

CLÁUDIO CAMPOS DE ABREU

**ESTUDO DOS PARÂMETROS QUE AFETAM O TRANSPORTE
DE CASCALHOS EM POÇOS DIRECIONAIS**

São Paulo

2013

CLÁUDIO CAMPOS DE ABREU

**ESTUDO DOS PARÂMETROS QUE AFETAM O TRANSPORTE
DE CASCALHOS EM POÇOS DIRECIONAIS**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Petróleo do curso de graduação do Departamento
De Engenharia de Minas e Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Siguemasa Iramina

São Paulo

2013

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais, irmãos e parentes que sempre me deram força e incentivo para que eu conseguisse ingressar na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e que pudesse concluir esta etapa da minha vida com sucesso.

Agradeço aos meus professores pelo apoio, aprendizado e oportunidades que me favoreceram durante todos esses anos de universidade, principalmente aos professores do Departamento de Minas e Petróleo que foram fundamentais para a minha formação na área em que desejo atuar profissionalmente e em especial ao Professor Doutor **Wilson Siguemasa Iramina**, que foi o meu orientador para a elaboração do meu trabalho final de formatura.

Aos meus colegas de faculdade que pude sempre contar com a ajuda e participação em todos esses anos, pois eles também fizeram parte da minha formação acadêmica e pessoal, tornando-os fundamentais nessa jornada.

Aos meus amigos que conheci no cursinho, pois também foram fundamentais desde o ingresso à Universidade e durante a trajetória que nós temos percorrido por todos esses anos.

E a todos os outros que de certa forma contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta conquista.

RESUMO

O transporte de sólidos na operação de limpeza de poços é um procedimento fundamental durante a perfuração de poços de petróleo, sendo determinante para que a atividade possa prosseguir sem problemas associados. Em poços direcionais deve-se ter uma atenção especial devido à possibilidade de formação de leito na parede inferior do poço. Para que a eficiência deste procedimento atenda às necessidades é preciso que seja estudada a influência dos parâmetros envolvidos, sendo este o propósito do trabalho. Foi utilizada uma configuração base para a operação de limpeza e cada um dos parâmetros foi analisado separadamente variando-os em intervalos correspondentes aos encontrados nas atividades em campo por meio de um modelo empírico desenvolvido para o estudo de poços deste tipo. Os dados obtidos foram exibidos graficamente utilizando como parâmetros de referência a razão de transporte em função da velocidade anular crítica. Os resultados mostraram que o parâmetro relacionado às propriedades reológicas dos fluidos de perfuração possui um grau de influência principal para o transporte destes sólidos, tendo como influência secundária a densidade e as dimensões do espaço anular. Por fim, com os resultados obtidos neste trabalho foi desenvolvida uma nova configuração e então foi comparada com a proposta inicial apresentando uma melhoria bastante significativa na eficiência da operação na simulação computacional.

Palavras-chave: transporte de sólidos, limpeza de poços, parâmetros, velocidade anular crítica.

ABSTRACT

The solids transport in the hole cleaning operations is an essential procedure during the oil well drilling activities, being decisive to the activity can proceed without problems associated. In directional wells must have a special attention due the possibility of solid layer formation on the wall lower side. To the efficiency of this procedure attends these requirements is needed it was studied the influences of these parameters, being the purpose of this work. It was used a default configuration to the hole cleaning operation and each of the them was analyzed apart varying them in specific ranges found in oil field activities through an empiric model developed to study these kinds of wellbores. The obtained data were showed graphically using as reference parameters the transport ratio dependent of the critical annular velocity. The results showed up the parameter related to the drilling fluid reologic properties had the main influence to the solids transportation, having as secondary influence the fluid density and the annular dimensions. Lastly, with the obtained results at this work it was developed a customized configuration and then it was compared with the default showing a very significant improvement on the efficiency of the computational simulation operation.

Keywords: solids transport, hole cleaning, parameters, critical annular velocity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Exemplo de formação de camada de cascalhos no poço.....	14
Figura 4.1 – Exemplo de janela operacional em um programa de perfuração	20
Figura 4.2 – Diagrama de corpo livre dos sólidos formados.....	21
Figura 4.3 – Gráfico representativo do comportamento dos tipos de fluidos.....	22
Figura 4.4 – Exemplo de poço direcional revestido com liner	23
Figura 4.5 – A. Poço direcional por motivos geográficos e exploração em diversas posições. B. Múltiplos poços em campo offshore.	24
Figura 4.6 – Esquematização do transporte de cascalhos e sua velocidade de escorregamento no fluxo.	26
Figura 4.7 – Configuração dos quatro tipos de escoamento em poços direcionais.....	27
Figura 5.1 – Resultados para os diversos tipos de fluidos de perfuração	31
Figura 5.2 – Resultados das inclinações do poço para o fluido 1.....	32
Figura 5.3 – Resultados das inclinações do poço para o fluido 3.....	32
Figura 5.4 – Resultados para as densidades do fluido 1.....	33
Figura 5.5 – Resultados para as densidades do fluido 3.....	34
Figura 5.6 – Resultados para diferentes tamanhos de sólidos para o fluido 1.....	35
Figura 5.7 – Resultados para diferentes tamanhos de sólidos para o fluido 3.....	35
Figura 5.8 – Resultados obtidos para dimensões do anular com o fluido 1.....	36
Figura 5.9 – Resultados obtidos para dimensões do anular com o fluido 3.....	37
Figura 5.10 – Comparação dos parâmetros utilizados na configuração base.....	38
Figura 5.11 – Comparação dos programas de limpeza adotados	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Configuração base para os cálculos da limpeza de poço.....	30
Tabela 5.2 – Dados dos programas de limpeza de poços Base e o Atual.....	39
Tabela 8.1 – Dados dos fluidos utilizados.....	46
Tabela 8.2 – Resultados para os fluidos utilizados.....	46
Tabela 8.3 – Resultados para as diferentes inclinações do poço para o fluido 1.....	46
Tabela 8.4 - Resultados para as diferentes inclinações do poço para o fluido 3	47
Tabela 8.5 - Resultados para as diferentes densidades do fluido 1	47
Tabela 8.6 - Resultados para as diferentes densidades do fluido 3	47
Tabela 8.7 - Resultados para os diferentes tamanhos de sólido para o fluido 1	47
Tabela 8.8 - Resultados para os diferentes tamanhos de sólido para o fluido 3	48
Tabela 8.9 - Resultados para as diferentes dimensões do anular para o fluido 1	48
Tabela 8.10 - Resultados para as diferentes dimensões do anular para o fluido 3	48
Tabela 8.11 – Resultados das configurações antes e após o estudo dos parâmetros.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_{an} : Área do espaço anular, em ft^2

C_{ang} : Fator de correção devido à inclinação do poço

C_{size} : Fator de correção devido o tamanho do cascalho

C_{mwt} : Fator de correção devido a densidade do fluido de perfuração

D_H : Diâmetro do poço, em in.

D_{op} : Diâmetro externo do drillpipe, em in.

d_p : Diâmetro do cascalho, em in.

Q : Vazão volumétrica de fluido, em gpm

ROP : Taxa de penetração da broca, em ft/h

R_t : Taxa de transporte

\bar{v}_{Cr} : Velocidade de elevação dos cascalhos crítica, em ft/min

\bar{v}_{Cs} : Velocidade média de escorregamento dos cascalhos crítica, em ft/min

v_{Cs} : Velocidade de escorregamento dos cascalhos crítica, em ft/min

\bar{v}_s : Velocidade de escorregamento dos cascalhos, em ft/min

$\overline{v_{sa}}$: Velocidade de escorregamento dos cascalhos axial, em ft/min

$\overline{v_{sr}}$: Velocidade de escorregamento dos cascalhos radial, em ft/min

\bar{v}_{Can} : Velocidade média anular crítica, em ft/min

γ_m : Densidade do fluido de perfuração, em ppg

θ : Inclinação do poço, em graus

μ_a : Viscosidade aparente, em cp

μ_p : Viscosidade plástica do fluido de perfuração, em cp

τ_y : Ponto de escoamento do fluido de perfuração, em lbs/100ft²

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Reologia do fluido	14
3.2 Taxa de fluxo no anular.....	15
3.3 Tamanho dos sólidos	16
3.4 Densidade do fluido.....	16
3.5 Viscosidade.....	17
3.6 Modelos teóricos	17
3.7 Integração de estudos em laboratório e experiências em campo.....	19
4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO TRANSPORTE DE CASCALHOS.....	19
4.1 Densidade	19
4.2 Influência dos Sólidos	20
4.3 Propriedades reológicas dos fluidos	21
4.4 Dimensões do anular	22
4.5 Inclinação do poço.....	23
4.6 Taxa de Penetração.....	24
4.7 Velocidades atuantes no transporte de sólidos	25
4.7.1 Velocidade no anular.....	25
4.7.2 Velocidade de escorregamento das partículas.....	25
4.7.3 Velocidade de transporte.....	26
4.7.4 Razão de Transporte.....	27
5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	28
5.1 Recursos utilizados neste trabalho.....	28
5.2 Desenvolvimento do estudo.....	29
5.3 Condições de contorno do problema	29
5.4 Avaliação da influência dos parâmetros	30
5.4.1 Propriedades Reológicas dos fluidos.....	30
5.4.2 Inclinação do poço	31
5.4.3 Densidade do fluido	33
5.4.4 Tamanho das partículas.....	34

5.4.5 Dimensões do Anular	36
5.4.6 Sumário dos efeitos dos parâmetros operacionais.....	38
5.4.7 Configuração otimizada de um programa de limpeza de poços	39
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
7 CONCLUSÃO	41
8 BIBLIOGRAFIA.....	43
9 APÊNDICE A – Tabelas Complementares.....	46

1 INTRODUÇÃO

Os registros mais antigos de perfuração de poços datam de civilizações que deixavam cair uma ferramenta pesada de perfuração para fragmentar a rocha, chamada de perfuração percussiva e o primeiro uso intencional de fluidos no processo de perfuração.

Neste caso o fluido era a água, que amolecia a rocha facilitando a penetração e auxiliando na remoção de pedaços pulverizados de rocha e garantir o corte mais limpo da broca de perfuração. Mais tarde foi observado que a água era bastante eficiente em levantar e retirar os fragmentos resultantes do corte para fora do poço. Estava estabelecido o princípio do uso de fluidos móveis para remover os fragmentos. A água podia ser bombeada por dentro das hastes chegando ao fundo e assim carregar os fragmentos e retornando à superfície através do espaço entre a haste e a parede do furo. Este é o procedimento padrão utilizado até hoje. À medida que os poços vão ficando cada vez mais profundos, os fluidos de perfuração vão se tornando mais importantes, servindo para um grande número de objetivos e resolvendo diversos problemas que variam de local para local.

Na indústria do petróleo, as sondas para as operações de perfuração geram custos bastante expressivos conforme a necessidade, tamanho e o tempo de uso. Se uma sonda tiver a capacidade de retirar os cascalhos com uma taxa de transporte superior as outras, então a empresa responsável pela tecnologia terá suas sondas requisitadas pelas operadoras, preferencialmente. Dessa forma, elas serão cotadas em relação à capacidade de executar o serviço com maior desempenho e menor tempo de operação resultando em menores custos quando utilizadas.

Quando os resultados de pesquisa em transporte de cascalhos e experiência em campo são integrados num programa de perfuração, os problemas de limpeza de poços são evitados e uma excelente performance na perfuração é desenvolvida. Contudo, a adoção de novas técnicas traz consigo, frequentemente, novos problemas operacionais a serem resolvidos.

2 OBJETIVOS

Neste trabalho serão discutidos os diversos parâmetros envolvidos no transporte de sólidos na perfuração de poços direcionais e horizontais, com o intuito de observar o grau de influência de cada um deles separadamente, por meio de modelos empíricos desenvolvidos por diversos pesquisadores na área. Estes modelos serão analisados de maneira computacional.

Em seguida os resultados obtidos serão comparados para que possa ser determinada qual seria a melhor alternativa na execução de um programa de limpeza de poços em campo, respeitando os limites operacionais para garantir a segurança no processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos foram realizados sobre o transporte de cascalhos em poços de petróleo.

