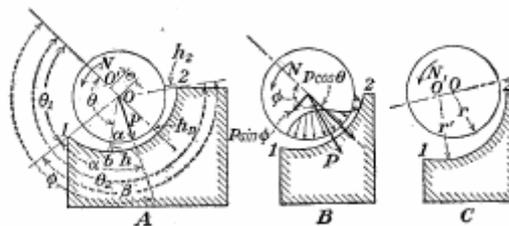


Figura 12 – Diagrama de rolamentos parciais (Norton, 1942).

Sob a ação de uma carga, a haste rotaciona excentricamente, criando um filme não uniforme promovendo a lubrificação. A figura 12 mostra as configurações dos rolamentos parciais. O centro do arco do rolamento é designado por O' e o centro do arco da haste é designado por O . A linha OO' será o eixo de referência e o ângulo θ_1 é medido a partir deste eixo na direção de rotação como indicado até o ponto de entrada. θ_2 é medido a partir do eixo entre os eixos até o ponto de saída e é igual a $\theta_1 + \beta$, onde β é o ângulo da superfície efetiva do rolamento. O ângulo Φ é o ângulo a partir do eixo que liga os centros até a linha de ação da carga e β é o ângulo da entrada até a linha de ação da carga. r será considerado o raio da haste e c será a folga radial. A distância entre os pontos O e O' será a excentricidade e .

A configuração do filme é dada por:

$$h = c + e \cos(\theta) = c(1 + n \cos(\theta)) \quad (39)$$

O valor de n , chamado de atitude, é equivalente a $\frac{e}{c}$.

A menor espessura deste filme ocorrerá no ponto onde o eixo entre os centros interceptam o arco do rolamento. Caso isto não ocorra, a menor espessura será encontrada no ponto de saída (h_2), conforme a figura 12 (C) acima.

Assim, a equação para a menor espessura se torna:

$$h_{12} = c(1 + n \cos(\theta_2)) \text{ ou } h_2 = c(1 - n) \dots\dots\dots(40)$$

O desenvolvimento matemático das equações para um rolamento parcial é similar às equações desenvolvidas para um rolamento completo. Estas equações apresentam a mesma forma devido ao fato de que elas são apenas integradas em limites diferentes. Assim temos:

$$F'' = \frac{\mu N r \pi}{c \cdot 60} C_f \quad (41)$$

Deve-se notar que o fator F'' é definido como força por unidade da área projetada da haste ao invés do arco do rolamento. Assim:

$$F = 2rLF'' \quad (42)$$

Os fatores operacionais para um rolamento parcial em 90° são dados na Figura 13, como função do ângulo θ_1 . Norton desenvolveu estes gráficos a partir de valores tabulados desenvolvidos por Boswall(1932) em seu trabalho “*The Theory of Fluid Lubrication*”.

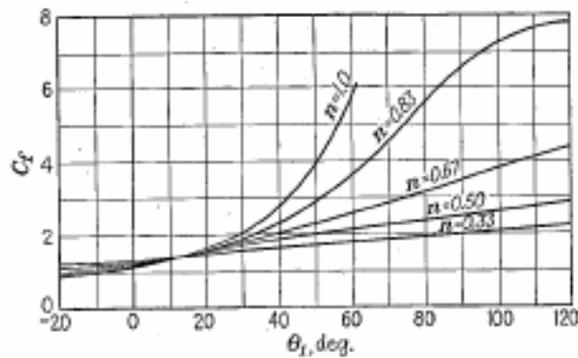


Figura 13 – Fator de fricção para rolamentos a 90° . Norton, 1942.

4.3.2 Rolamentos Encaixados.

Em rolamentos encaixados, a folga entre o rolamento e a haste é nula. A formulação teórica, segundo Norton, é semelhante para cargas, fricção e outras características operacionais. Como c é nulo, a haste está em contato com toda a superfície do rolamento. Mas quando a haste rotaciona, seu centro se ergue e gera um filme de óleo de pequena espessura entre a haste e o rolamento. Para que isto ocorra, é necessário que o rolamento apresente menos de 180° . O formato do filme pode ser descrito substituindo $c = 0$ na equação (12)

$$h = e \cos(\quad) \quad (43)$$

A figura 13 demonstra o gráfico dos valores do coeficiente adimensional de fricção C_f pelo ângulo θ_1 . Equação operacional para fricção em rolamentos encaixados dada por Norton é a seguinte:

$$F'' = \frac{\mu N r \pi}{e 60} C_f \quad (44)$$

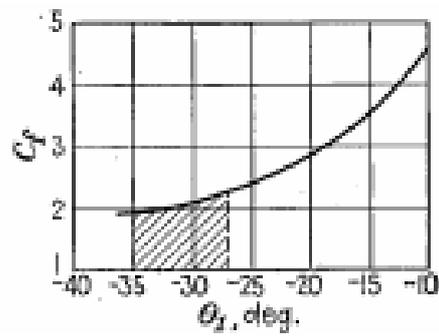


Figura 14 – Fator de fricção para rolamentos encaixados a 90° (Norton, 1942).