O problema de transporte de cascalhos em poços verticais tem sido estudado por muitos anos e muitos autores conduziram estudos experimentais da capacidade de carregamento de sólidos do fluido de perfuração. Willians e Bruce estavam entre os primeiros a reconhecerem a necessidade de estabelecer o mínimo de velocidade anular requerida para elevar os cascalhos. Em 1951, eles relataram os resultados a partir de um extenso trabalho realizado através de medidas em laboratório e de campo na capacidade de transporte da lama. Antes do trabalho deles, o mínimo de velocidade anular geralmente usada na prática era algo em torno de 200 ft/min. Com o resultado do trabalho desenvolvido por eles, um valor próximo a 100 ft/min, gradualmente foi estabelecido. Experimentos mais recentes executados por Sifferman e Becker indicam que enquanto 100 ft/min é o mínimo necessário quando o fluido de perfuração é água, uma velocidade anular mínima de 50 ft/min poderia desenvolver o transporte dos cascalhos de maneira satisfatória para um fluido de perfuração comum (Iramina, W. S., 2011).

Mitchell, R. F.(2007)A eficiência do transporte em poços verticais é usualmente avaliada pela determinação da velocidade de *settling* (assentamento) ou também chamada de *slip* (escorregamento), a qual depende do tamanho da partícula, densidade e forma, da reologia do fluido e as dimensões do espaço anular entre o furo e a coluna de perfuração.

Muitos autores propuseram correlações empíricas para estimar a velocidade de escorregamento dos cascalhos durante operações de perfuração rotativa.

Enquanto que estas correlações ainda não puderam fornecer resultados extremamente precisos para este tipo de escoamento complexo, elas geram informações valiosas para a seleção de propriedades dos fluidos de perfuração e condições operacionais de bombeamento. As correlações de Moore, Chien e Walker & Mayes atingiram uma aceitação mais ampla (Iramina, W.S., 2012).

Desde o início da década de 80, os estudos de transporte de cascalhos têm sido focados em poços direcionais e um extenso acervo em ambos os tipos de trabalhos, experimentais e de modelamento, puderam ser observados. Trabalhos experimentais de transporte de cascalhos para poços direcionais foram conduzidos, usando-se fluxos em

loops na Universidade de Tulsa (EUA) e em outros lugares. Diferentes mecanismos, nos quais aplicados a diferentes intervalos de ângulo, determinam a altura do depósito de sólidos e concentrações dos mesmos no anular como funções de parâmetros operacionais (taxa de fluxo e taxa de penetração), configurações do poço (profundidade, ângulo do furo, tamanho do furo ou do diâmetro interno do revestimento e tamanho dos tubos), propriedades dos fluidos (densidade e reologia), características dos cascalhos (densidade, tamanho, porosidade do depósito e ângulo da precipitação), excentricidade da coluna e velocidade de rotação (Mitchell, R. F., 2007).

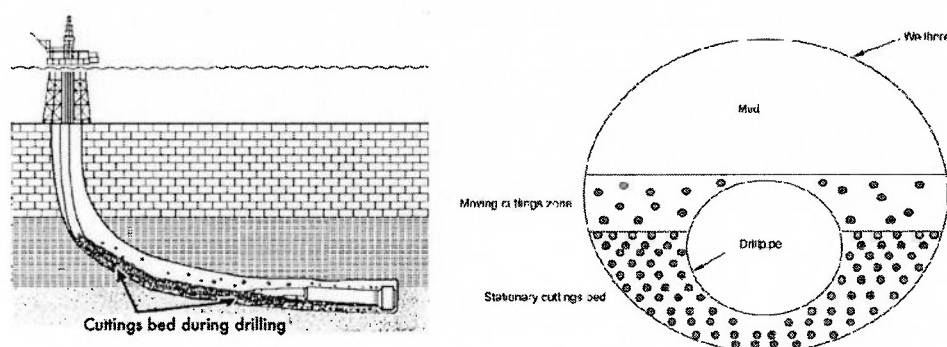


Figura 3.1 – Exemplo de formação de camada de cascalhos no poço.

(Fonte: Petroleum Engineering Handbook Vol II, Mitchell R. F., 2006)

A seguir foi realizada uma compilação de todos os resultados obtidos por alguns autores renomados na área e suas respectivas descobertas e comprovações de seus modelos.

3.1 Reologia do fluido

Piggott (1941) foi o primeiro a publicar um estudo do escoamento de fluido em tubos, poços e fossos de lama. Ele estudou a velocidade terminal de assentamento de partículas, com a aplicação da Lei de Stokes para o escoamento laminar e a lei de Rettinger para o escoamento turbulento. De acordo com Piggott, um máximo de 5% de concentração volumétrica poderia ser transportado com segurança, mas em concentrações superiores poderá causar problemas no poço. Ele reconheceu a importância da velocidade anular e da densidade do fluido, mas concluiu que altos valores de viscosidade são indesejáveis. Ele introduziu o conceito que escoamento turbulento induz velocidades de escorregamento turbulentas e sugeriu que escoamento laminar em anular resultaria em transporte mais eficiente.

Zeidler (1970), conduziu uma série de experimentos numa tentativa de previsão da fração de recuperação. Ele mostrou que não é um fator principal no transporte de cascalhos.

Hussain et. al. (1983), executaram uma série de estudos experimentais do transporte de cascalhos usando fluidos de perfuração “comuns”. Um trecho anular com um comprimento nominal de 50,2ft, diâmetro do revestimento igual a 5 in. e diâmetro da coluna de perfuração de 1,2in. Foi utilizado tubos de aço neste estudo. Os tipos de fluido utilizados foram: (1) um sistema de gel flocculado (bentonita. KCl), (2) um sistema gel/polímero e (3) uma mistura química/gel com tamanhos de cascalhos tipo 1, designação da ASTM (No 3 ½ in.) e tipo 2, 5/16 in. foram usados para conduzir o estudo experimental. Os resultados deles mostraram que aumentos na velocidade anular e do ponto de escoamento do fluido foram favoráveis para o transporte mais rápido dos sólidos, e por isso, uma limpeza eficiente do poço.

Okranji and Azar (1985), descobriram que a viscosidade plástica e o ponto de escoamento dos tipos de fluidos plásticos de Bingham devem ser tão altos quanto for possível para determinar uma melhor limpeza de poços.

Belavadi and Chukwu (1994), realizaram experimentos com escoamentos em loops com revestimento e tubo acrílicos onde representava um anular. Quatro amostras distintas de fluido à base de bentonita com densidades iguais 8,9ppg, 9,3ppg, 12ppg e 13ppg, além de ter introduzido fragmentos de cascalhos de tamanhos pequenos, médios e grandes no fundo da coluna acrílica. Eles usaram uma aproximação adimensional e observaram que um aumento na taxa de fluxo em fluidos de maiores densidades aumentava consideravelmente a taxa de transporte. Este efeito é quase insignificante quando se usa fluidos de baixa densidade para transportar cascalhos de tamanho grande. Eles relataram que o conceito da relação densidade-viscosidade pode ser aplicado para controlar a perfuração através de formações mais frágeis. Um pequeno aumento na taxa desta relação resulta num rápido decréscimo na taxa de transporte. Similarmente, um pequeno aumento no coeficiente de arraste dos cascalhos resulta num grande aumento na taxa de transporte.

Walker and Li (2000), usaram um escoamento em loop que consistia de um tubo transparente Lexan de 20 ft de comprimento com um diâmetro interno de 5 in. para simular o poço aberto e um tubo de aço de 2 3/8 in. para simular um flexitubo. Neste estudo três tipos diferentes de fluidos foram utilizados (HEC, polímero Xanvis e água) com tamanho de partículas variando de 0,15 mm a 7 mm foram usados neste estudo. Eles mostraram que a reologia do fluido tem um papel importante para o transporte de sólidos e para atingir resultados ótimos na limpeza de poços, sendo a melhor maneira de coletá-los com um fluido de baixa viscosidade em escoamento turbulento, porém para maximizar a capacidade de carreamento, usar um gel ou um sistema multifase deve ser usado para que os sólidos sejam transportados para fora do poço.

3.2 Taxa de fluxo no anular

Sifferman, et. al. (1973), mostraram que a taxa de transporte aumenta rapidamente com o incremento na taxa de fluxo de lama de perfuração em seguida começa a nivelar ou aumentar mais devagar em intervalos de fluxo entre 200 e 400gpm.

Belavadi and Chukwu (1994), relataram que pequenas variações na taxa de fluxo anular podem resultar num aumento substancial na taxa de transporte. Taxas de transporte são consideravelmente aumentadas em altas taxas de fluxo com tubo em rotação quando partículas de tamanhos pequenos a médios são transportados.

3.3 Tamanho dos sólidos

Sifferman, et. al. (1973), descobriu que o tamanho das partículas tem influência moderada em seu transporte.

Belavadi and Chukwu (1994), conduziram estudos experimentais com três tamanhos diferentes de partícula e concluíram que a remoção de partículas pequenas com rotação da coluna é aperfeiçoada quando está sendo perfurado com altas densidades de fluido circulados em altas taxas de fluxo.

Walker and Li (2000), investigaram através de estudos experimentais no laboratório com partículas com mais de 7 mm de diâmetro. Eles relataram que o tamanho das partículas tem efeito significativo em seu transporte. Partículas finas são as mais fáceis de eliminar e as partículas esféricas com um tamanho médio de 7,6 mm apresentam as maiores dificuldades para serem transportadas.

3.4 Densidade do fluido

Sifferman, et. al. (1973), relataram que a densidade da lama tem uma influência moderada no transporte de cascalhos.

Belavadi and Chukwu (1994), utilizaram uma aproximação adimensional onde a taxa de cascalhos para densidades de fluidos foi usada para analisar o efeito do peso específico do fluido no transporte de cascalhos. Eles usaram três cascalhos com três tamanhos diferentes com pesos específicos diferentes de lama e mostraram que ocorre um aumento na taxa de transporte conforme o peso da lama é aumentado.

3.5 Viscosidade

Sifferman, et. al. (1973), executaram uma experiência em campo, em estado estacionário, com uma torre de petróleo de 140ft. Um revestimento com 12in. de diâmetro foi usado com uma coluna de perfuração de 3 ½ in. Foram utilizados quatro densidades de fluido (10 ppg, 12ppg, 15ppg e água) com três tamanhos diferentes de sólidos fictícios de 1/16 in., 1/8 in. e 1/4 in. foram usados para o estudo experimental. Eles relataram que a eficiência de transporte dos sólidos aumenta com o aumento da viscosidade do fluido. Em transporte de cascalhos em escoamento laminar, 85% a 90% dos valores teóricos são baseados na velocidade terminal de escorregamento dos sólidos. Em escoamento turbulento, o transporte de cascalhos é por volta de 75% dos valores teóricos. Becker et. al. (1989), investigaram experimentalmente os efeitos da viscosidade e formação do estado gel nas propriedades de transporte de sólidos em poços direcionais para 15 tipos diferentes de fluido à base de água com o sistema viscosificado com bentonita e polímeros. Eles descobriram que a performance de limpeza de poços está correlacionada com a tensão de cisalhamento medida à 3 rpm, no viscosímetro. Eles também observaram que o tamanho da camada de cascalhos formada é reduzida se a tensão de cisalhamento for aumentada na taxa de bombeamento atual de trabalho.

Seeberger et al. (1989), afirmou que os parâmetros de baixa viscosidade devem ser avaliados para se obter uma ótima limpeza de poço.

3.6 Modelos teóricos

Zeidler and H. Udo (1970), desenvolveram um modelo matemático para prever a concentração volumétrica de cascalhos no fundo de poços verticais. Este modelo mostrou que a previsão de alta concentração ocorre com fluidos em baixa velocidade enquanto a perfuração avança. O modelo determinou valores precisos de concentração de sólidos, informando que a velocidade do fluido no anular é pelo menos duas vezes a velocidade de escorregamento das partículas.

Gavignet and Sobey (1989), apresentaram um modelo de transporte de sólidos de duas camadas. Eles assumiram que os cascalhos caíam para a parte inferior de poços inclinados e formavam uma camada que desliza para cima pelo anular. Sobre esta camada, uma segunda circula com lama sem fragmentos. A excentricidade foi levada em conta nos cálculos geométricos para o perímetro molhado e uma viscosidade aparente pôde ser calculada para fluidos não newtonianos usando um reograma escrito na forma polinomial.

Sharma (1990), estendeu a modelagem de Gavignet & Sobey pela separação da camada de partículas em duas outras camadas. Isto permitiu que existisse simultaneamente uma camada estacionária sobreposta por outra deslizante, ou uma camada deslizando no topo do anular de forma ascendente e uma outra deslizando no fundo do anular em sentido oposto.