5 Simulações

O aumento da camada de cascalho gera um aumento de fricção devido ao fato da coluna de perfuração estar embebida nesta camada, criando uma maior resistência contrária ao seu movimento. Como a força normal ao longo da coluna depende apenas do peso fluído e da geometria do poço, ambos independentes do material do cascalho, um maior fator de fricção é observado.

Foram realizadas simulações na tentativa de correlacionar o aumento da camada de cascalho com o aumento da fricção entre a coluna de perfuração e o poço. O aumento da camada de cascalho está ligado a ineficiência da operação de limpeza do poço. A resposta ao aumento desta camada em forma de aumento do valor do torque da coluna pode ser utilizada como uma ferramenta para a monitoração da limpeza do poço.

Para verificar a correlação entre os valores de fricção e a camada de cascalho foram realizadas duas análises. Na primeira análise, estuda-se a resposta de torque em relação a área aberta ao fluxo de fluido. Esta área é obtida através da área total do poço diminuída da área ocupada pela coluna de perfuração e a camada de cascalho. Considerando uma mesma coluna de perfuração perfurando um poço de mesmo diâmetro e inclinação, a altura da camada de cascalho influencia o valor da área equivalente.

Uma segunda análise é realizada baseada em estudos sobre hastes e rolamentos. Neste estudo pretende-se encontrar uma correlação entre a altura da camada de cascalho e os valores de fricção obtidos. Para alcançar este objetivo, utilizou-se a equação de momento (equação 31) dada por Norton integrando-a em diferentes intervalos definidos pela altura da camada de cascalho. Com isso é possível ver como um aumento na área de contato devido a presença de cascalhos gera um aumento nos valores de fricção.

5.1 Área Equivalente de Fluxo

Para a verificação da interferência da camada de cascalho nos valores de torque e arraste, primeiramente foi proposto que se considerasse uma área equivalente entre o poço aberto e a coluna de perfuração. Esta área equivalente é demonstrada pela Figura 14.

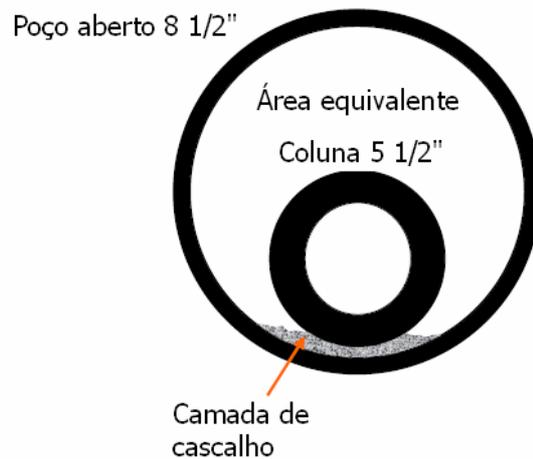


Figura 15 – Desenho esquemático da coluna de perfuração em uma seção horizontal com acúmulo de cascalhos.

As simulações foram realizadas com o uso do programa Wellplan. O Wellplan é um programa desenvolvido pela Landmark, que possibilita a análise das operações realizadas em poços. Foi utilizado o módulo de torque e arraste para a análise de tensões em colunas de perfuração nas operações de perfuração. Este módulo permite uma análise detalhada das forças de torque atuantes na coluna de perfuração, o revestimento ou o liner. O poço considerado apresenta as seguintes configurações:

Tabela 2 - Configuração do poço analisado.