Martins e Santana (1992), apresentaram um modelo de duas camadas mais versátil que o modelo de Gavignet & Sobey por que este permite que as partículas estejam em suspensão na camada superior. A concentração média de partículas nesta camada é calculada a partir de um perfil de concentração que foi obtido da resolução de uma equação de difusão.

Larsen et al (1997), desenvolveram um novo modelo matemático para a estimativa da mínima velocidade de transporte para o sistema com ângulo de inclinação de 55° a 90° . Eles descobriram que o modelo funcionou muito bem neste intervalo estudado, e ainda não foi possível obter resultados satisfatórios para inclinações abaixo de 55° . A partir de seu método foi reconhecido que há três parâmetros que afetam a determinação desta mínima velocidade para poços inclinados, sendo: inclinação, taxa de penetração e densidade da lama. O modelo também previu a relação da espessura do depósito de cascalhos quando a taxa de fluxo está abaixo do seu valor crítico.

Hyun et. al. (2000), formularam um novo modelo, composto por três camadas para prever e interpretar o transporte de sólidos em poços de quaisquer inclinações durante a perfuração com flexitubo. Baseado em diversas simulações, este modelo previu de forma satisfatória quando comparado com os dados experimentais publicados pelos demais autores.

B.J.Mitchell publicou uma forma de se prever a concentração de cascalhos no anular, onde a circulação de fluido é cessada durante a conexão de novos trechos de coluna e a circulação que ocorre antes de uma conexão, mas após que a perfuração tenha cessado. Esta última circulação é chamada de tempo de circulação de pré conexão. Este estudo foi fundamental, pois a fração do volume de cascalhos computados a partir disso poderia determinar a quantidade média no anular.

Hopkin desenvolveu uma relação entre o ponto de escoamento do fluido e a velocidade de escorregamento das partículas durante o transporte dos cascalhos. Foram realizados inúmeros testes dinâmicos de elevação de partículas com diversos tipos de lamas e com partículas com as mais variadas formas e tamanhos, em todos os tipos de escoamento (laminar, transicional e turbulento), coletando os dados para o desenvolvimento de um gráfico que atualmente é bastante útil para correlacionar a velocidade de escorregamento das partículas, conforme o tipo de fluido de perfuração utilizado.

3.7 Integração de estudos em laboratório e experiências em campo

Luo e Bern(1992) apresentaram gráficos para determinar os requisitos para a limpeza em poços desviados. Estes gráficos empíricos foram desenvolvidos com base nos dados coletados do equipamento desenvolvido pela TUDRP (Tulsa University Drilling Research Projects) e eles previram as taxas de fluxo críticas requeridas para a prevenção de acúmulo da camada de cascalhos. Estas previsões também foram comparadas com alguns dados de campo.

Guild e Hill(1995) apresentaram outro exemplo de integração da pesquisa em laboratório e as experiências em campo. Eles relataram que após eles terem perdido um poço devido a um programa de limpeza mal condicionado, adquiriram um maior *know how* tendo como resultado dois poços de longo alcance onde não apresentaram problemas na perfuração. O programa deles foi designado para maximizar o alcance na perfuração entre substituições de brocas e eliminar hole-cleaning backreaming trips antes de alcançar o ponto de revestimento. Eles inventaram uma forma de evitar acúmulos de sólidos significativos através de cuidadoso monitoramento dos diversos pesos nos equipamentos de perfuração.

4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO TRANSPORTE DE CASCALHOS

4.1 Densidade

A densidade do fluido de perfuração é um parâmetro importante a ser considerado na perfuração de poços, pois ela é responsável pela manutenção de pressão dentro do poço, ou seja, é necessário que ela seja devidamente controlada durante todo o processo, pois existem diversos fatores que contribuem para a sua alteração dentro do poço, como: movimentos da coluna de perfuração durante os procedimentos de conexão, a própria pressão hidrostática do poço, pressão de poros do maciço rochoso, entre outros fatores.

A partir da formulação correta do fluido de perfuração, esta poderá transportar os sólidos com maior eficiência, reduzindo o tempo necessário para a limpeza e tornando o procedimento mais rápido para ser executado, porém é importante levar em consideração a sua alteração, pois seus parâmetros reológicos são alterados, sendo necessário fazer um reajuste na velocidade anular para que o estado de Full Transport prevaleça. Além disso, é fundamental observar os limites impostos por estudos anteriormente desenvolvidos da região que está sendo perfurada, utilizando um gráfico específico, chamado de Janela de Operações. Nele há informações sobre a relação entre a profundidade do poço e as pressões do maciço rochoso, convertidas em densidades equivalentes, com intervalos mínimos e máximos, em que a operação deverá ser executada.

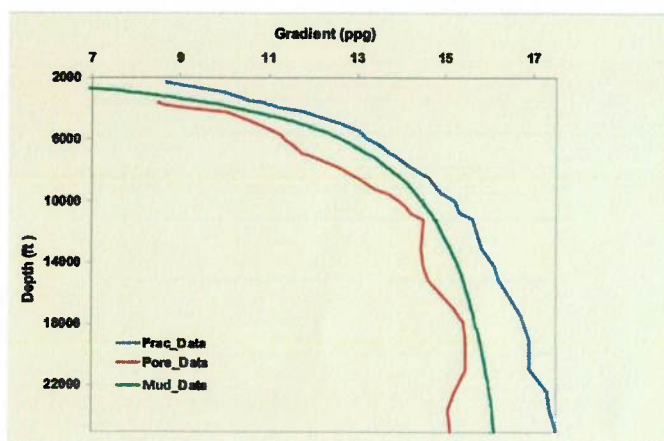


Figura 4.1 – Exemplo de janela operacional em um programa de perfuração.
(Fonte: http://www.gtep.civ.puc-rio.br/Hidraulica_de_pocos.aspx)

Se a densidade do fluido usado estiver acima do limite máximo, poderão ocorrer alguns problemas operacionais, como: a invasão do fluido de perfuração na formação, gerando perda de circulação, desmoronamento das paredes do poço, atrasos na perfuração e em casos extremos a perda do poço. Porém, se ela ficar abaixo do limite inferior, os fluidos localizados na formação perfurada poderá invadir o poço, tendo como consequências menos problemáticas, porém indesejáveis, a formação de um kick no poço, evidenciada pela entrada de fluido adicional na bomba. Se a situação não for mitigada a tempo, um fluxo descontrolado de hidrocarbonetos sairá pelo poço. Esse efeito é denominado por blow-out.

Sendo assim, o operador tem o papel fundamental de controlar a densidade do fluido para que ela esteja no intervalo permitido para determinada profundidade e que ao mesmo tempo a densidade atribuída realize a limpeza da forma mais eficiente possível.

4.2 Influência dos Sólidos

No processo de perfuração de poços de petróleo, conforme o avanço da broca no maciço rochoso, este é triturado em pequenos fragmentos de granulometria e forma variadas. De acordo com essas características dos sólidos, o seu transporte pode ser dificultado por diversas condições presentes no sistema.

Estes sólidos devem ser removidos do poço para que sejam evitados problemas operacionais associados ao acúmulo, sendo citado como exemplos:

- Aprisionamento da coluna de perfuração;
- Aumento excessivo da densidade efetiva do fluido de perfuração podendo provocar fratura da formação;

- Desgaste prematuro das brocas;
- Redução na taxa de penetração;
- Aumento excessivo de torque e força de arraste na coluna de perfuração, entre outros;

O transporte dos sólidos deve ser estudado com atenção, pois se devem levar em consideração as diversas forças atuantes neles, como: a força de atrito com as paredes do anular e dos sólidos entre si, peso, empuxo, força de arraste e tensões interfaciais.

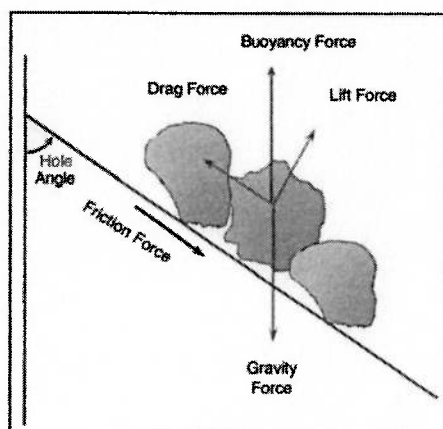


Figura 4.2 – Diagrama de corpo livre dos sólidos formados. (Fonte: Drilling Engineering, J.J. Azar e G. Robello Samuel, 2007)

4.3 Propriedades reológicas dos fluidos

Os fluidos de perfuração possuem como papel fundamental o transporte dos sólidos produzidos durante a perfuração, além de outras funções básicas como: transmissão de potência ao motor de fundo, resfriamento e lubrificação da broca, estabilização das paredes do poço, suspensão dos sólidos, entre outras funções.

Especialmente esta última característica tende a ser a mais importante, pois eles deverão ser capazes de elevar e remover os sólidos encontrados no poço, ou até suspendê-los, conforme a necessidade de intervenções ou outros procedimentos exigidos, logo deverão possuir propriedades reológicas específicas, sendo este um dos principais objetos de estudo deste trabalho.

Os fluidos dividem-se em:

- Newtoniano
- Não newtonianos
 - Power Law
 - Plásticos de Bingham
 - Herschel-Bulkley

Os fluidos de perfuração são exclusivamente não newtonianos. Na figura 4.3, temos um exemplo do comportamento de cada um destes tipos de fluidos.

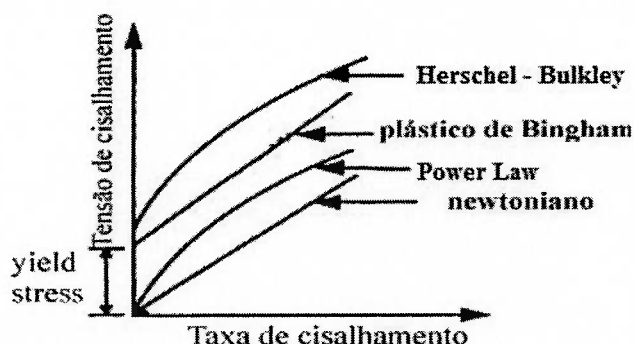


Figura 4.3 – Gráfico representativo do comportamento dos tipos de fluidos.

(Fonte: http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluid_0910.shtml)

De acordo com o tipo de fluido utilizado o seu comportamento de fluxo será melhor manuseado conforme as necessidades operacionais, tendo seus parâmetros específicos influenciando diretamente nos cálculos de perdas de carga na tubulação e velocidade de transporte dos cascalhos.

Os fluidos de perfuração podem ser à base de água, gás ou óleo, sendo empregado cada um destes tipos de acordo com as especificações do projeto.

4.4 Dimensões do anular

Na Engenharia de Petróleo, o espaço anular (“anular space”) é compreendido com o espaço determinado entre a parede do poço aberto e a parede externa da coluna de perfuração. No processo de perfuração de poços de petróleo, após o avanço de determinada seção do maciço rochoso previamente calculada em função da variação prevista das pressões de poros e de fratura da formação, o próximo passo a ser executado será colocação de sapatas de cimento e do revestimento no poço e em seguida a cimentação. Após todo esse procedimento, a parte central da sapata é perfurada para que a atividade seja retomada. Ao longo da perfuração, são utilizadas brocas de diâmetros cada vez menores para tornar o avanço cada vez mais eficiente, portanto os poços de petróleo possuem uma estrutura telescópica.

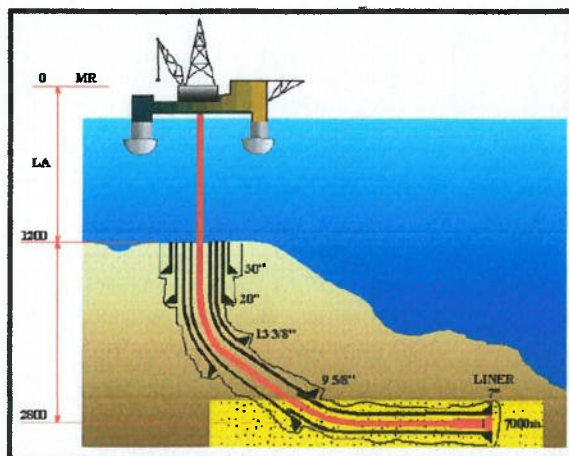


Figura 4.4 – Exemplo de poço direcional revestido com liner.
(Fonte: <http://www.petroleoetc.com.br>)

No caso de poços direcionais, há a possibilidade de possuírem grandes inclinações em fases intermediárias pela necessidade de se realizar desvios no maciço rochoso por motivos, que serão explorados com mais detalhes no item a seguir. Logo, há a possibilidade de existir trechos anulares de diversas dimensões.