Tipo de Seção	Comprimento (m)	Profundidade (m)	Diâmetro Externo (pol)	Diâmetro Interno (pol)	Peso (ppf)
Tubo de Perfuração	6098,790	6098,790	5,500	4,778	26,330
Heavy Weight	162,000	6260,790	5,000	3,000	49,700
JAR	11,070	6271,860	6,750	2,500	68,850
Heavy Weight	27,000	6298,860	5,000	3,000	51,100
Estabilizador	1,520	6300,380	6,250	2,813	83,270
MWD/LWD	6,400	6306,780	6,750	2,000	161,440
MWD/LWD	5,200	6311,980	6,750	2,165	161,440
MWD/LWD	8,500	6320,480	6,750	2,167	161,440
Estabilizador	1,520	6322,000	6,250	2,813	83,270
Ferramentas Direcionais	6,700	6328,700	6,750	6,625	440,000
Broca	0,300	6329,000	8,500		87,000

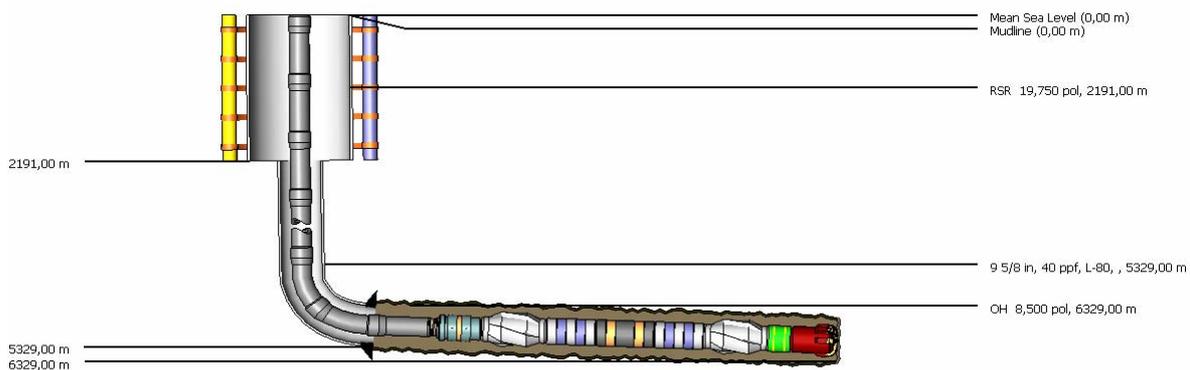


Figura 16 – Coluna de perfuração analisada.

O diagrama da coluna de perfuração analisada é indicado na figura 16 acima. Os coeficientes de fricção utilizados na análise são dados na tabela 3. A inclinação da seção tangente é de 88° , a profundidade do ponto de ganho de ângulo é de 4.054 m e a taxa de ganho de ângulo é de $2^\circ/30$ m.

Tabela 3 – Valores dos fatores de fricção considerados.

Seção	Fator de Fricção
Riser	0,05
Revestimento	0,18
Poço Aberto	0,22

Para cada altura de camada de cascalho foi possível obter um determinado valor para a área equivalente na seção tangente em poço aberto conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Altura do leito e área equivalente para poço aberto.

<i>Altura do leito %</i>	<i>Diâmetro Equivalente (pol²)</i>
5	8,48390
10	8,45346
15	8,41244
20	8,36170
30	8,23079

Considerou-se esta área aberta ao fluxo como área equivalente entre o poço aberto e a coluna de perfuração. Com isso foi possível realizar a simulação considerando uma determinada altura da camada de cascalho e obter os valores de torque correspondentes.

O programa Wellplan considera, para os cálculos de torque, a equação:

$$G = F_N r \mu' \frac{A'}{V'} \quad (45)$$

onde F_N é a força normal, r é o raio da coluna de perfuração, A' é a velocidade angular e V' é a velocidade resultante da coluna de perfuração. A velocidade resultante é dada considerando as velocidades de subida e de descida da coluna e a velocidade U gerada pela rotação da coluna.

A equação considerada pelo Wellplan não considera o diâmetro d do poço, por este motivo, foi necessário realizar a simulação alterando os valores do raio da coluna de perfuração para que fosse possível obter respostas de acordo com a área equivalente de fluxo.

5.2 Resultados

Os resultados deste experimento foram obtidos através de uma mudança no raio da coluna de perfuração, de forma a se conseguir estabelecer a área equivalente desejada entre a coluna e o poço aberto, mantendo o seu peso linear. A simulação foi realizada com o uso do programa *Wellplan*, da *Landmark*. Os resultados apontados pelo programa estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 5 – Resultado dos valores de torque para a operação de perfuração.