A escolha da coluna de perfuração deve ser feita cuidadosamente quando se trata do transporte de sólidos, pois deverá ser em função do diâmetro da broca utilizada durante a seção perfurada para que a remoção seja da forma mais simples e eficiente possível.

4.5 Inclinação do poço

A perfuração direcional tem sido cada vez mais adotada, devido os grandes benefícios na produção dos hidrocarbonetos e para isso, foram desenvolvidas várias técnicas que serão descritas abaixo (Mitchell, R. F. 2007):

- Múltiplos poços a partir de uma única posição: Para o desenvolvimento de campos offshore, é interessante centralizar uma quantidade de poços em uma única plataforma ou ilha artificial, reduzindo bastante os custos e impactos ambientais;
- Posições inacessíveis na superfície: Um poço direcional é perfurado para alcançar uma zona produtora que do contrário seria inacessível com a prática de perfuração vertical. Nestes casos, os poços de longo alcance são os mais comumente adotados.
- Zona com múltiplos alvos: Esta é uma maneira que gera um custo-benefício bastante atrativo devido à possibilidade de altas taxas de produção que envolve a intersecção de uma zona produtora por múltiplos pontos com um único poço. Isto também é aplicável para múltiplas zonas produtoras adjacentes a um plano de falha ou abaixo de um domo salino.

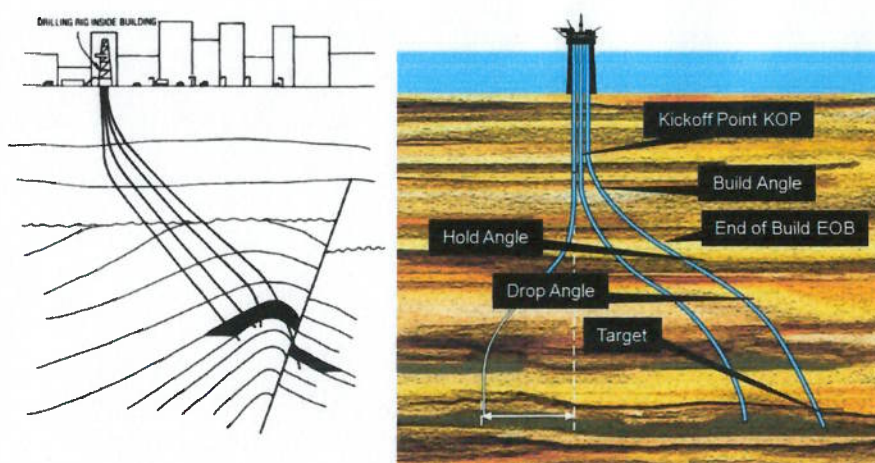


Figura 4.5 – A. Poço direcional por motivos geográficos e exploração em diversas posições. B. Múltiplos poços em campo offshore.
(Fonte: <http://tntenergy.ca/directional-drilling>)

•Poços desviados: Esta técnica é utilizada para contornar obstruções por meio de desvios simples ou para o reposicionamento do fundo do poço por razões geológicas, no caso são feitos desvios orientados. Os desvios orientados são necessários se uma direção específica é crítica para atingir uma formação produtora já descoberta.

•Perfuração em zonas de falhas: É frequentemente difícil perfurar um poço vertical através de um plano de falha muito inclinado para alcançar uma formação. Ao invés disso, a melhor alternativa é a perfuração perpendicular ou paralela ao plano de falha. Em áreas instáveis, o poço perfurado trará riscos devido a possibilidade de escorregamentos ou movimentos da falha, além de existirem área pressurizadas que possam afetar as suas condições.

•Poços de alívio: Este tipo de poço é utilizado para interceder em situações problemáticas onde há a necessidade de se bombear fluido para aliviar a pressão do poço produtor e eliminar o fluxo descontrolado.

4.6 Taxa de Penetração

Como já mencionado anteriormente, os custos associados à perfuração de poços de petróleo são consideravelmente altos, devido aos custos dos aluguéis das sondas de perfuração, portanto, em questões econômicas, é interessante que o tempo desta operação seja reduzido o máximo possível.

Mas as alterações na taxa de penetração da broca devem ser feitas levando em conta alguns fatores ligados a esta decisão:

- Desgaste prematuro das brocas;

- Aumento no tempo de manobra;
- Aumento no bombeio de fluido;
- Aumento de torque;
- Vibração excessiva;

Sendo assim, se houver um aumento exagerado da taxa de penetração, consequentemente levará ao desgaste precoce das brocas. Além disso, a perfuração deverá ser interrompida para a troca da broca, e dependendo da extensão que o poço tiver isto implicará em muito tempo que a sonda ficará inoperante, ou seja, gerando mais custos diários.

A taxa de penetração da broca também é considerada como um parâmetro para a limpeza de poços, pois de acordo com o aumento dessa taxa, a produção de sólidos no poço cresce proporcionalmente, tornando indispensável o aumento no bombeio de fluido para o transporte destes sólidos.

4.7 Velocidades atuantes no transporte de sólidos

4.7.1 Velocidade no anular

Uma forma de se garantir que a limpeza de poços seja efetuada com sucesso se dá pela avaliação da velocidade anular no poço, dada indiretamente pela vazão bombeada na superfície. A equação 1 a seguir descreve o cálculo desta velocidade:

$$\bar{v}_a = \frac{24,5Q}{D_H^2 - D_{op}^2} \quad (1)$$

4.7.2 Velocidade de escorregamento das partículas

Durante a limpeza de poços, os sólidos inevitavelmente tenderão a decantar e repousar no fundo do poço, quando verticais, e na parte inferior da parede do poço, no caso de poços direcionais. Neste movimento apresentado pelos sólidos, eles desenvolvem uma velocidade específica, chamada de velocidade de escorregamento de sólidos.

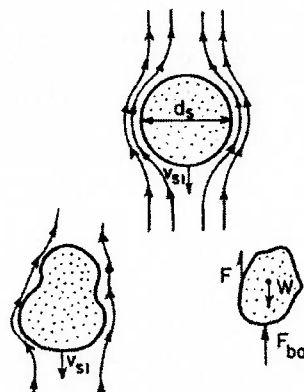


Figura 4.6 – Esquematização do transporte de cascalhos e sua velocidade de escorregamento no fluxo. (Fonte: Drilling Engineering. J.J. Azar e G. Robello Samuel, 2007)

A velocidade total de escorregamento dos sólidos é calculada conforme a inclinação do poço perfurado, sendo descrita pela Equação 2:

$$\bar{v}_s = \bar{v}_{sa} + \bar{v}_{sr} \quad (2)$$

A partir da Equação 2, nota-se a influência de duas componentes de velocidade de escorregamento, sendo na direção axial, descrita pela Equação 3 e radial, pela Equação 4:

$$\bar{v}_{sa} = \bar{v}_s \cos \theta \quad (3)$$

$$\bar{v}_{sr} = \bar{v}_s \sin \theta \quad (4)$$

4.7.3 Velocidade de transporte

Dada a situação criada pelos efeitos que os sólidos estão submetidos dentro poço, o objetivo principal é o transporte efetivo dos cascalhos, logo a velocidade que determina isto é a velocidade de transporte dos sólidos. Ela consiste na diferença entre a velocidade anular e a velocidade de escorregamento dos sólidos, descrito pela Equação 5 abaixo:

$$\bar{v}_t = \bar{v}_a - \bar{v}_s \quad (5)$$

Logo, para que os sólidos sejam elevados até a superfície a velocidade anular deverá ser superior a velocidade de escorregamento dos sólidos.

Em poços verticais, o transporte dos sólidos é desenvolvido de forma mais simples que em poços direcionais, já que a velocidade de transporte do fluido deverá ser suficientemente superior para que os sólidos fiquem totalmente em suspensão, evitando a formação de camada de sólidos que possam dificultar os processos de perfuração.

Neste tipo de poço, o escoamento sólido-fluido pode ocorrer de quatro formas diferentes:

- pseudo-homogêneo
- heterogêneo,
- por saltação
- escoamento com camada estacionária.

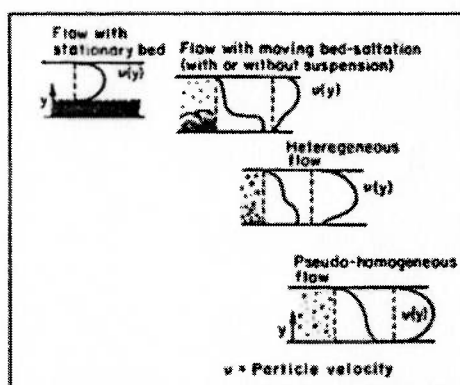


Figura 4.7 – Configuração dos quatro tipos de escoamento em poços direcionais.
(Fonte: Drilling Engineering. J.J. Azar e G. Robello Samuel, 2007)

4.7.4 Razão de Transporte

A razão de transporte, desenvolvida por Sifferman et al.(1974) é um fator muito útil para estudo do transporte de sólidos e a principal referência neste trabalho para analisar a influência de cada um dos parâmetros mostrados.

A partir da Equação 6 é possível avaliar a eficiência da remoção de sólidos dentro do poço.

$$R_t = 1 - \frac{\bar{v}_{Cs}}{\bar{v}_{Can}} \quad (6)$$

Quanto mais esse fator se aproximar de 1, significa que não há deslizamento de sólidos no fluido, ou seja, todo o material produzido está sendo transportado. Na medida

em que este fator reduz, a taxa de sólidos transportados diminui proporcionalmente. Em casos extremos, se este fator for negativo, significa que há um acúmulo no poço, gerando possíveis problemas operacionais.

5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Recursos utilizados neste trabalho

Inúmeros modelos matemáticos foram publicados a partir da combinação de experimentos em laboratório de escoamento em loop, modelagens mecanicistas e observações de campo. As equações empíricas utilizadas no trabalho são exclusivamente para poços direcionais e podem ser usadas para determinar os requisitos necessários para uma remoção eficiente dos sólidos.

A velocidade para a elevação dos sólidos, a velocidades de escorregamento e a velocidade crítica para o seu transporte são dadas pelas equações a seguir:

$$\bar{v}_{Can} = \bar{v}_{Cr} + \bar{v}_{Cs} \quad (7)$$

$$\bar{v}_{Cr} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{D_{op}}{D_H}\right)^2 \left[0,64 + \left(\frac{18,16}{ROP}\right)\right]\right]} \quad (8)$$

$$\bar{v}_{Cs} = v_{Cs} C_{ang} C_{size} C_{mwt} \quad (9)$$

Onde:

$$v_{Cs} = 0,00516\mu_a + 3,006 \quad \text{se } \mu_a \leq 53 \quad (10)$$

$$v_{Cs} = 0,02554\mu_a + 3,280 \quad \text{se } \mu_a > 53$$

$$\begin{aligned} \mu_a &= \tau_y + 1,12\mu_p(D_H - D_{op}) \quad \text{quando } \mu_p < 20 \text{ cp e } \tau_y < 20 \text{ lbs}/100 \text{ ft}^2 \\ \mu_a &= \tau_y + 0,9\mu_p(D_H - D_{op}) \quad \text{quando } \mu_p > 20 \text{ cp e } \tau_y > 20 \text{ lbs}/100 \text{ ft}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$C_{ang} = 0,0342\theta - 0,000233\theta^2 - 0,213 \quad (12)$$

$$C_{size} = -1,04d_p + 1,286 \quad (13)$$

$$C_{mwt} = 1 - 0,0333(\gamma_m - 8,7) \quad (14)$$

5.2 Desenvolvimento do estudo

Para o desenvolvimento do trabalho e a análise de cada um dos parâmetros descritos, foi utilizada uma configuração base para que as análises computacionais pudessem ser conduzidas. Foram utilizados dois fluidos com propriedades reológicas distintas com o intuito de melhor exploração do modelo empírico para que fosse observada a mudança nos resultados das Equações 10 e 11.

Todos os valores dos dados utilizados não são reais, porém eles estão dentro do intervalo utilizado em operações de campo. A simulação computacional foi realizada através de extensas em planilhas de Excel e produção de gráficos para a representação dos resultados.

As tabelas complementares referentes aos parâmetros são encontradas no Apêndice A, incluindo os resultados de velocidade média de escorregamento dos cascalhos.

As figuras apresentadas abaixo expressam os resultados da razão de transporte em função da velocidade anular crítica de transporte e para isso os dados de entrada da vazão de bombeio foram variados durante todo o estudo e os parâmetros foram manipulados separadamente.

Após isso, um breve sumário destes parâmetros será feita em conjunto e por fim, com os resultados obtidos neste estudo, será feita uma comparação do programa adotado com um novo desenvolvido para observarmos a otimização pela simulação.

5.3 Condições de contorno do problema

Para o desenvolvimento do trabalho, foram impostas algumas condições de contorno para a simplificação do estudo, além do modelo usado não corresponder a todas as situações envolvidas numa operação. As condições assumidas foram:

- Estado estacionário
- Regime turbulento
- Diâmetro do poço e da coluna de perfuração concêntricos
- Granulometria fixa
- Densidade dos cascalhos não considerada
- Não há perda de circulação do fluido para a formação
- Efeitos da rotação da coluna foram desconsiderados

- Escoamento em Full Transport
- As perdas de carga no anular foram desconsideradas

Na tabela 5.1 são encontradas as características da configuração base para a limpeza do poço:

Dados		
Parâmetros	Valores	Unidades
Inclinação	90	°
Densidade do fluido	9,3	ppg
Diâmetro dos cascalhos	0,5	in
Diâmetro do Poço	8,5	in
Diâmetro Externo do Drillpipe	4,5	in
Peso Específico do cascalho	2,7	g/cm ³
Taxa de penetração	50	ft/h
Viscosidade Plástica (μ_p)	20,3	cp
Ponto de Escoamento (τ_y)	20,1	lbs/100ft ²

Tabela 5.1 – Configuração base para os cálculos da limpeza de poço.

5.4 Avaliação da influência dos parâmetros

5.4.1 Propriedades Reológicas dos fluidos

Neste trabalho foram realizadas análises com quatro tipos diferentes de fluidos não newtonianos (Bingham) e suas propriedades são fictícias sendo apenas para fins computacionais.

Em diversos trabalhos realizados por outros autores foram empregados fluidos do tipo Power Law, mas neste trabalho foi utilizado o fluido Bingham, já que ambos são utilizados normalmente pelos engenheiros de perfuração. Na Figura 5.1 temos os resultados encontrados para cada um destes fluidos.

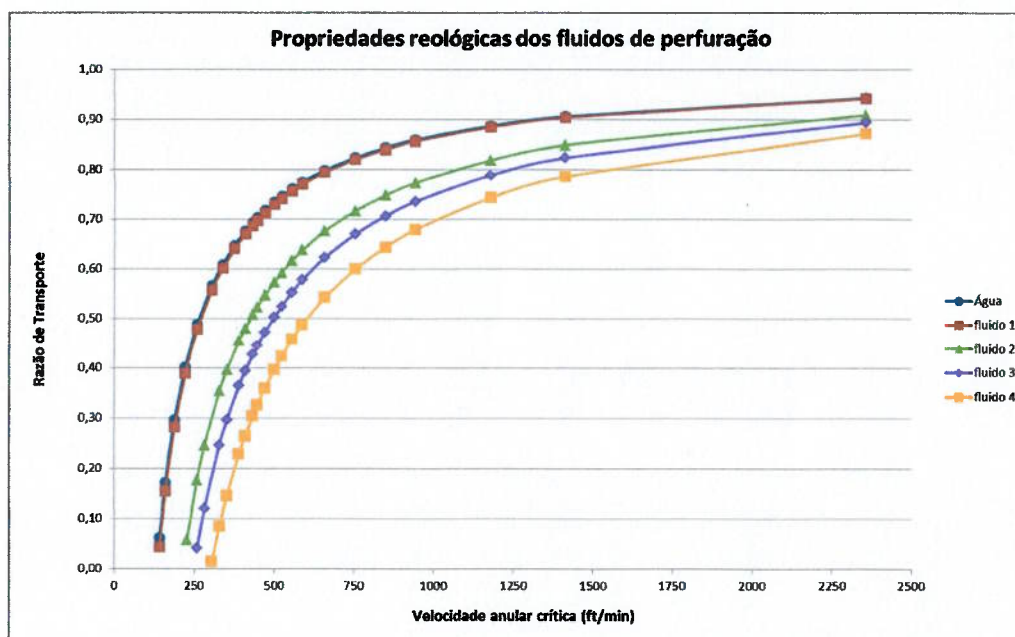


Figura 5.1 – Resultados para os diversos tipos de fluidos de perfuração

Com os resultados apresentados acima, é possível observar que os fluidos que possuem suas propriedades reológicas mais baixas, tendem a desenvolver melhor o transporte dos sólidos e conforme essas propriedades aumentam, a velocidade necessária para se produzir um mesmo rendimento acaba sendo maior. Além disso, observando a Figura 8.1 no Anexo, o fluido 1 possui suas propriedades muito baixas, tendo seu comportamento quase idêntico ao da água.

Porém, como bem compreendido na engenharia de perfuração, os fluidos necessitam de propriedades físicas e químicas específicas para que a operação siga sem dificuldades, tornando a água pura um fluido inutilizável.

Um aspecto negativo quanto a isso quando se leva em conta as características dos fluidos não newtonianos, neste caso do tipo plástico de Bingham, onde suas propriedades físicas são úteis para manter os sólidos suspensos durante a interrupção da circulação do fluido para atividades básicas como, por exemplo, a conexão e retirada de seções de coluna, logo, o uso de um fluido com comportamento próximo ao da água poderia ser um problema.

5.4.2 Inclinação do poço

Foram analisados os efeitos em poços com diversas inclinações em relação a vertical, exclusivamente para poços com grandes inclinações ($\theta > 40^\circ$). Os resultados estão descritos nas figuras 5.2 e 5.3:

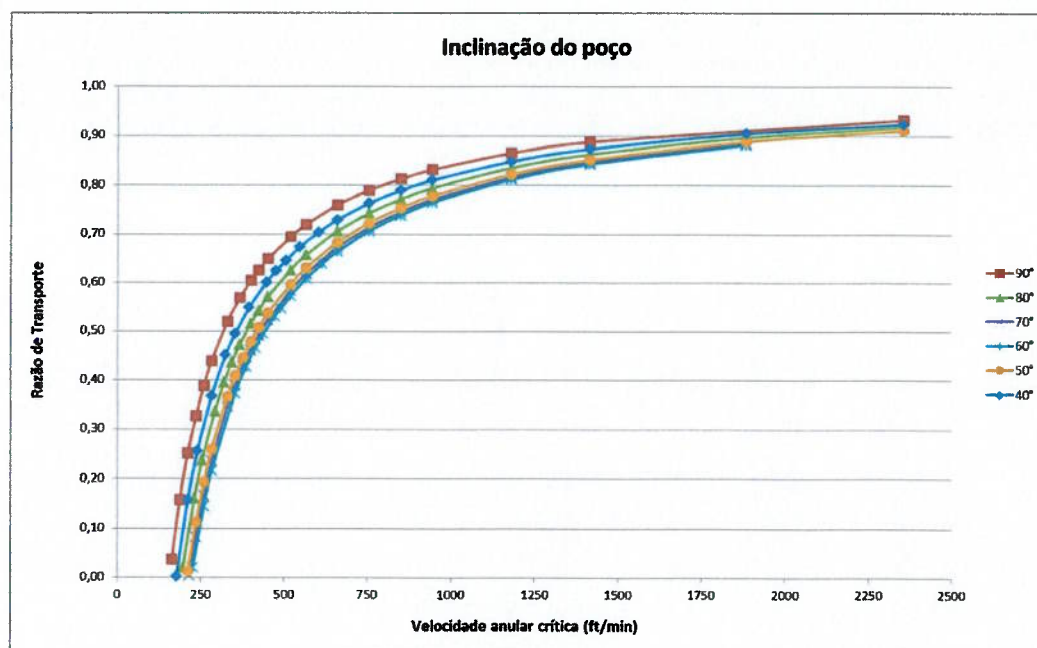


Figura 5.2 – Resultados das inclinações do poço para o fluido 1

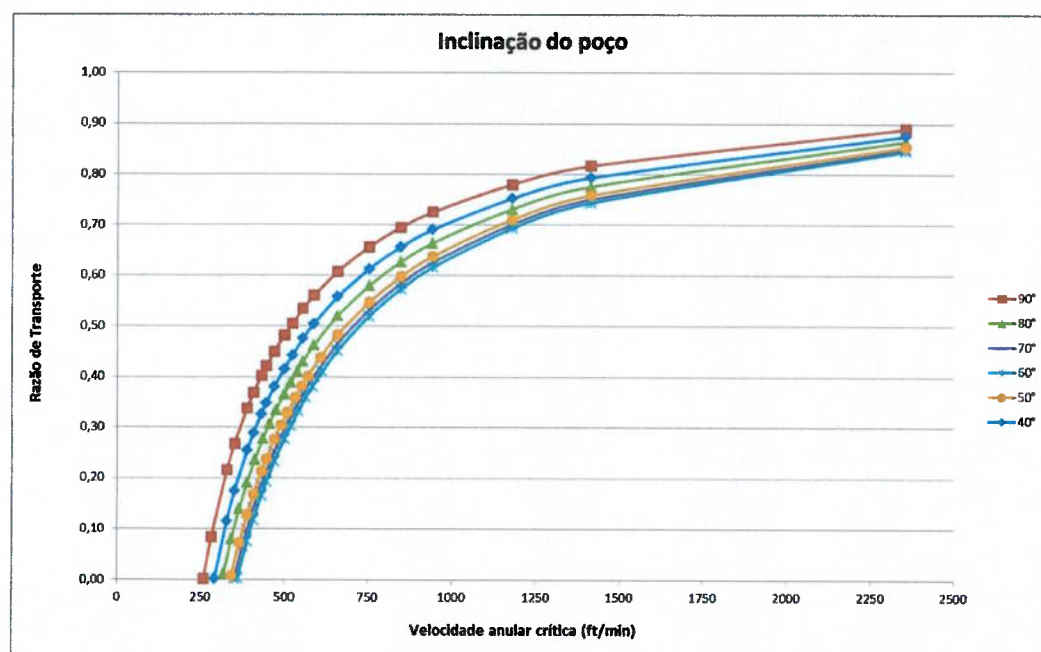


Figura 5.3 – Resultados das inclinações do poço para o fluido 3

O modelo empírico forneceu bons resultados quanto ao intervalo de inclinação do poço (60° a 90°), apresentando um aumento gradativo da velocidade crítica

necessária em relação à taxa de transporte quando a inclinação do poço é reduzida em relação a vertical.

Para as inclinações de 40° e 50°, os resultados se comportaram de forma diferente, provavelmente o modelo empírico adotado foi desenvolvido com testes em laboratório com inclinações mais próximas da horizontal, gerando assim erros para os demais intervalos.