<i>Profundidade Medida (m)</i>	<i>Torque 0% (lbf*pé)</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>
		6.329,0	2.500	2.500	2.500	2.500
5.395,79	8.784,3	9.172,5	9.173,6	9.175,3	9.176,8	9.181,4
4.391,49	13.829,1	14.829,3	14.832,1	14.836,3	14.840,3	14.852,1
3.396,33	14.413,7	15.477,4	15.480,4	15.484,8	15.489,2	15.501,7
2.392,04	14.413,7	15.477,4	15.480,4	15.484,8	15.489,2	15.501,7
1.396,88	14.413,7	15.477,4	15.480,4	15.484,8	15.489,2	15.501,7
392,59	14.413,7	15.477,4	15.480,4	15.484,8	15.489,2	15.501,7
0	14.413,7	15.477,4	15.480,4	15.484,8	15.489,2	15.501,7

Os resultados indicam um aumento nos valores de torque conforme diminui-se a área equivalente de fluxo de fluido. A diferença entre os valores de torque para um aumento de altura da camada de cascalho equivalente a 5% é muito pequena. Uma comparação entre os resultados para as alturas de 10% e 5% indica um aumento nos valores de torque de aproximadamente 0,2% . Esta diferença pode ser considerada irrisória e dificilmente seria percebida durante a operação como um indicativo de mudança nas condições do poço.

Esta análise é falha pois o que ocorre na realidade, é um aumento do contato entre a coluna de perfuração e o poço através da camada de cascalho, que nada mais é do que pequenos pedaços da rocha, que se depositam ao redor da coluna. O aumento do diâmetro da coluna de perfuração não necessariamente irá corresponder ao aumento real do contato.

Pela tabela 5 também é possível observar que acima da profundidade medida de 3.396,33m os valores de torque permanecem constantes. Isto se dá devido ao fato de que o ponto de ganho de ângulo está a 4054m de profundidade. Até este ponto, a coluna de perfuração não apresenta inclinação e, teoricamente, ela está posicionada no centro do poço, sem que haja contato com a parede. Como o contato entre a coluna e o poço é nulo, não há o surgimento de forças friccionais até 4054m de profundidade.

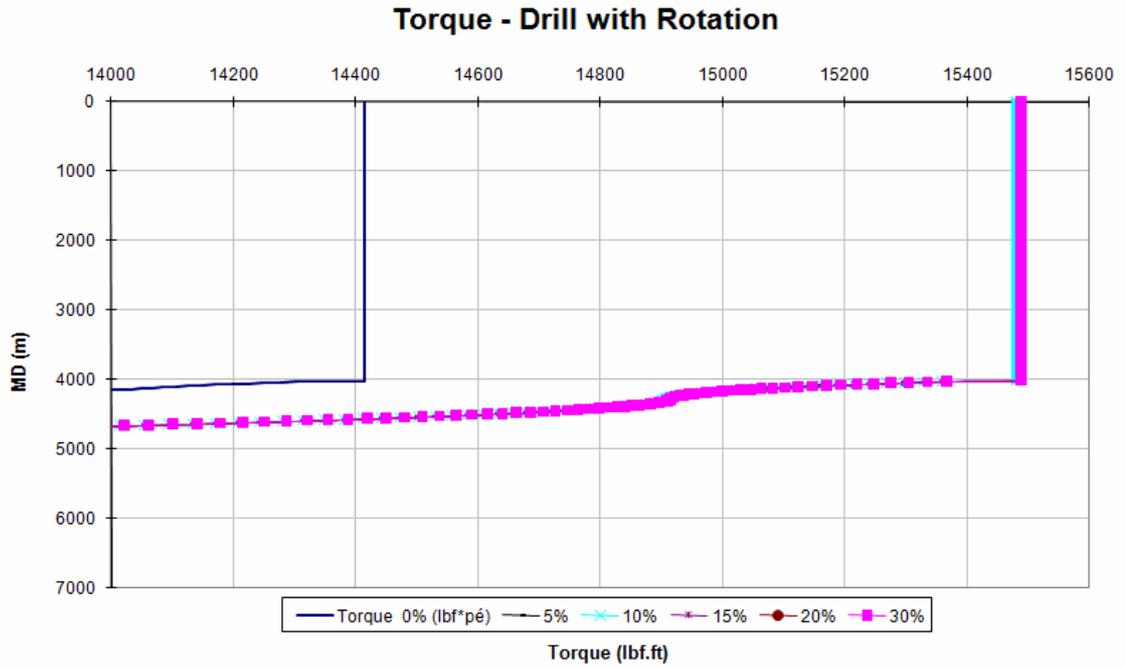


Figura 17 – Gráfico de torque para as diferentes alturas da camada de cascalho.

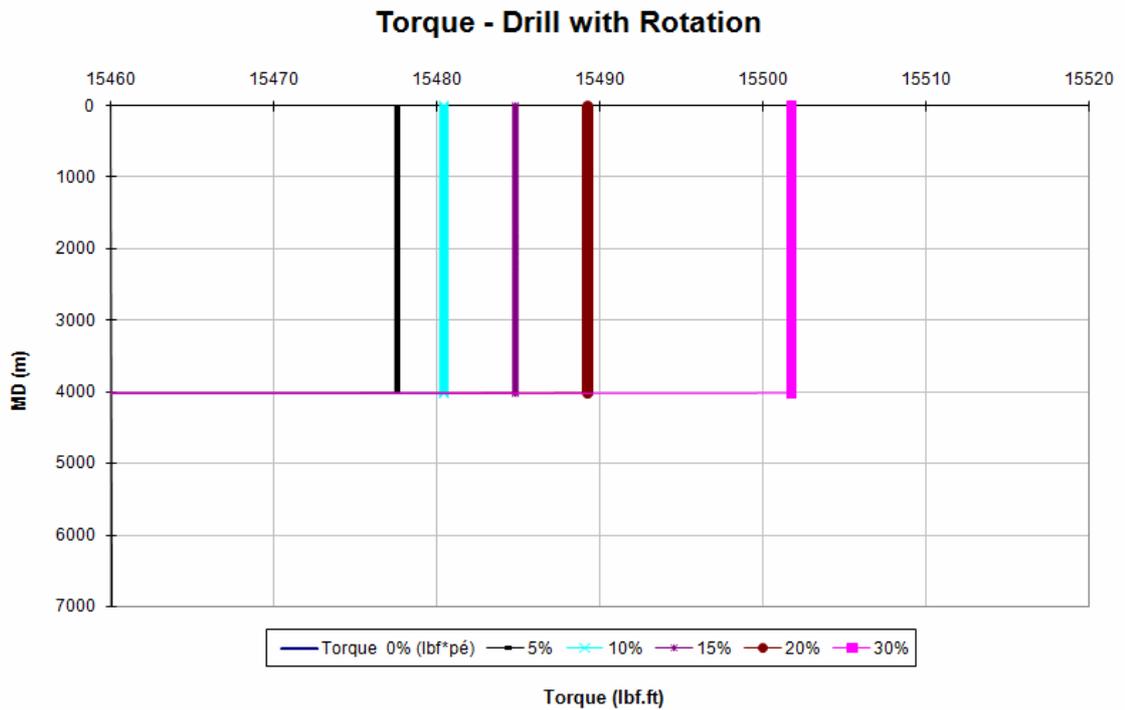


Figura 18 – Gráfico de torque detalhado para as diferentes alturas da camada de cascalho.

5.3 Haste e Rolamento

Para a segunda simulação, será resolvida a equação do momento já proposta por Norton (1942). Equações 31 e 32:

$$M = Lr^2 \int_0^{2\pi} s_0 d\theta \quad (31)$$

$$= \frac{\mu ULr^2}{c} \int_0^{2\pi} \left[\frac{4}{1 + n \cos \theta} - \frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)(1+n \cos \theta)^2} \right] d\theta \quad (32)$$

de forma que os valores limites de θ sejam determinados a partir da altura da camada de cascalho. Anteriormente, consideramos o ângulo θ como o ângulo entre o eixo formado pelos centros O e O' e qualquer ponto que desejemos considerar na haste. Seu limite inferior era de valor 0 e o superior variava de 0 a 2π . Agora seu ângulo inferior será dado pelo ponto onde ocorre o primeiro toque na camada de cascalho e o inferior será considerado como o último ponto a tocar na camada, conforme a figura 19:

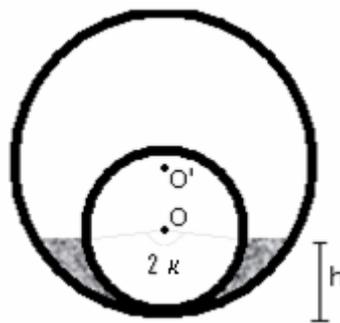


Figura 19 – Desenho esquemático da coluna de perfuração e a camada de cascalho.

O cálculo do momento já foi desenvolvido anteriormente para 2κ variando de 0 a 2π . Com o auxílio do programa *Mathematica*, foi possível integrar a equação variando a faixa de valores do ângulo κ .

Da equação do momento podemos notar que o valor do C_f é proporcionalmente dependente dos limites de κ . Para uma mesma situação de interação entre a coluna de perfuração e o poço aberto, os valores de μ , U , r , L e c são constantes. Quanto maior a altura h da camada de cascalhos, maior a faixa de integração e maior o valor do C_f .