5.4.3 Densidade do fluido

Foram utilizadas três densidades diferentes (9 ppg, 12ppg e 15ppg) para cada um dos fluidos para efeito de comparação nos estudos. Como são estudos teóricos, o aumento na densidade do fluido não influenciará nas suas propriedades reológicas. Os resultados estão descritos nas figuras 5.4 e 5.5:

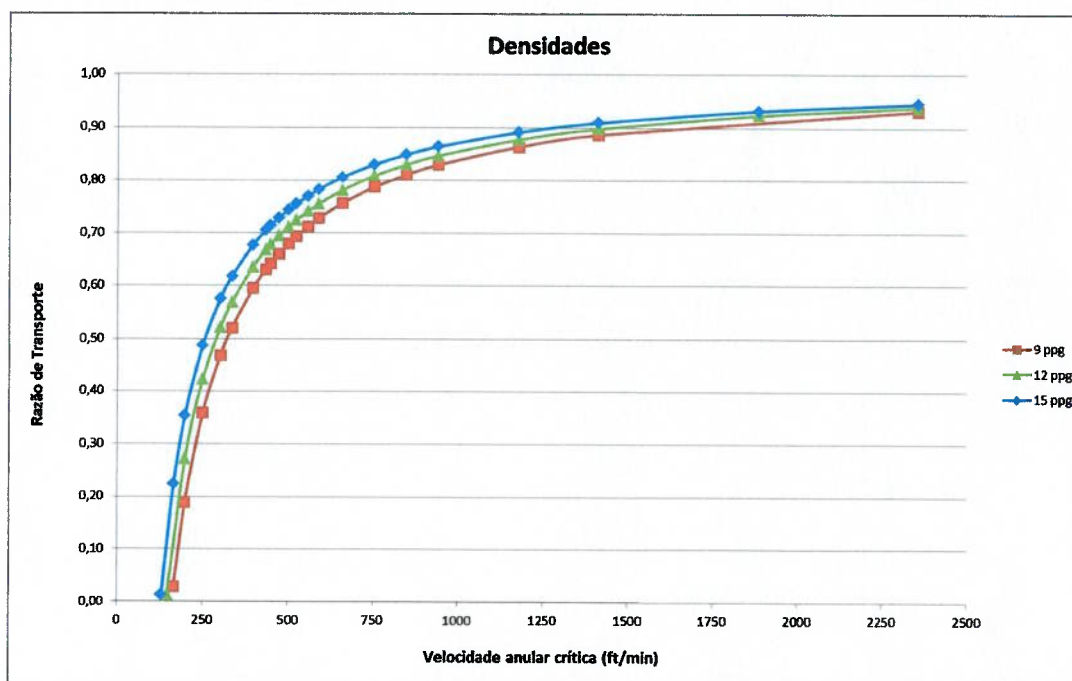


Figura 5.4 – Resultados para as densidades do fluido 1

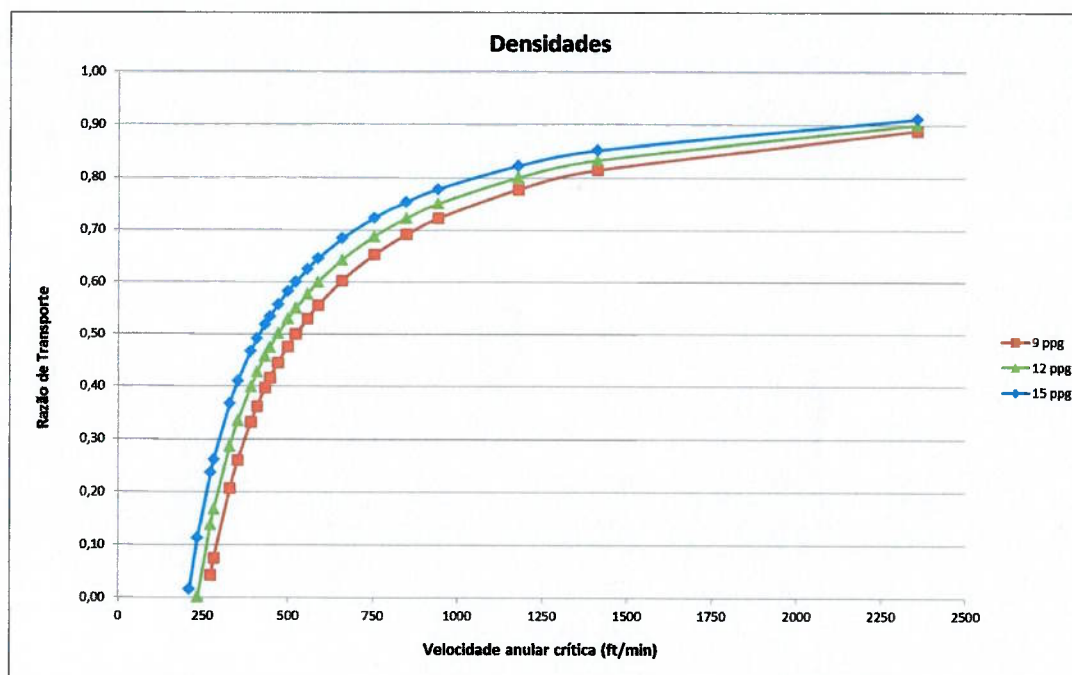


Figura 5.5 – Resultados para as densidades do fluido 3

Como já esperado, o modelo mostrou que houve um aumento na taxa de transporte com a alteração da densidade, pois como a mistura fica mais concentrada de partículas carreadoras a sua capacidade de arrastar os cascalhos tenderá a ser maior, ou seja, o fluido oferecerá maior resistência quanto ao escorregamento dos sólidos sendo esta uma interação exclusivamente física.

Entretanto, este aumento não foi muito significativo, em outras palavras, a velocidade crítica necessária para que não haja formação de leito de sólidos obteve uma pequena alteração, como observado nos resultados apresentados acima.

5.4.4 Tamanho das partículas

Foram utilizados três tamanhos diferentes de sólidos (0,125 in., 0,25 in. e 0,5 in.), todos com forma esférica, pois o modelo empírico adotado se limita a esta condição. Os resultados estão descritos nas figuras 5.6 e 5.7:

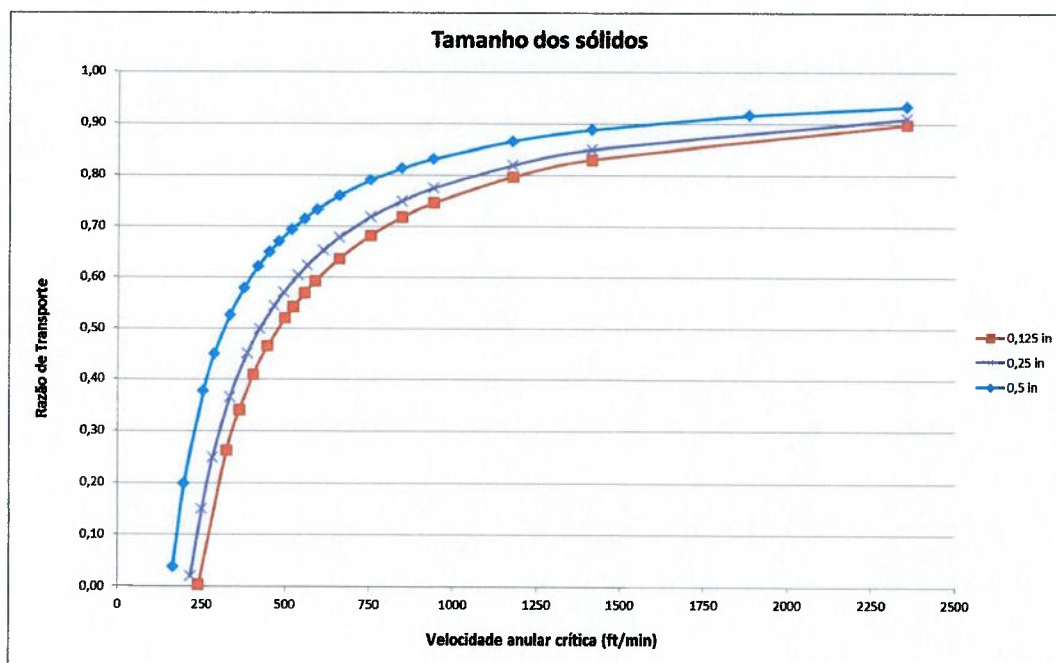


Figura 5.6 – Resultados para diferentes tamanhos de sólidos para o fluido 1

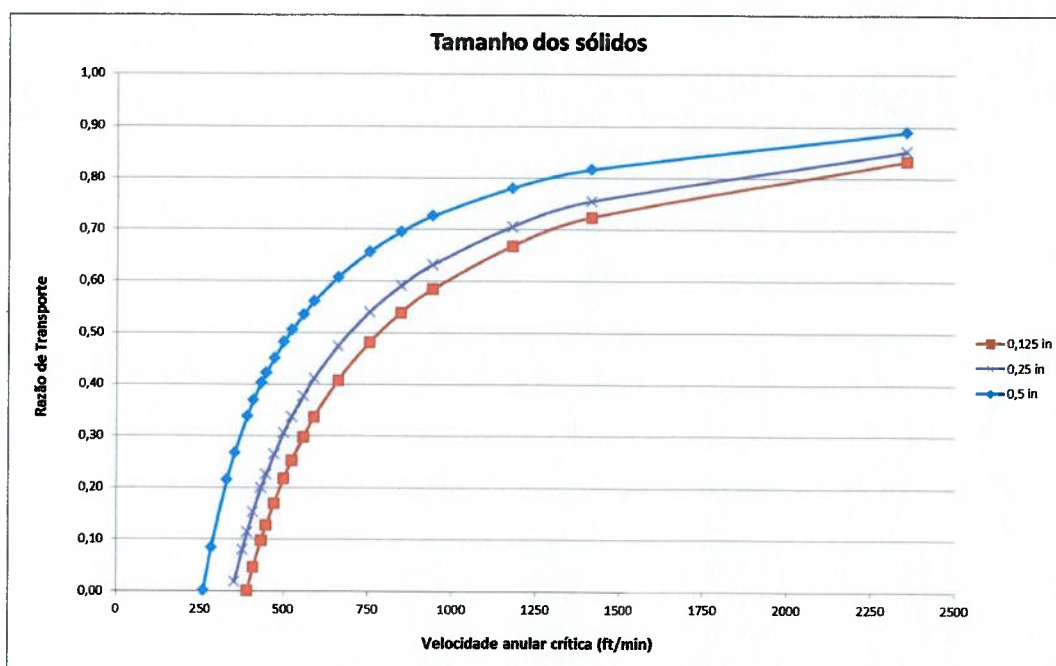


Figura 5.7 - Resultados para diferentes tamanhos de sólidos para o fluido 3

Os resultados mostraram que os sólidos com maiores dimensões tendem a ser transportados mais facilmente, pois os fragmentos menores sofrem maiores tensões

interfaciais devido a sua relação massa-área de superfície. Como o arraste em partículas pequenas é menor que nas grandes, conseqüentemente, maiores alturas de leito são encontradas (Martins, 1990), portanto a velocidade anular necessária também será maior.

5.4.5 Dimensões do Anular

Foram utilizadas algumas combinações de diâmetros do poço aberto em função dos diâmetros das colunas de perfuração (2,375 in a 5,5 in), com o intuito de se analisar a influência no transporte de sólidos conforme as dimensões que o espaço anular assumir.

Na literatura é indicado que a razão (poço aberto/coluna de perfuração) seja superior a 0,3, na aplicação de perfuração rotativa (Bourgoyne et. Al, 1991). Neste trabalho foram utilizadas duas razões diferentes, sendo uma mínima e outra máxima, com valores de 0,4 e 0,7, respectivamente.

Como os tamanhos de broca utilizados não correspondem exatamente a estas proporções por serem tabeladas, as razões utilizadas encontram-se dentro deste intervalo.

Os resultados estão descritos nas figuras 5.8 e 5.9:

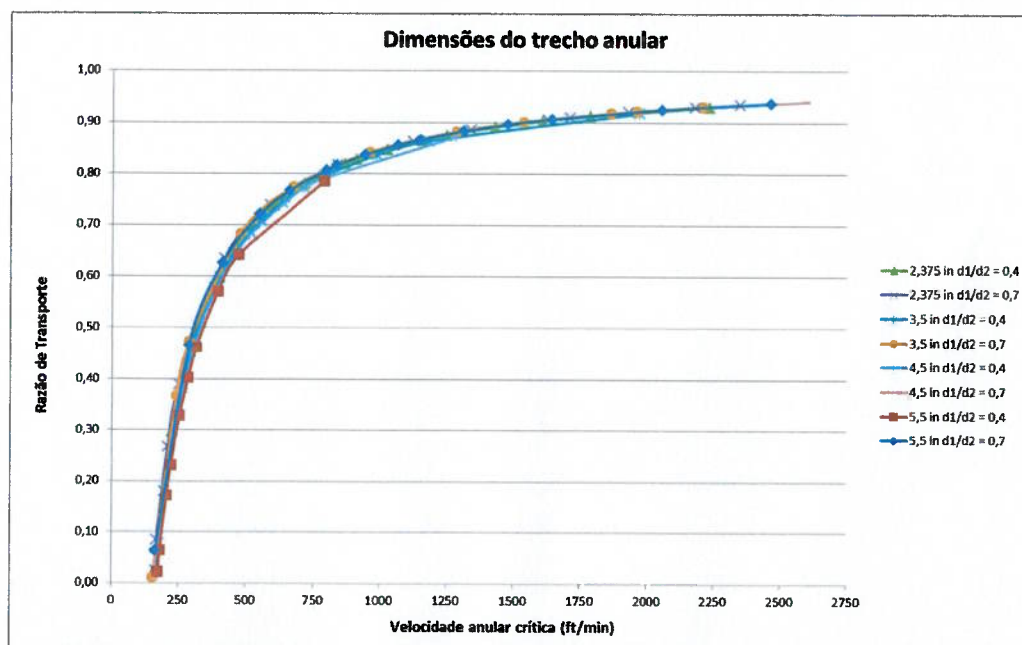


Figura 5.8 – Resultados obtidos para dimensões do anular com o fluido 1

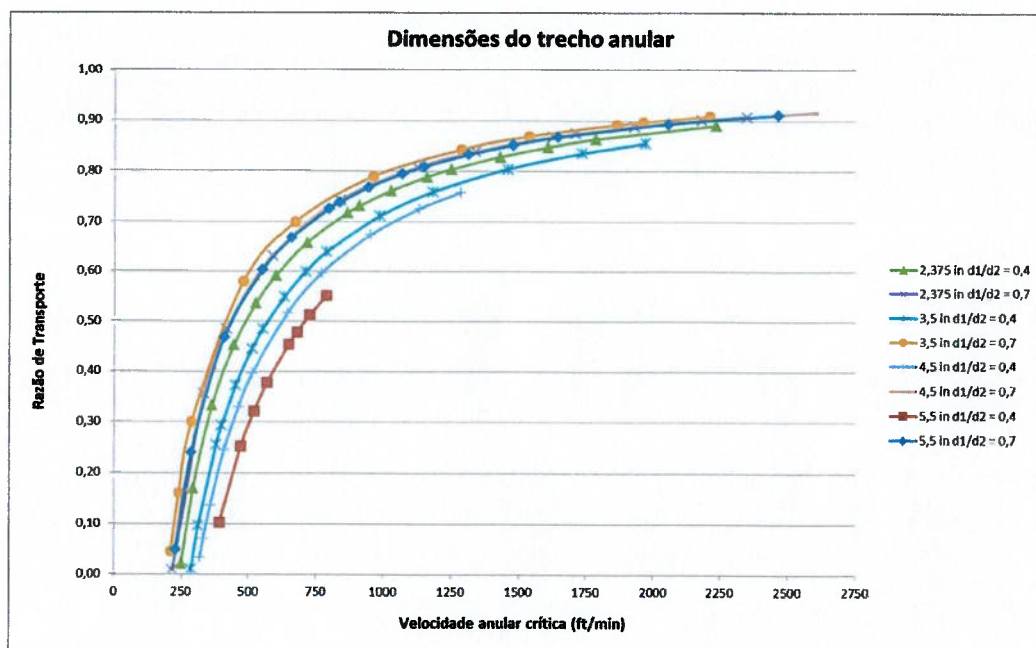


Figura 5.9 – Resultados obtidos para dimensões do anular com o fluido 3

Com os resultados apresentados acima, o fluido 1 apresentou pouca alteração nas diversas configurações de trecho anular, podendo executar um ótimo desempenho em qualquer fase de perfuração.

Para o fluido 3, nota-se que houveram resultados bastante variados para as situações analisadas, sendo uma questão importante para se levar em consideração durante a limpeza de poços, pois um fluido que demonstre diferentes comportamentos ao longo da perfuração poderá exigir maiores cuidados quanto ao seu manuseio. Portanto, ele não seria uma boa escolha para o procedimento.

Foi determinado esse intervalo de razões, pois quanto mais a razão se aproximava de 1 os resultados apresentaram desempenhos cada vez melhores para a limpeza de poços e menores vazões de bombeio, contudo, devemos lembrar que nas operações em campo, a diminuição do espaço anular poderia ocasionar problemas no transporte dos sólidos, além de o atrito destes com o anular ser muito alto, causando desgastes dos equipamentos e altas perdas de carga durante o escoamento. Para a razão próxima da descrita na literatura, os resultados apresentaram altas taxas de bombeio de fluido para que o transporte fosse realizado, sendo um fator limitante de acordo com a potência da bomba disponível nas operações em campo. Além disso, alguns problemas mecânicos poderiam acontecer como, por exemplo, a flambagem da coluna de perfuração conforme a aplicação de peso para perfurar.

5.4.6 Sumário dos efeitos dos parâmetros operacionais

Com a análise de todos os parâmetros discutidos anteriormente, neste item será feita uma comparação de todos os parâmetros operacionais, ou seja, aqueles que são possíveis de se manipular durante a perfuração, que são: tipo de fluido, densidade e dimensões do anular. Foram utilizados cada um dos parâmetros que apresentaram melhor desempenho em seu grupo de estudo.

Dados:

- Fluido: Tipo 1 – $\mu_p = 3,2$ cp e $\tau_y = 2,1$ lb/100 ft³
- Densidade: $\rho_m = 15$ ppg
- Dimensões do Anular: $D_H = 6,625$ in. e $D_{OP} = 4,5$ in.

O resultado está descrito na figura 5.10:

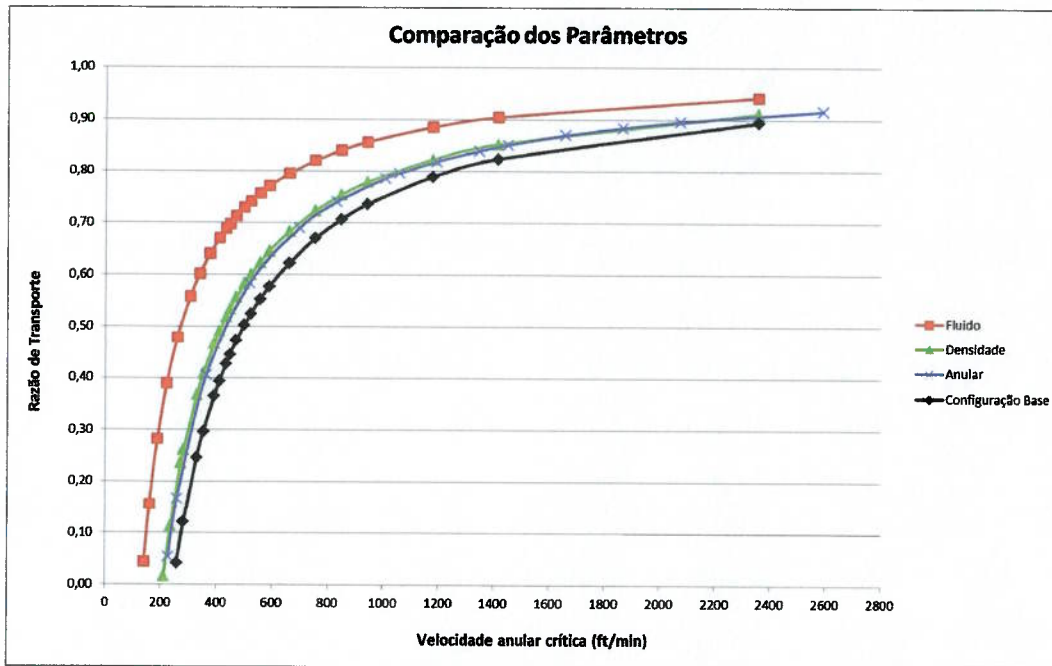


Figura 5.10 – Comparação dos parâmetros utilizados na configuração base.

Os resultados mostraram que as propriedades reológicas do fluido utilizado possui uma influência muito maior na limpeza de poços, algo já esperado, pois a escolha do fluido utilizado é a base para a operação de limpeza. A densidade e as dimensões do anular apresentaram pouca influência nos resultados.

No caso das dimensões do anular, talvez a influência tenha sido pequena por que as dimensões não sofreram alterações muito significativas, em contrapartida a densidade mostrou que é pouco eficiente na limpeza de poços, sendo assim um parâmetro secundário.

5.4.7 Configuração otimizada de um programa de limpeza de poços

Finalmente, como último estudo a ser realizado neste trabalho, aplicaremos todos os dados obtidos das análises anteriores e faremos a comparação com a configuração base proposta inicialmente, para que possa ser observada a melhoria na operação de limpeza. A seguir temos a Tabela 5.2 e a Figura 5.11, para comparação dos dados de entrada da configuração base e da atual e os resultados utilizando o modelo empírico adotado, respectivamente:

Dados				
Configurações	Base		Atual	
Parâmetros	Valores	Unidades	Valores	Unidades
Inclinação	90	°	90	°
Densidade do fluido	9,3	ppg	15	ppg
Diâmetro dos cascalhos	0,5	in	0,5	in
Diâmetro do Poço	8,5	in	6,625	in
Diâmetro Externo do Drillpipe	4,5	in	4,5	in
Taxa de penetração	50	ft/h	50	ft/h
Viscosidade Plástica (μ_p)	20,3	cp	3,2	cp
Ponto de Escoamento (τ_y)	20,1	lbs/100ft ²	2,1	lbs/100ft ²

Tabela 5.2 – Dados dos programas de limpeza de poços Base e o Atual

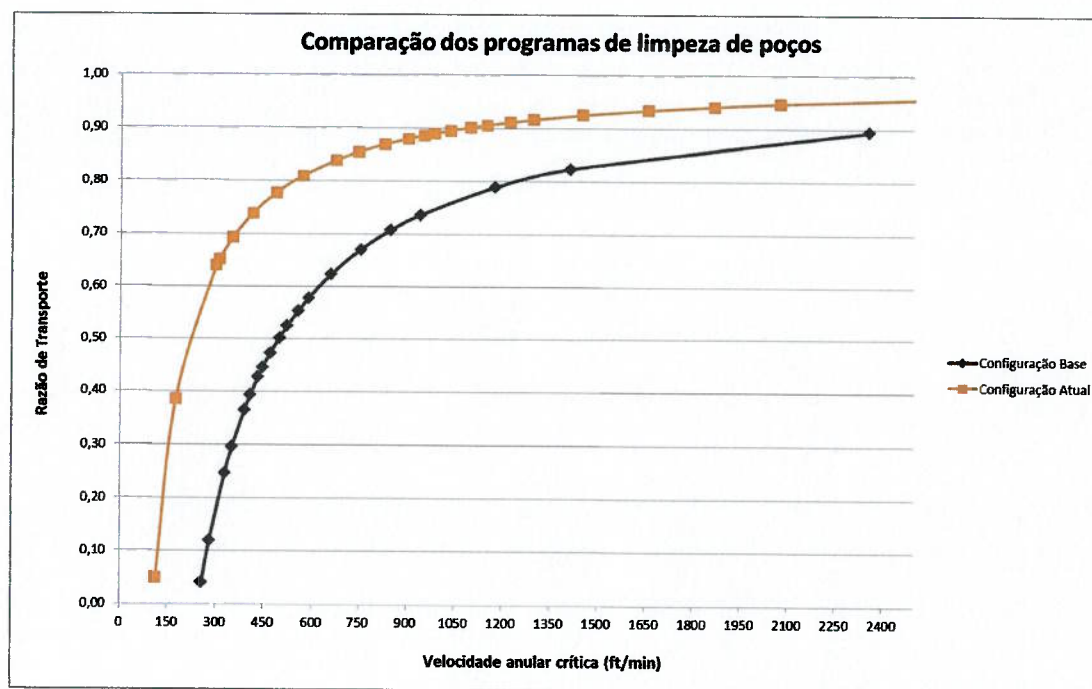


Figura 5.11 – Comparação dos programas de limpeza adotados

A partir dos resultados obtidos, notamos que houve uma melhoria bastante significativa da taxa de transporte em função da velocidade anular crítica necessária quando comparamos os valores de razão de transporte. Enquanto a configuração base inicia a sua taxa de transporte a aproximadamente 250 ft/min, a configuração atual já apresentava uma taxa de transporte de 56,8%. Para uma mesma vazão de bombeio, por exemplo, $Q = 700\text{gpm}$, onde a configuração base apresentou uma variação de 24,6%, a configuração atual apresentou uma variação de aproximadamente 85%, ou seja, esta nova configuração melhorou muito o rendimento desta operação.