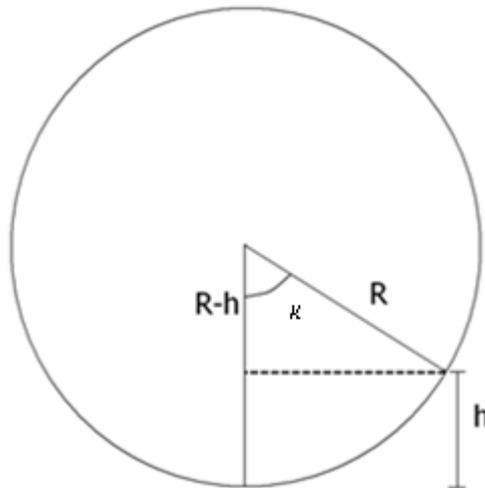


Figura 20 – Diagrama para o cálculo de correlação entre a altura da camada e o raio da coluna de perfuração.

Da Figura 20, acima temos:

$$\kappa = \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right) \quad (46)$$

O primeiro valor inferior de θ na integral é obtido ao resolvermos $\pi - \kappa$. O valor superior é dado por $\pi + \kappa$.

$$M = Lr^2 \int_{\pi-\kappa}^{\pi+\kappa} s_{\theta} d\theta \quad (47)$$

$$= \frac{\mu U L r^2}{c} \int_{\pi-\kappa}^{\pi+\kappa} \left[\frac{4}{1+n\cos\theta} - \frac{6(1-n)^2}{(2+n^2)(1+n\cos\theta)^2} \right] d\theta \quad (48)$$

As alturas da camada de cascalho analisadas são de 5%, 10%, 15% e 20%. A coluna de perfuração simulada possui um diâmetro de 5 ½ polegadas e o poço apresenta 8 ½ pol. A relação dos ângulos de integração com as alturas das camadas de cascalho é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores dos ângulos inferiores e superiores para a integração.

Altura (h) %	Ângulo varrido (2κ)	κ inferior	κ superior
5	0,791398442	2,745893432	3,537291875
10	1,126761198	2,578212054	3,704973253
15	1,389599829	2,446792739	3,836392568
20	1,61610108	2,333542114	3,949643193
25	1,820277085	2,231454111	4,051731196
30	2,0093474	2,136918954	4,146266353

5.4 Resultados

O objetivo desta análise é correlacionar os valores da constante adimensional C_f com a altura da camada de cascalho. Isto foi possível ao resolver as integrais da equação de momento para as diferentes faixas de ângulos selecionadas de acordo com a altura da camada de cascalho, através do uso do programa *Mathematica*. Assim, foi possível estabelecer os valores de C_f para cada altura de camada de cascalho analisada. Os resultados apontados pelo programa estão dispostos na Figura 21.

Pelo gráfico é possível notar que os valores de C_f aumentam de acordo com as diferentes alturas da camada de cascalho. A excentricidade da coluna de perfuração também é considerada na correlação através da atitude n . Para uma mesma coluna de perfuração operando em uma mesma situação onde os valores das variáveis μ , U , r , n e L são os mesmos, o surgimento da camada de cascalho interfere nos valores de fricção obtidos. A altura da camada de cascalho irá definir o intervalo de integração da equação 47. Quanto maior a altura da camada de cascalho, maior o intervalo entre os ângulos e maior o valor encontrado de C_f . Assim, é possível concluir que os valores do momento e da fricção F'' da coluna de perfuração aumentam de acordo com a deposição da camada de cascalho, da área de contato entre elas e da excentricidade da coluna.

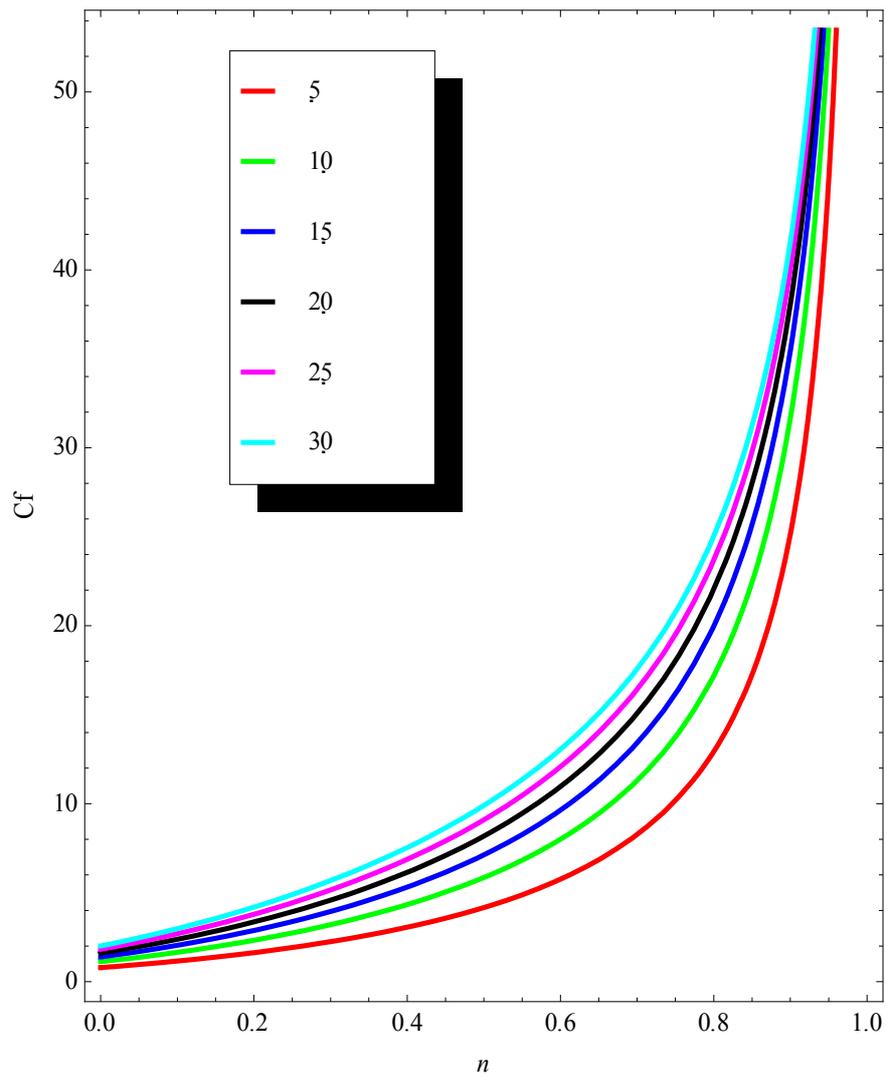


Figura 21 – Gráfico relacionando C_f e a atitude n .

6 CONCLUSÃO

Diferenças entre os valores de torque medidos durante as operações no poço e os valores de torque simulados para estas mesmas operações indicam uma possível alteração nas condições de poço. A formação da camada de cascalho ao redor da coluna de perfuração devido a uma operação de limpeza de poço ineficiente provoca uma alteração nos valores de torque da coluna. Esta alteração em termos de torque pode ser utilizada como uma ferramenta para a monitoração da operação de limpeza de poços.

Para definir uma correlação entre o surgimento da camada de cascalhos e o aumento nos valores de fricção para a coluna de perfuração, foram realizadas duas análises neste trabalho. A primeira análise considera uma área equivalente de fluxo de fluido de perfuração formada pelo espaço anular do poço aberto, sendo descontadas a camada de cascalho e a coluna de perfuração. Uma segunda análise é realizada através de estudos de fricção entre hastes e rolamentos na presença de fluidos lubrificantes. Considerou-se o peso como a força transversal responsável pela excentricidade da coluna de perfuração *e*.

Através da primeira análise, obteve-se uma resposta de aumento para o valor de torque conforme ocorria aumento da altura da camada de cascalhos. Ao se estabelecer um valor de torque para cada altura de camada de cascalho, pode-se obter, a partir das respostas de torque em campo, uma perspectiva da altura da camada de cascalho depositada. Porém, a pequena diferença entre os valores de torque para as diferentes alturas, torna difícil sua associação, impossibilitando a determinação da altura a partir do experimento realizado. Além disso, existem dúvidas relacionadas à segurança de seus resultados. A análise é realizada considerando como fator principal a área de fluxo equivalente *e*, para isso, usou-se como recurso o aumento do diâmetro da coluna de perfuração mantendo seu peso linear. Esta análise não verifica corretamente a área de contato entre a coluna de perfuração e a camada de cascalho sendo falha no estudo do surgimento de forças de fricção.

A segunda análise foi realizada considerando, ao invés da área de fluxo, o contato entre a coluna de perfuração e a camada de cascalho. Esta área de contato também é função da altura da camada, e com isso pode-se estabelecer um ângulo de varredura para a coluna de perfuração. A partir da integração da equação de momento

considerando-se este ângulo, foi possível obter uma correlação entre o momento da coluna de perfuração e a altura da camada de cascalho. Os resultados obtidos indicam que quanto maior o ângulo de varredura, ou seja, a altura da camada de cascalho, maior o valor do momento esperado e da fricção da coluna, indicadas pelas equações de momento e fricção de Norton (1942).