Embora todos os resultados obtidos neste trabalho tenham exibido valores aceitáveis, devemos lembrar que diversas condições de contorno foram estabelecidas conforme uma maior simplicidade para a simulação dos parâmetros, limitação do modelo empírico adotado, parâmetros que foram fixados ou desconsiderados entre outros motivos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No objetivo de estudar a influência dos parâmetros que afetam o transporte de cascalhos em poços direcionais com o modelo empírico adotado permitiu que fossem dadas as seguintes observações:

1. Propriedades reológicas dos fluidos: A escolha do fluido de perfuração é fundamental para que a limpeza de poços durante a perfuração seja efetiva a baixas taxas de bombeio. Foi observado que quanto menor forem estas propriedades (μ_p e δ_y), melhor será conduzida a operação, lembrando que estas propriedades também serão necessárias para as outras atividades envolvidas na perfuração.
2. Inclinação do poço: Sendo este um parâmetro muitas vezes impossível de se manipular por motivos estruturais, geográficos, econômicos, estratégicos, entre outros, os resultados mostraram que quanto maior for a inclinação do poço, melhor será o transporte dos cascalhos.
3. Densidade do fluido: A densidade apresentou-se como um parâmetro de influência secundária no transporte de cascalhos, pois houve uma alteração pouco significativa na velocidade anular crítica inicial para a grande variação da densidade segundo os resultados obtidos, sendo este pouco eficiente na remoção.
4. Tamanho dos cascalhos: Como este é um parâmetro impossível de ser controlado por causa da forma aleatória que a broca fragmenta a rocha, o tamanho dos cascalhos é um parâmetro não operacional. A sua influência no transporte tende a ser mais expressiva quanto menor for o tamanho dos fragmentos.
5. Dimensões do anular: As dimensões do trecho anular tiveram pouca influência no transporte de cascalhos, entretanto, quando é observada a taxa de bombeio necessária para desenvolver a velocidade anular crítica para as combinações escolhidas, conclui-se que quanto maior a relação destas duas variáveis, melhor será executada a operação, mas lembrando que possam existir problemas hidráulicos que não é o objetivo deste trabalho. Sendo assim, é importante que o engenheiro faça uma boa seleção do conjunto broca/coluna de perfuração.

7 CONCLUSÃO

A partir das análises feitas com a simulação computacional, podemos concluir que as propriedades reológicas do fluido de perfuração influenciam principalmente na eficiência da atividade de limpeza de poços. A densidade do fluido e as dimensões do

anular mostraram uma menor influência neste procedimento, porém o papel de ambos também é fundamental e deve ser considerada. Outros parâmetros que foram estudados, mas que não poderá ser manuseado, no caso o tamanho de partículas e inclinação do poço, também exibiram uma influência secundária, mas seus resultados comparativos não foram utilizados neste trabalho devido a sua pouca importância.

Experimentos em laboratório indicam que a taxa de bombeio, se alta o suficiente, ela sempre removerá os cascalhos para qualquer fluido, tamanho de cascalhos e inclinação do poço. Infelizmente, taxas altas o suficiente para elevar e transportar os cascalhos para fora do anular de forma eficiente não podem ser usadas na maioria dos poços devido à falta de capacidade das bombas e/ou às pressões dinâmicas do fundo de poço. Altas velocidades de rotação e *back reaming* (limpeza secundária associada ao motor de fundo) são frequentemente usados quando a taxa de fluxo não é suficiente.

As sugestões para a continuidade deste trabalho:

- A consideração dos demais ângulos de inclinação do poço, já que o modelo adotado gera resultados muito diferentes do que é esperado.
- O desenvolvimento de experiência em laboratório em escala piloto para a reprodução da limpeza de poços, com intuito de desenvolvimento de novos modelos empíricos e validação da simulação computacional realizada neste trabalho e maior conhecimento na área.
- O desenvolvimento de modelos matemáticos para maior compreensão do comportamento do escoamento bifásico (fluido-cascalhos).

8 BIBLIOGRAFIA

BECKER, T.E., Azar J.J., and Okranji, S.S.: **“Correlations of Mud Rheological Properties with Cuttings Transport Performance in Directional Drilling”**, SPE paper apresentado na 64th Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 8-11, 1989.

BELAVADI and Chukwu: **“Experimental Study of the Parameters Affecting Cutting Transportation in a Vertical Wellbore Annulus”**, paper SPE 27880 apresentado no Western Regional Meeting held in Long Beach, California, 23 – 25 March, 1994.

BIN-HADDAH, A.S.: **“Development of Models for Drill Cuttings Transport in Inclined Wells based on Deposition Critical Velocity Concept”**, M.S. thesis, University of Tulsa, Tulsa, OK, 1988.

BOURGOYNE T. Adam Jr. et al.: **“Applied Drilling Engineering”**, SPE Textbook Series, Vol. 2, 1991

GAVIGNET, A.A. and Sobey, J.J.: **“Model Aids Cuttings Transport Predictions”**, JPT 916 , September 1989. 43

HUSSAIN et al: **“Experimental Study of Drilled Cuttings Transport Using Common Drilling Muds”**, SPEJ, pp. 11 – 20, Feb. 1983.

HYUN CHO, et. al. : **“A Three – Segment Hydraulic Model for Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells”**, presented at the 2000 SPE / Petroleum Society of CIM International Conference on Horizontal Well Technology held in Calgary, Alberta, Canada, 6 – 8 November 2000.

JAKULAR, L.S.: **“A Study of Hole Size Effect on Critical and Sub Critical Drilling Fluid Velocities in Cuttings Transport for Inclined Wellbore”**, M.S. thesis, University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 1993. 44

LARSEN, T.I.: **“A Study of the Critical Fluid Velocity in Cuttings Transport”**, M.S. thesis, University of Tulsa, Tulsa. Oklahoma, U.S.A., 1993.

LARSEN et. al.: **“Development of a New Cutting Transport Model for High – Angle Wellbores Including Horizontal Wells”**, paper SPE 25872, June 1997.

MARTINS, A.L. and Santana, C.C.: **“Evaluation of Cuttings Transport in Horizontal and Near Horizontal Wells – A Dimensionless Approach”**, paper SPE 23643 apresentado na Second Latin American Petroleum Engineering Conference, II LAPEC, of the SPE, Caracas, Venezuela, March 8 – 11, 1992.

MOORE, P.L.: **“Drilling Practices Manual”**, Petroleum Publishing Co., Tulsa (1974).

OKRANJI, S.S.: **"Mud Cuttings Transport Dttudt in Directional Well Drilling"**, TURDP Post – Doctoral Report, University of Tulsa, Tulsa, OK, 1981.

OKRANJI, S.S. and Azar J.J.: **"Mud Cutting Transport in Directional Well Drilling"**, paper SPE 14178, apresentado no annual meeting in Las Vegas, Nevada, Sept. 22-25, 1985.

PIGOTT, R.J.S. : **"Mud Flow in Drilling"**, Drilling and Production Practice, API. (1941) 46

SEEBERGER et al.: **"Oil Muds in Large – Diameter, Highly Deviated Wells: Solving the Cuttings Removal Problems"**, paper SPE / IADC 18636, presented at the 1989 SPE / IADC Drilling Conference, New Orleans, Lousiana, February 28 – March 3, 1989.

SHARMA, M.P.: **"Cuttings Transport in Inclined Boreholes"**, paper OSEA – 90159 apresentado na the 8th Offshore South Asia Conference, Singapore, December 4 – 7, 1990.

SIFFERMAN R. Thomas et. al.: **"Drill Cutting Transport in Full Scale Vertical Annuli"**, paper SPE 4514 apresentado no 48th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers held in Las Vegas, Nevada, September 30 – October 3, 1973

ZEIDLER, H. Udo: **"An experimental Analysis of the Transport of Drilled Particles"**, paper SPE 3064 apresentado no SPE 45th Annual Meeting, Houston, Oct. 4 – 7, 1970.

MITCHELL, Robert F. **"Petroleum Engineering Handbook"**, Volume II: Drilling Engineering, p.119–183. 2007

PAL SKALL. **"Drilling Fluid Engineering"**, 3^o Edição, p.52-80, 2012

LARSEN, T.I., Pilehvari, A.A., and Azar, J.J.: **"Development of a New Cuttings Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells"** paper SPE 25872 presented at the 1993 SPE Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoir Symposium, Denver, 12–14 April.

JAKULAR, L.S. *et al.*: **"Extensive Experimental Investigation of Hole Size Effect on Cuttings Transport in Directional Well Drilling,"** paper presented at the 1993 ASME Fluids Engineering Division Annual Summer Meeting, San Diego, California, 7–12 July.

AZAR, Jamal J. and G. Robello Samuel,: **“Drilling Engineering”**, pg.171-186
1º Edição, 2007

LUO, Y. and Bern, P.A.: **“Flow-Rate Predictions for Cleaning Deviated Wells”** paper SPE/IADC 23884 presented at the 1992 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, 18–21 February.

GUILD, G.J. and Hill, T.H.: **“Hole Cleaning Program for Extended Reach Wells”** paper SPE 29381 presented at the 1995 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, 28 February–5 March.

MARTINS, A.L.: **“Modelagem e simulação do escoamento axial anular de mistura sólido-fluido não-newtoniano em dutos horizontais e inclinados”** dissertação apresentada na Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Novembro 1990.

IRAMINA, W. S. **Notas de Aula da Disciplina PMI 1841 – Engenharia de Perfuração**, 2011.

IRAMINA, W. S. **Notas de Aula da Disciplina PMI 1042 – Engenharia de Perfuração Avançada**, 2012.

9 APÊNDICE A – Tabelas Complementares

Propriedades reológicas dos fluidos		
fluidos	Viscosidade Plástica μ_p (cp)	Ponto de Escoamento τ_y (lbs/100ft ²)
1	3,2	2,1
2	10,5	11,3
3	20,3	20,1
4	29,8	30,6
Água	1,0	0,0

Tabela 8.1 – Dados dos fluidos utilizados

Propriedades Reológicas dos Fluidos	
Tipo de Fluido	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
1	135,25
2	213,19
3	248,61
4	301,75
Água	132,60

Tabela 8.2 – Resultados para os fluidos utilizados

Inclinação do Poço	
Ângulo (Graus)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
90°	158,68
80°	193,99
70°	216,19
60°	221,75
50°	209,10
40°	178,85

Tabela 8.3 – Resultados para as diferentes inclinações do poço para o fluido 1

Inclinação do Poço	
Ângulo (Graus)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
90°	258,97
80°	316,60
70°	352,83
60°	361,89
50°	341,26
40°	291,89

Tabela 8.4 - Resultados para as diferentes inclinações do poço para o fluido 3

Densidade do Fluido	
Densidade (ppg)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
9	160,30
12	144,12
15	127,95

Tabela 8.5 - Resultados para as diferentes densidades do fluido 1

Densidade do Fluido	
Densidade (ppg)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
9	261,61
12	235,21
15	208,81

Tabela 8.6 - Resultados para as diferentes densidades do fluido 3

Tamanho dos Sólidos	
Diâmetro (in)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
0,125	239,47
0,25	212,54
0,5	158,68

Tabela 8.7 - Resultados para os diferentes tamanhos de sólido para o fluido 1

Tamanho dos Sólidos	
Diâmetro (in)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
0,125	390,82
0,25	346,87
0,5	258,97

Tabela 8.8 - Resultados para os diferentes tamanhos de sólido para o fluido 3

Dimensões do Anular		
d1/d2 = 0,4		
Drillpipe d1 (in)	Hole d2 (in)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
2,375	5,75	157,02
3,5	8,625	161,67
4,5	10,75	164,66
5,5	13,625	169,65
d1/d2 = 0,7		
Drillpipe d1 (in)	Hole d2 (in)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
2,375	4,5	153,69
3,5	5	152,03
4,5	6,625	153,69
5,5	7,75	154,03

Tabela 8.9 - Resultados para as diferentes dimensões do anular para o fluido 1

Dimensões do Anular		
d1/d2 = 0,4		
Drillpipe d1 (in)	Hole d2 (in)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
2,375	5,75	244,63
3,5	8,625	284,77
4,5	10,75	310,57
5,5	13,625	353,57
d1/d2 = 0,7		
Drillpipe d1 (in)	Hole d2 (in)	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
2,375	4,5	215,96
3,5	5	201,63
4,5	6,625	215,96
5,5	7,75	218,83

Tabela 8.10 - Resultados para as diferentes dimensões do anular para o fluido 3

Comparação dos programas de limpeza de poços	
Configurações	Velocidade média de escorregamento dos cascalhos (ft/min)
Base	248,61
Atual	108,24

Tabela 8.11 – Resultados das configurações antes e após o estudo dos parâmetros