Foi possível indicar os valores esperados do coeficiente C_f para cada altura da camada de cascalhos e assim demonstra-se que é possível o caminho inverso, ou seja, é possível realizar uma análise levando em consideração as condições de operação do poço, viscosidade da lama, tensão da coluna de perfuração, tipo de rocha sendo perfurada, entre outros e monitorar a qualidade da limpeza do poço pela formação de camada de cascalhos através do acompanhamento dos valores de torque da coluna de perfuração.

Com o auxílio do programa *Mathematica*, foi possível notar graficamente a relação entre o coeficiente de fricção adimensional C_f , a altura da camada de cascalho formada e a excentricidade da coluna de perfuração através da atitude n .

È possível utilizar a monitoração de torque na coluna de perfuração como uma ferramenta para a análise da operação de limpeza de poços inclinados. Ao surgir a deposição da camada de cascalhos, observa-se uma resposta dos valores de torque ao aumento da área de contato entre o poço e a coluna de perfuração. Outras condições de poço podem levar ao aumento dos valores de torque esperados, como por exemplo, inchamento de argilas, prisão diferencial e tortuosidades entre outros. Por isso é preciso que seja feita uma análise detalhada das condições de operação para que se possa ter uma maior segurança na análise dos dados.

7 REFERÊNCIAS

1. PILEHVARI, A.A., J.J. AZAR, J.J., AND SHIRAZI, S.A.,1999. “State-of-the-Art Cuttings Transport in Horizontal Wellbores” ,SPE Drill. & Completion, Vol. 14, No. 3.
2. AADNOY, B.S., STAVANGER, U., AND KETIL ANDERSEN, 1998. “Friction Analysis for Long-Reach Wells”, IADC/SPE 39391, presented at the 1998 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, T.X.
3. RAE, G., LESSO, W.G., AND SAPIJANSKAS, M., 2005. “Understanding Torque and Drag: Best Practices and Lessons Learnt from the Captain Field’s Extended Reach Wells”, SPE/IADC 91854, presented at SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, 23-25.
4. BRETT, J.F., BECKETT, A.D., HOLT, C.A., AND SMITH, D.L.,1987. “Uses and Limitations of a Drillstring Tension and Torque Model to Monitor Hole Conditions”, SPE 16664, presented at SPE Conf.
5. YU,M., MELCHER, D., TAKACH, N., MISKA, S.Z., AHMED, R.,2004. “ A New Approach to Impruve Cuttings Transport in Horizontal and Inclined Wells”, SPE 90529, presented at the SPE Conf.,26-29.
6. MASUDA, Y., DOAN, Q., OGUZTORELI, M., NAGANAWA, S., YONEZAWA, T., KOBAYASHI, A., AND KAMP, A., 2000. “Cuttings Transport Velocity in Inclined Annulus: Experimental Studies and Numerical Simulation”, SPE/PS-CIM 65502, presented at the 2000 SPE/ Petroleum Society of CIM International Conference on Horizontal Well Technology, Calgari, Alberta, Canada.
7. K&M TECHNOLOGY GROUP, 2003. “Drilling design and impletation for extended reach and complex wells”.

8. PARKER, D.J.1987. "An experimental study of the effects of hole washout and cuttings size on annular hole cleaning in highly deviated wells". MS. Thesis, University of Tulsa, Tulsa Oklahoma.
9. NORTON A.E., 1942. "Lubrication". McGraw-Hill Company, Inc. New York and London.
10. JOHANCSIK C.A., FRIESEN, D.B.,1984. "Torque and Drag in Directional Wells–Prediction and Measurement".Journal of Petroleum Technology. Volume 36. Number 6.
11. IAIN R.C., MINH C., HENDRICKS A., WOODFINE M., STACEY B., DOWNTON N.,1999. "Field Data Supports the Use of Stiffness and Tortuosity in Solving Complex Well Design Problems".SPE Paper 52819, presented at SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands.
12. . SHEPPARD C., WICK C., BURGESS T.,1987. "Designing Well Paths To Reduce Drag and Torque". Spe Paper 15463. SPE Drilling Engineering Journal. Volume 2, Number 4.
13. PAYNE M.L., ABBASSIAN F.,1997. "Advanced Torque-and-Drag Considerations in Extended-Reach Wells". SPE Drilling & Completion Journal. Volume 12, Number 1.
14. BOSWALL R.O., AND BRIERLEY J.C., 1932. " The Film Lubrication of the Journal Bearing", Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 122.